

Modelado y experimentación computacional de la etapa de compresión en motores de pistones libres

Modeling and computer experiments of the compression stage in free piston engines

Genovevo Morejón-Vizcaino

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Mecánica. La Habana. Cuba

Correo electrónico: gmvizcaino@mecanica.cujae.edu.cu

Recibido: 8 de septiembre de 2011 Aceptado: 10 de junio de 2012

Resumen

En este artículo se alcanzó la obtención de un prototipo analítico de la etapa de combustión de un motor de pistones libres para realizar experimentos virtuales con el propósito de arribar al nuevo conocimiento, necesario para desarrollar un motor de pistones libres multicilindro con una bomba volumétrica, que haga la función, del acumulador hidráulico que emplean los diseños actuales para la carrera de compresión, con la finalidad de mejorar la densidad de potencia y disminuir las exigencias al comportamiento dinámico de los agregados. El método empleado es el "Desarrollo de nuevos productos mecatrónicos". Se dedujo el modelo matemático para la etapa de la compresión y aplicando el método de los grafos dicromáticos se obtuvo un algoritmo y el prototipo analítico. Los resultados de los experimentos virtuales muestran diferentes restricciones en la geometría y los materiales a utilizar así como las tendencias en el comportamiento de los diferentes parámetros hidráulicos.

Palabras claves: motores de pistones libres, experimentos computacionales, prototipos analíticos, modelos matemáticos, oleohidráulica.

Abstract

The goal of the investigation is the development of a free piston engine with an auxiliary hydraulic bomb that substitutes the function of the hydraulic accumulator with the objective of to improve the density of power and to diminish the demands in the dynamic behavior of the components. The used method is the "Development of new products mecatrónicos". In the investigation to arrive to the new knowledge an analytic prototype is developed to carry out PC-experiments. The mathematical model is deduced for the stage of the compression, the algorithm and the analytic prototype was obtained. The results of the experiments show different restrictions in the geometry and the materials to use as well as the tendencies in the behavior of the different hydraulic parameters.

Key words: free pistons engine, computational experiments, analytic prototypes, mathematical models, oilhydraulic.

Introducción

El intento por reducir el consumo de portadores energéticos y las emisiones de gases contaminantes ha conducido a los vehículos con transmisión híbrida hidráulica que combinan un motor diesel con una transmisión hidrostática. Una de las ventajas, es que un elevado por ciento de la energía antes consumida en los frenos ahora se almacena en los acumuladores y posteriormente se reutiliza en el periodo de aceleración. Esto ha proporcionado una reducción de hasta un 50 % del consumo de combustibles y 40% de emisiones de gases contaminantes.

El primer automóvil híbrido de producción masiva fue el Toyota *Prius* en el año 1997. La venta en ese año estuvo alrededor de 100 unidades y para la década actual se prevén ventas cercanas al millón por años. El uso de estas nuevas tecnologías puede producir ahorros de millones de barriles de combustible por día, cifra que se manejó durante el Foro Internacional sobre Combustibles Limpios para el Transporte. Lo anterior demuestra la necesidad, novedad, relevancia y actualidad del tema que es objeto de estudio.

Este artículo muestra un resultado parcial de una investigación cuyo pregunta científica es: Cómo desarrollar un motor de pistones libres multi-cilindro con carrera de compresión realizada por aceite hidráulico inyectado por una bomba volumétrica, (ver Fig. 1B). El método empleado es: “Desarrollo mecatrónico de nuevos productos orientados a la capacidad tecnológica disponible” [1, 2]. La denominación del concepto es “motor de pistones libres con inyección de aceite a presión”, con siglas (MPLAP). En este nuevo concepto se pretende reducir las exigencias dinámicas a los componentes, con respecto al “Hybrid” motor de pistones libres desarrollado por una compañía alemana de investigación y desarrollo denominada INNAS [3]. Aunque el MPLAP es multi-cilindro, en este trabajo se analizara el comportamiento de un solo pistón, porque para analizar un conjunto, primero es necesario conocer cómo se comporta un elemento.

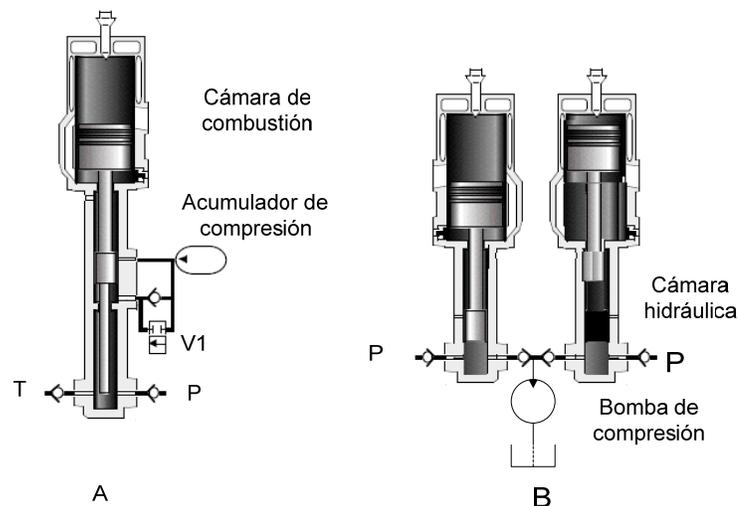


Fig. 1. Motor de pistón libre. (Figura extraída y editada de [4])

Un motor de pistón libre es un artefacto donde coexisten un motor de combustión interna sin cigüeñal por un extremo y por el otro extremo un compresor de gas, un alternador lineal o una bomba volumétrica donde los pistones de ambos están rígidamente unidos por un elemento común de forma tal que cuando uno de los pistones se encuentra en compresión el otro está en expansión.

La primera aplicación de un motor de pistón libre moderno fue en un compresor de aire en el año 1928 [4]. Se destacan por su: pequeña cantidad de elementos móviles, alta eficiencia, tamaño reducido, bajos niveles de ruido y vibración [6], consecuentemente en la primera mitad del siglo pasado se desarrollaron una gran cantidad de grupos electrógenos de gran potencia con esta tecnología, empleando gas como combustible [7], también se realizaron intentos para utilizar estos generadores en la propulsión del vehículo pesados como por ejemplo en locomotoras pero sin resultados positivos [8].

En aplicaciones modernas el concepto está incluido en transmisiones hidrostáticas empleadas en vehículos híbridos hidráulicos y en generadores eléctricos lineales, el primero de estos fue patentado en 1959, utilizados en los vehículos híbridos eléctricos.

En las motores de pistón libre, los cilindros de combustión y el hidráulico están contenidos en un eje común (ver Fig. 1), esto trae consigo un diseño muy sencillo, aunque, el cilindro de combustión trabaja bajo el mismo principio de un motor de dos tiempos, es necesario disponer un sensor de posición para conocer la posición

del pistón en cada momento, para que una unidad electrónica de control (UEC), a partir del programa alojado en su CPU, tome decisiones tales como: accionar válvulas, el momento y la cantidad de combustible a inyectar, el encendido, etcétera. Lo anteriormente expuesto afirma que un motor de pistones libres es una aplicación mecatrónica, donde el mando hidráulico también es gobernado por la UEC que regula la carrera de compresión. Esto le confiere una elevada flexibilidad operacional a la unidad ya que en aras de mantener una alta eficiencia, automáticamente varía la relación de compresión [9].

La diferencia entre el concepto presentado MPLAP y el MPL de INNAS es que en este la carrera de compresión (ver Fig. 1A), se realiza a expensas de la energía aportada por el acumulador de compresión controlado por la válvula V1.

Para buscar el nuevo conocimiento se emplea una metodología de investigación tecnológica propuesta en [1] denominada “Desarrollo de nuevos productos mecatrónicos” (NUPROME). En la investigación se obtuvo el prototipo analítico para el estudio de la compresión en un cilindro y no también para la etapa de expansión porque esta depende de la primera. Los resultados de los experimentos computacionales muestran tendencias que indican: diferentes restricciones en la geometría, los materiales a utilizar, los parámetros para ajustar la válvula de entrada, criterios para imponer soluciones constructivas.

Entre las conclusiones a las que se arriban se encuentra, que la incidencia de las fuerzas de inercia en el consumo de energía es tal que sugiere fabricar los pistones con materiales de elevada resistencia específica y soluciones de diseño que requieran de poco volumen de material.

Métodos

El método empleado es “Desarrollo de nuevos productos mecatrónicos” (NUPROME). La línea de acción que impone la metodología es: desarrollo del modelo matemático a partir de la **conceptualización mecatrónica** del producto a desarrollar. Definir modelo matemático y el algoritmo, con el cual se realiza un programa de computación (prototipo analítico). Con el prototipo analítico se realizan experimentos computacionales realizando corridas para diferentes valores de las variables de entrada. Analizando los resultados de las corridas se obtiene el nuevo conocimiento.

1. Modelado Matemático

Las Hipótesis fundamentales:

- 1- El cilindro de combustión es hermético y la mezcla de gases contenida durante el desarrollo del proceso de compresión se supone que se comporta como un gas ideal y además no intercambia calor con el exterior.
- 2- No se tiene en cuenta los fenómenos térmicos ni termodinámicos en el cilindro hidráulico.

La conceptualización del producto [10] permite realizar un esquema de análisis (Ver Figura 2 a la izquierda) para deducir el modelo matemático de la fase de compresión de un cilindro del MPLAP. Las zonas marcadas son: la zona 2 corresponde con la entrada al cilindro, la 3 con la cara del cilindro hidráulico, la 4 con la superficie que ocupaba la cara del cilindro de combustión en el momento antes del análisis y la 5 donde se encuentra en el momento del análisis.

1.1 Cilindro de combustión

Para aplicar un método numérico el cilindro de longitud h se discretiza en n rebanadas de tamaño finito a cada uno de los cuales le corresponde un intervalo finito de tiempo Δt . El modelo se establece para calcular el valor de las variables para cada punto hpj igual al producto de j por Δh y el tiempo correspondiente es la sumatoria de las Δt_j , (ver Fig. 2 derecha).

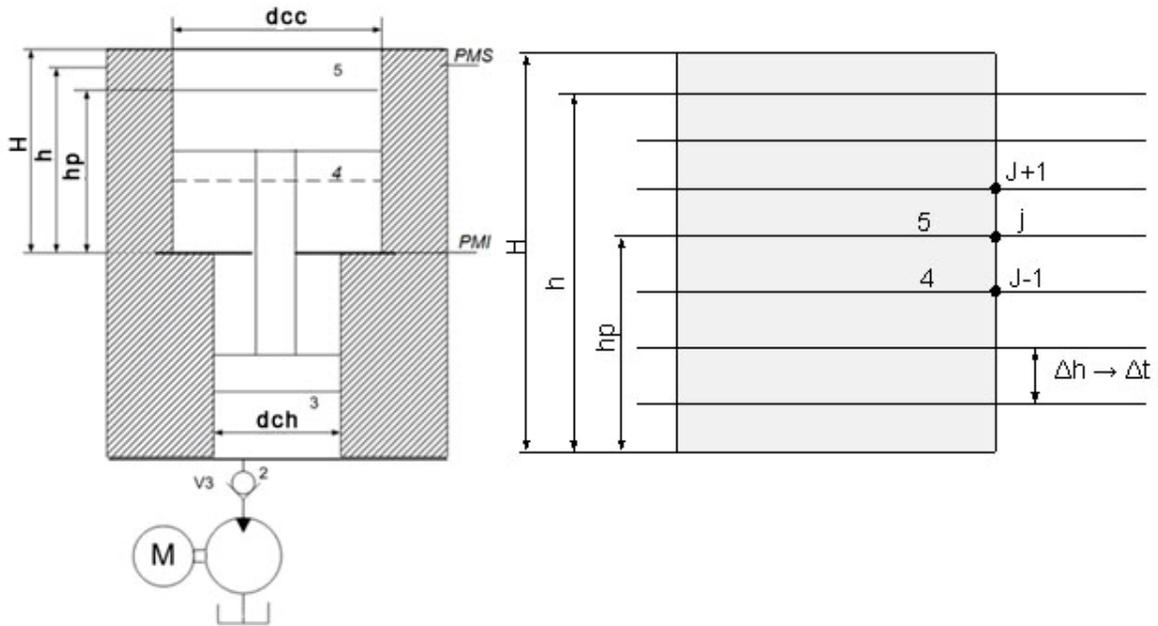


Fig. 2. Esquema de análisis

Cuando el pistón es movido del punto muerto inferior (PMI) al punto muerto superior (PMS) se efectúa una compresión en la cámara de combustión, este proceso es considerando adiabático, entonces:

$$p_5 = p_4 \cdot \left(\frac{H}{H - h_p} \right)^c \quad (1)$$

Cuando el pistón se encuentra en el PMI el cilindro se comunica con la atmosfera para evacuar los gases de desecho y cuando arriba al PMS el valor de la presión debe alcanzar el valor de la presión de compresión, es por eso que:

$$\text{cuando } \begin{cases} h_p = 0 \rightarrow p_4 = 1[\text{bar}] \\ h_p = h \rightarrow p_5 = p_{comp} \end{cases} \quad (2)$$

Sustituyendo (2) en (1) y despejando se obtiene:

$$h = H \cdot \left(1 - \frac{1}{p_{comp}^{1/c}} \right) \quad (3)$$

Entonces:

$$\Delta h = \frac{h}{n} \quad (4)$$

1.1.2 Cilindro hidráulico

En la figura 3 aplicando el método cineto-estático se tiene:

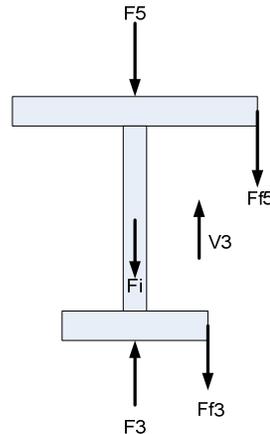


Fig. 3. Cuerpo libre del pistón híbrido

Aplicando el método cineto-estático se tiene:

$$\uparrow + \sum Fy = F3 - F5 - Ff3 - Ff5 - Fi = 0 \quad (5)$$

Conociendo que las fuerzas F3 y F5 son fuerzas de presión, Ff3 y Ff5 son fuerzas fricción y Fi fuerza de inercia. Sustituyendo y despejando queda:

$$p3 = \frac{p5 \cdot Acc + mp \cdot ap + (k3 + k5) \cdot V3}{Ach} \quad (6)$$

La velocidad del pistón depende del caudal que ingresa al cilindro:

$$V3 = \frac{q3}{Ach} \quad (7)$$

Aplicando la ecuación de igualdad de volúmenes:

$$Ach \cdot \Delta h = q3 \cdot \Delta t \quad (8)$$

Despejando queda:

$$\Delta t = \frac{Ach \cdot \Delta h}{q3} \quad (9)$$

La aceleración del pistón se determina por:

$$ap = \frac{\Delta V3}{\Delta t} \quad (10)$$

Potencia consumida por la bomba:

$$Nb = \frac{q3 \cdot (p3 + \Delta p23 + \Delta pV3)}{600} \quad (11)$$

La caída de presión entre los puntos 2 y 3 se aplica la ley de Bernoulli y se obtiene:

$$\Delta p23 = \gamma \cdot \left(\frac{V3^2}{2g} + \xi \frac{V3^2}{2g} + \frac{32 \cdot v \cdot l23 \cdot V3}{g \cdot dch^2} \right) \quad (12)$$

La caída de presión a través de la válvula antiretorno v3 (Ver Figura 2) se determina por el catálogo del fabricante, obedeciendo a la siguiente ley:

$$\Delta p v_3 = f(q_3) \quad (13)$$

La velocidad del pistón V3 es cero en el PMI y en el PMS, en esta modelación se definen dos funciones que reproducen tal comportamiento. La primera sigue una ley sinusoidal:

$$V_{3s} = V_{max} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi \cdot hp}{h}\right) \quad (14)$$

La segunda se denomina ley de cambio de pendiente mostrada en la figura 4.

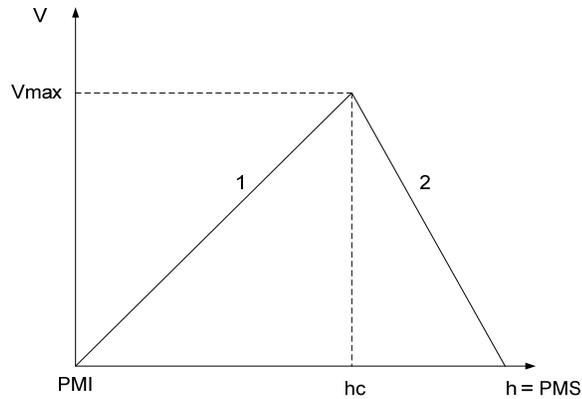


Fig. 4. Ley cambio de pendiente

$$k_v = \frac{hc}{h} \quad (15)$$

$$V_{3cp} = \begin{cases} hp \leq hc \rightarrow \frac{V_{max}}{k_v \cdot h} \cdot hp \\ hp > hc \rightarrow -\frac{V_{max}}{(1 - k_v) \cdot h} \cdot (h - hp) \end{cases} \quad (16)$$

$$V_{3cp} = \begin{cases} hp \leq hc \rightarrow \frac{V_{max}}{k_v \cdot h} \cdot hp \\ hp > hc \rightarrow -\frac{V_{max}}{(1 - k_v) \cdot h} \cdot (h - hp) \end{cases} \quad (16)$$

Para seleccionar la ley de velocidad se introduce la variable *band*:

$$V_3 = \begin{cases} band = 1 \rightarrow V_{3s} \\ band = 2 \rightarrow V_{3cp} \end{cases} \quad (17)$$

2 Modelo matemático

El uso de los modelos matemáticos para el desarrollo de nuevos productos está muy extendido ya que permiten formalizar cualquier ente para su posterior análisis y síntesis empleando las técnicas informáticas. Un modelo matemático es un conjunto de relaciones y variables, donde las relaciones se enumeran con (r #) para posibilitar la aplicación posteriormente de un método de algoritmización, Es por eso que en el modelo matemático (18) se introducen algunas relaciones deducidos desde (1) y hasta (17)

$$r1 \quad p_5 - p_4 \cdot \left(\frac{H}{H-hp}\right)^c = 0$$

$$r2 \quad h - H \cdot \left(1 - \frac{1}{p_{comp}^{1/c}}\right) = 0$$

$$r3 \quad \Delta h - \frac{h}{n} = 0$$

$$r4 \quad p3 - \frac{p5 \cdot Acc + mp \cdot ap + (k3 + k5) \cdot V3}{Ach} = 0 \quad (18)$$

$$r5 \quad V3 - \frac{q3}{Ach} = 0$$

$$r6 \quad \Delta t - \frac{Ach \cdot \Delta h}{q3} = 0$$

$$r7 \quad ap - \frac{\Delta V3}{\Delta t} = 0$$

$$r8 \quad Nb - \frac{q3 \cdot (p3 + \Delta p23 + \Delta pV3)}{600} = 0$$

$$r9 \quad \Delta p23 - \gamma \cdot \left(\frac{V3^2}{2g} + \xi \frac{V3^2}{2g} + \frac{32 \cdot v \cdot l23 \cdot V3}{g \cdot dch^2} \right) = 0$$

$$r10 \quad \Delta pV3 - f(q3) = 0$$

$$r11 \quad hp - j \cdot \Delta h = 0$$

$$r12 \quad \begin{cases} band = 1 \rightarrow V3 = V3s \\ band = 2 \rightarrow V3 = V3cp \end{cases}$$

$$r13 \quad \Delta V - V3 + V3ant = 0$$

Donde:

p5	Presión en la cámara de combustión	[bar]
pcomp	Presión al finalizar la compresión	[N]
p3	Presión en la cámara hidráulica	[bar]
V3	Velocidad pistón híbrido	[m/s]
k3	coeficiente de fricción viscosa	[N·s/m]
k5	coeficiente de fricción viscosa	[N·s/m]
h	carrera cilindro combustión	[mm]
hp	posición del cilindro combustión	[mm]
Ach	Área cilindro hidráulico	[mm ²]
Acc	Área cilindro combustión	[mm ²]
mp	masa del pistón	[kg]
ap	aceleración pistón	[m/s ²]
c	Capacidad térmica	[-]
q3	Caudal que ingresa en el cilindro hidráulico	[l/min]
Δp23	Caída de presión entre los puntos 2 y 3	[bar]
ΔpV3	Caída de presión a través de la válvula V3	[bar]
ξ	Coeficiente de resistencia del orificio	[-]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
v	Viscosidad cinemática	[mm ² /s]
γ	Peso específico	[N/m ³]

2.1 Algoritmo

1. Se desarrolla el modelo matemático.
2. Se traza el grafo dicromático del modelo donde los nodos de un color son las variables y el otro son las relaciones.
3. Plantear un problema sobre el modelo, lo cual consiste en definir en función de que variables quedaran los resultados deseados. por lo tanto, plantear un problema es definir un subconjuntos de variables de entrada E y salida S de entre el conjunto de las variables del modelo matemático.
4. Se traza el grafo del problema, borrando del grafo anterior, las variables de entrada y sus aristas.
5. En el grafo del problema se direccionan adecuadamente las aristas y se obtiene el resolvente, que es un grafo con pareo perfecto y mediante el cual se define el algoritmo.

En este artículo no se muestran los grafos por un problema de espacio y además por no ser necesario para cumplir los objetivos propuestos. El conjunto de variables del modelo matemático se muestra a continuación.

2.1.1 Subconjunto de entrada

El mismo está formado por:

$$E = \{p4, pcomp, k3, k5, dch, H, Ach, Acc, mp, c, n, \xi, g, v, \gamma, l23, j, Vmax, band, kv\}$$

Según [3] $\gamma = 1.4$.

2.1.2 Subconjunto de salida

$$S = \{p5, p3, q3, Nb, ap, \Delta p23, \Delta pV3, \}$$

2.2 Prototipos analíticos y experimentos computacionales

Un prototipo es un ente tangible o intangible, que reproduce los atributos de un producto ya sea de forma total o parcial, según esta definición los programas de computación obtenidos a partir de los algoritmos son prototipos analíticos ya que permiten calcular o inferir diferentes tipos de propiedades, comportamientos, prestaciones, rendimientos, geometría, etc. del producto que se desarrolla. En la presente investigación el prototipo analítico se obtuvo programando en Matlab el algoritmo. Los experimentos computacionales, o simulación, se realizan al correr el programa variando el valor de las variables que pertenecen al subconjunto de entrada y obtener el comportamiento para esas condiciones. Los resultados obtenidos se discuten en el siguiente epígrafe.

3. Validación del modelo matemático

El experimento 1 cuyo resultado se muestra en la figura 5 tiene el objetivo de validar el modelo matemático. Los valores de la aceleración y duración de la compresión obtenidos con un experimento computacional, donde se tomaron como datos los de un ensayo (experimento 2) expuesto en [9], la velocidad máxima $V_{max}=20$ m/s y la carrera $h=120$ mm

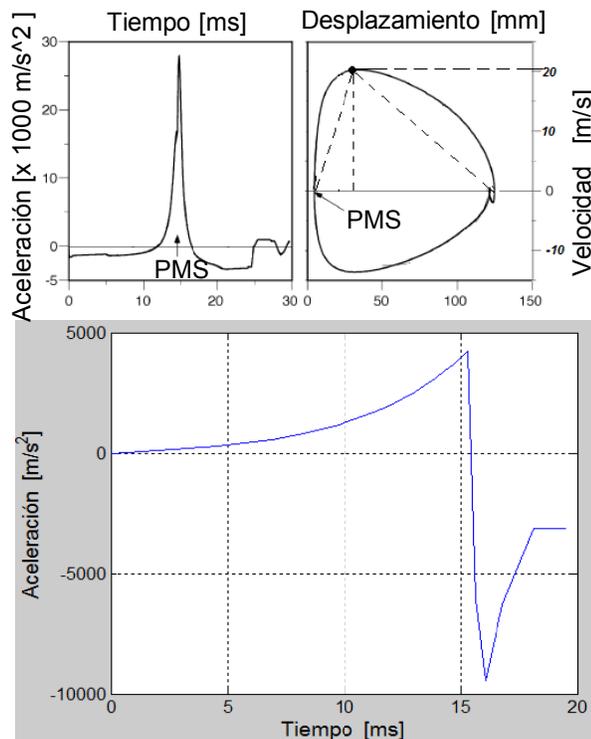


Fig. 5. Validación del modelo matemático

La diferencia entre los experimentos está en el comportamiento de las velocidades de los pistones (Ver Figura 5 superior derecho), en el experimento 2 se comporta según la línea de trazo continua y en el otro según la línea discontinua. El análisis de los resultado arrojó que la diferencia en tiempo es de 15 ms y en la aceleración es próximo a 30000 m/s² en el experimento 2, a 20 ms y 10000 m/s² en el uno, es explicable por la diferencia de área bajo la curva de velocidad vs desplazamiento (superior derecha).

Lo anterior indica que el modelo obtenido es válido para conseguir el objetivo de esta investigación y que es necesario someter el modelo a etapas de refinamiento para ser usado en fases más avanzadas de la investigación.

Resultados

El resultado obtenido es un prototipo analítico que permite calcular los parámetros para cada posición del pistón durante la etapa de compresión de un cilindro en un motor de pistones libres: presión en cada cámara del cilindro, las componentes de la presión en la cámara hidráulica, caídas de presión en la cámara hidráulica y en la válvula de entrada, así como, el tamaño de la válvula de entrada, el tiempo de compresión, la potencia que consume la bomba hidráulica de compresión y la carrera del pistón en función de la geometría y la velocidad del pistón.

Presión en la cámara de combustión: 15 [bar]	Coefficiente de cambio de la velocidad kv: 0.8
Diámetro del cilindro hidráulico: 25 [mm]	Velocidad máxima del pistón: 5 [m/s]
Diámetro del cilindro de combustión: 50 [mm]	Altura cámara de combustión: 60 [mm]
Masa del pistón: 1 [kg]	Peso específico aceite hidráulico: 8600 [N/m ³]
Coefficiente de fricción viscosa k5: 0.8 [N-s/m]	Viscosidad cinemática: 15 [mm ² /s]
Coefficiente de fricción viscosa k3: 0.5 [N-s/m]	Coefficiente de resistencia del orificio: 1
Ley para el cambio de pendiente	V3s

La figura 6 muestra los resultados de un experimento computacional con los siguientes datos:

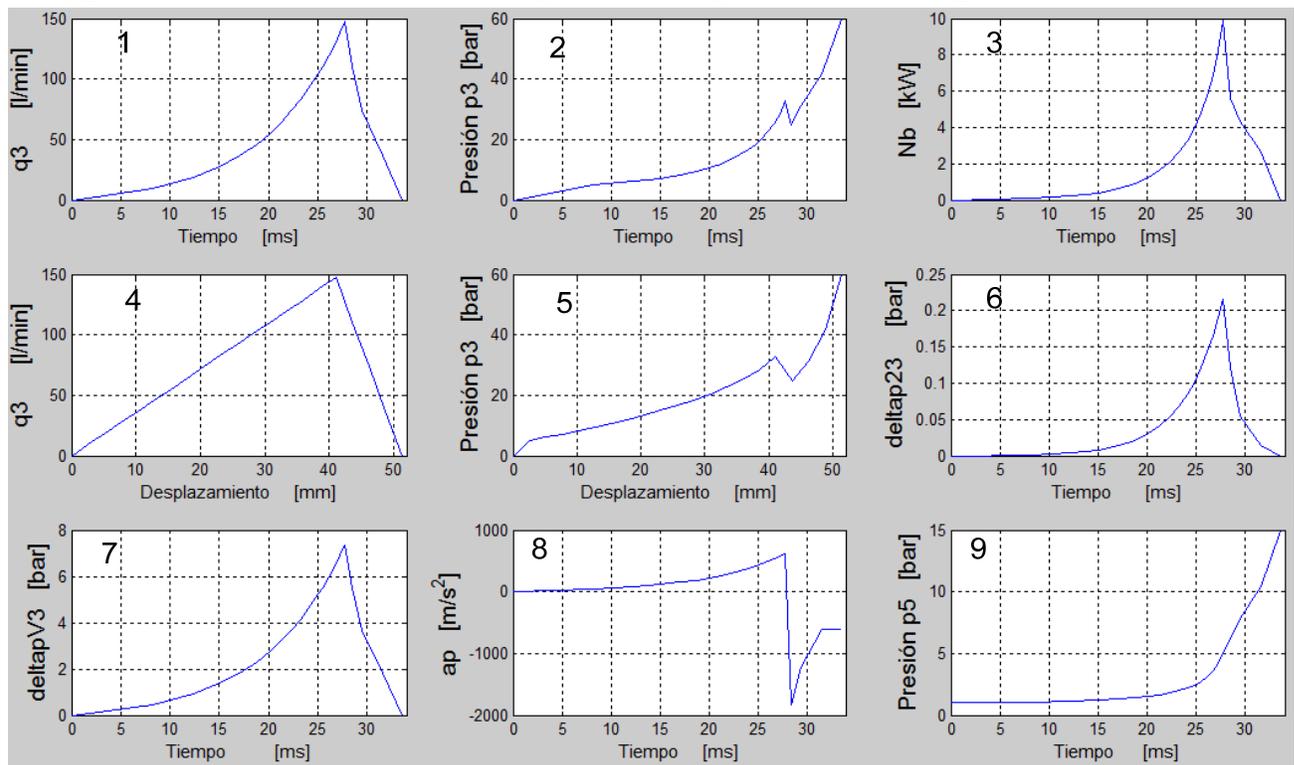


Fig. 6. Parámetros calculados durante los experimentos computacionales

Conclusiones

1- Los resultados de los experimentos computacionales muestran: diferentes restricciones en la geometría, los materiales a utilizar, los parámetros para ajustar la válvula de entrada, criterios para imponer soluciones constructivas.

2- La incidencia de las fuerzas de inercia en el consumo de energía es tal que sugiere fabricar los pistones con materiales de elevada resistencia específica y soluciones de diseño que requieran de poco volumen de material.

3- Este modelo permitió adquirir el nuevo conocimiento, pero los resultados obtenidos no se consideran definitivos, porque es necesario incrementar la complejidad del modelo con vista a reproducir otras variables, como por ejemplo la eficiencia total.

Referencias

1. Morejón, G., Díaz, J. y Arzola, J. “Desarrollo mecatrónico de nuevos productos orientados a la capacidad tecnológica disponible”. *Revista de Cubana de Ingeniería*. 2011, vol II, n°. 3. p. 59-70. [Consultado el: 4 de mayo de 2011] Disponible en: <http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/60/pdf> ISSN 2223-1781
2. Morejón Vizcaino, G. “Diseño en ingeniería orientado a la capacidad tecnológica disponible”. *Ingeniería Energética*. 2006, vol. XXVII, n°. 2-3, p. 75-82. [Consultado el: 20 de enero de 2011] Disponible en: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/117/116> ISSN 1815-5901
3. Mikalsen, R. y Roskilly, A. “A review of free-piston engine history and applications”. *Applied Thermal Engineering*. 2007, vol 27, n°. 14-15, p. 2339–2352. ISSN 1359-4311.
4. Achten P. “The development of the Innas free Piston Engine. The art of choosing right moment”. En: *Presentations and Technical Papers Innas technology*, number Paper FPE02, April 2009
5. Pescara, R. “Motor compressor apparatus”. US Patent 1,657,641, 1928.
6. Toutant, W. “The Worthington–Junkers free-piston air compressor”. *Journal of the American Society of Naval Engineers*. 1952, vol 64, p.583–594.
7. London, A. y Oppenheim, A. “The free-piston engine development, Present status and design aspects”. *Transactions of the Asme*. 1952, vol 74, p.1349–1361.
8. Underwood, A. “The GMR 4-4 “HYPREX” engine – A concept of the free-piston engine for automotive use”. *SAE Transactions*. 1957, vol 65, p.377–391.
9. Achten, P., Johan, P, *et al.* “Horsepower with brains: The design of the CHIRON Free Piston Engine”. En: *Presentations and Technical Papers Innas technology*, number Paper FPE01, April 2009
10. Morejón Vizcaino, G. “Conceptualización y modelación matemática de una transmisión híbrida hidráulica para vehículos”. En: *V Seminario Euro-Latinoamericano en Sistemas de Ingeniería*, Trujillo, República Dominicana, 22 23 de Octubre 2009.