

## **ANÁLISIS DE UN MOTOR ROTATIVO ORIGINAL PROPULSADO CON AIRE COMPRIMIDO**

**Gustavo A. Verdur†, Luis R. Mercuri†, Oscar D. Morán\***

**†Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico-Sociales**

Universidad Nacional de San Luis,  
Av. 25 de Mayo 384 (D5730EKQ), Villa Mercedes, San Luis, Argentina  
email: gverdur@fices.unsl.edu.ar, web page: <http://www.fices.unsl.edu.ar>

**\*Laboratorio de Mecatrónica**

Universidad Nacional de San Luis  
Av. 25 de Mayo 384 (D5730EKQ), Villa Mercedes, San Luis, Argentina  
email: dmoran@fices.unsl.edu.ar, web page: <http://www.fices.unsl.edu.ar>

El Motor Rotativo Verdur (MRV) es un desarrollo original efectuado en la Facultad de Ingeniería y Cs. Económico Sociales de la U.N.S.L El presente trabajo tiene por objeto estudiar la factibilidad que el MRV funcione propulsado por aire comprimido comparándolo con un motor desarrollado por la empresa MDI (Moteur Developpment International) que utiliza el aire comprimido como agente de propulsión. El MRV funciona que mando un hidrocarburo. La combustión de los hidrocarburos produce residuos contaminantes que son perjudiciales para la atmósfera por lo que los desarrollos de los nuevos motores tienden a reducir y hasta eliminar estos residuos. Desarrollar un motor propulsado por aire es una alternativa que tiene sentido si se lo analiza en relación al medio ambiente y las energías alternativas. Otra razón que justifica este estudio de factibilidad, es la similitud que existe en la secuencia de operaciones que realiza el motor MDI y el MRV. Si bien el primero se vale de un mecanismo biela-manivela modificado para obtener potencia, el MRV también podría obtener potencia, pero utilizando un sistema rotativo. Este último de mayor sencillez y con menor cantidad de piezas en movimiento. También se debe mencionar que el aire comprimido como fuente de energía sería inagotable.

## 1 INTRODUCCIÓN

La descripción del motor de MDI (Moteur Developpement International)<sup>[1]</sup> que se utiliza como referencia para la comparación con el MRV (Motor Rotativo Verdur), corresponde a uno de los primeros modelos del MDI del cual se conocen ciertos detalles técnicos. El mismo ha sido montado en un automóvil y se han realizado pruebas. No se dispone de información relacionada con el último modelo del motor que se encuentra en desarrollo. De todas formas, el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo y a los efectos de encontrar una analogía con el MRV, la información que se dispone es suficiente.

El motor de combustión interna funciona según un ciclo que consta de admisión, compresión, expansión y escape, que puede realizar en dos o cuatro tiempos, pero -en ambos casos- todos ellos en cada uno de los cilindros que tenga el motor. La fuerza propulsora se obtiene de la expansión producida por la combustión de una mezcla de aire y combustible que tiene lugar en la cámara de combustión. Esta expansión impulsa los pistones a lo largo del cilindro y mediante un sistema biela-manivela se obtiene energía mecánica de rotación.

En el motor a aire, en cambio, se han separado estos cuatro procesos en tres recintos distintos: dos cilindros y una cámara esférica. La fuerza propulsora se obtiene de la expansión del aire comprimido que se encuentra almacenado en tubos a una presión de 300 Kg/cm<sup>2</sup>. Esto no es un proceso directo, ya que previamente se debe reducir la presión antes mencionada a unos 20 Kg/cm<sup>2</sup>. El aire, en estas condiciones, es introducido en una cámara cerrada (el cilindro) e impulsa los pistones en su carrera motriz.

## 2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MDI

En la Fig. 1 se ve un esquema básico del funcionamiento del motor MDI.

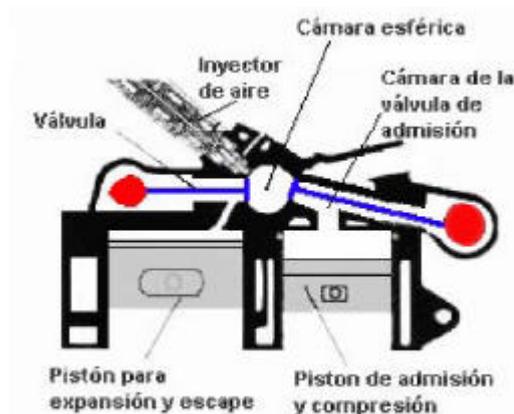
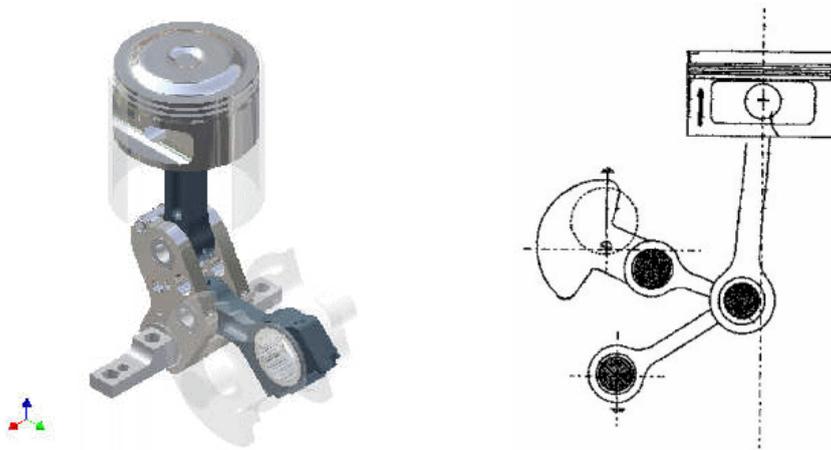


Figura 1 – Esquema básico de funcionamiento del motor de MDI

El aire del ambiente se introduce al cilindro de la derecha, el cual lo comprime a 20 bares y por tanto aumenta su temperatura a 400 °C. En estas condiciones se lo traslada a la cámara esférica donde se inyecta el aire a alta presión de los cilindros de aire comprimido. La mezcla de temperatura y presión del aire en la cámara empuja el pistón de la izquierda el cual produce el movimiento de rotación que precisa el vehículo.



Figuras 2 a y b – Sistema de biela articulada

Este proceso al final provoca la expansión del aire el cual se enfría; y así se expulsa por el tubo de escape. La física explica que la expansión del aire produce una disminución de temperatura. Tanto es así que la mezcla, una vez completada la fase de expansión, se encuentra a 185° bajo cero. Una parte de este aire se va a la atmósfera y sale por el escape todavía gélido. Otra parte vuelve al ciclo de compresión.

Un aspecto importante de este motor es que está dotado de un sistema de biela articulada Fig. 2 (a y b) que inmoviliza el pistón al final de la compresión durante el tiempo que el cigüeñal tarda en girar 70°, creando un volumen constante dentro del cilindro. Este periodo es el necesario para establecer las presiones en el cilindro y, según explican en MDI, también permite repartir mejor el par, con lo que el esfuerzo que aguanta el cigüeñal es menor que el de un esquema de trabajo clásico. Esta propiedad (otra invención y patente de MDI) es básica para que el régimen del motor sea el mayor posible.

En resumen, el motor de aire comprimido de MDI tiene tres fases: la compresión, la de inyección del aire comprimido y la de expansión. Desde finales del 2001 MDI se ha inclinado por un nuevo motor de aire comprimido conocido por CAT's serie 34 de características sorprendentes.

El aire que sale del tubo de escape es incluso más limpio que el que entró puesto que se filtra antes de su inyección con un filtro de carbón activo puesto que debe ser lo más puro posible al

entrar en la cámara de combustión. MDI asegura además que su vehículo produce una contaminación negativa puesto que filtra el aire urbano y lo expulsa totalmente puro además a una temperatura de entre  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o sea que contribuye a reducir el efecto invernadero. En definitiva: el aire del vehículo sale más limpio de lo que entró. Además, un vehículo dotado con este tipo de motor tiene garantizado un sistema de climatización sin necesidad de dispositivos adicionales ya que aprovecha el aire frío expulsado para la refrigeración y el calor en la punta del cilindro de  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  para calentar el circuito de calefacción. Como se dijo antes, el aire comprimido se almacena en cilindros. Para mejorar su capacidad y disminuir su peso han sido fabricados en liner termoplástico con envoltura en fibra de carbono.

Estos depósitos son los que se fabrican para llevar el gas en algunos autobuses y taxis. Los depósitos están preparados y homologados para llevar un producto explosivo como el gas. Por lo tanto, es evidente que sirven para aire comprimido, que no es inflamable, ni explosivo. En caso de accidente violento, con ruptura de los tubos, los mismos no explotarían, puesto que no son metálicos, sino que se rajarían, ya que son de fibra de vidrio. Se produciría una apertura alargada en la estructura del depósito, sin explosión, y el aire, sencillamente, se escaparía, produciendo un fuerte zumbido sin peligro.

### 3 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL MRV

#### 3.1 Componentes Principales

A continuación, en la Fig. 3 se detallan los componentes principales del MRV<sup>[2][3]</sup>:

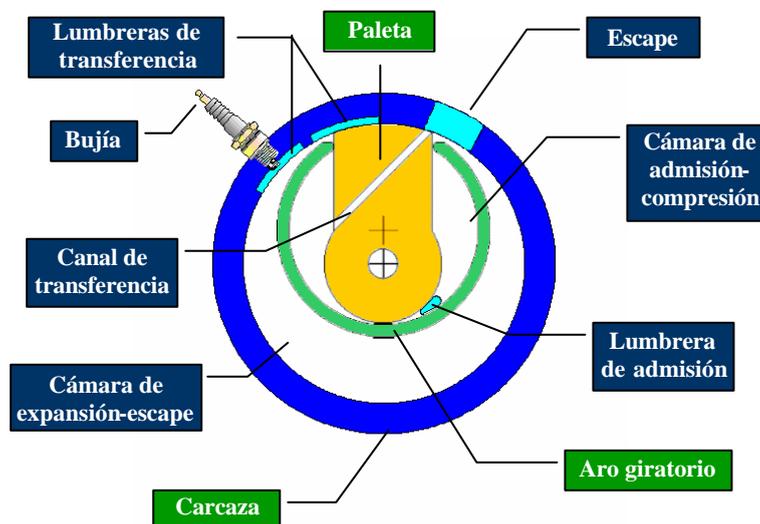


Figura 3 – Componentes principales

## 4 FUNCIONAMIENTO CON HIDROCARBUROS

### 4.1 Admisión

Observando la Fig. 4 se puede ver que al girar el rotor en sentido antihorario, la paleta solidaria al mismo, descubre volúmenes variables. Esto indica que es posible obtener diferencias de presiones capaces de renovar la carga de aire y combustible y así poder cumplir con el ciclo termodinámico.

La admisión se efectúa a través de lumbreras realizadas en las tapas laterales del motor. Las mismas, son descubiertas al pasar la cara posterior de la paleta en su giro y el volumen definido por la cara posterior y el aro giratorio va en aumento; por lo tanto las presiones bajan y se produce el ingreso de mezcla a una cierta velocidad que con el área de la lumbrera determina el caudal que llenará el volumen de admisión.

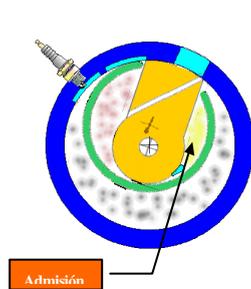


Fig. 4 – Admisión

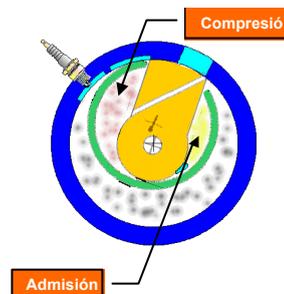


Fig. 5 - Admisión y compresión simultáneas

### 4.2 Procesos simultáneos de admisión y compresión

Observando la Fig. 5 se ve que con la cara anterior, la paleta comprime la carga admitida en el giro anterior. O sea que al mismo tiempo que se produce la admisión, se produce la compresión.



Fig. 6 - Proceso de transferencia

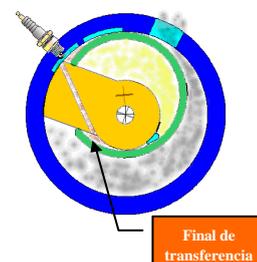


Fig. 7 - Fin de transferencia

Cuando en la cara anterior se llega a una cierta presión, dada por la relación de compresión, elegida de antemano, se abre la primera lumbrera de transferencia (Fig. 6) y la mezcla comprimida pasa a la cámara exterior. Una vez cerrada la segunda lumbrera de transferencia (Fig. 7), en la cara posterior de la paleta, se encenderá la mezcla (Fig. 8).

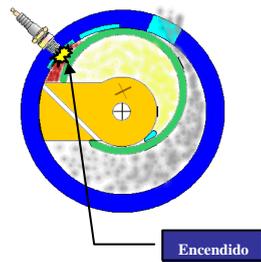


Fig. 8 - Encendido de la mezcla aire/combustible

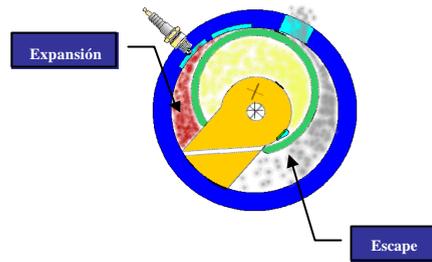


Fig. 9 - Expansión y escape simultáneos

#### 4.3 Procesos simultáneos de expansión y escape

Luego de la combustión, el crecimiento del volumen sobre la cara posterior de la paleta hace que la presión sobre dicha cara permanezca constante durante un cierto ángulo de giro, a partir del cual decrece mientras empuja a la paleta hasta la apertura de la lumbrera de escape que deja salir los gases al exterior. Al mismo tiempo la cara anterior desplaza los gases quemados de la combustión del último giro, hacia el exterior a través de la lumbrera de escape (Fig. 9). Como se puede apreciar la cara anterior y posterior de la paleta cumplen funciones diferentes en procesos simultáneos.

### 5 FUNCIONAMIENTO DEL MRV CON AIRE COMPRIMIDO

Este estudio se realiza para determinar si el MRV puede ser propulsado mediante aire comprimido. Hipotéticamente se suponen las siguientes condiciones:

- Se dispone de un depósito de aire comprimido a  $300 \text{ Kg/cm}^2$  sin ningún tipo de limitación
- El MRV no realiza la etapa de compresión que si realiza el MDI
- El MRV es propulsado por el aire comprimido inyectado en la cámara exterior
- La inyección del aire comprimido se realiza sin ningún tipo de pérdidas
- La inyección se realiza en forma regulada mediante un sistema de control que garantiza presión constante dentro de la cámara
- El valor de la presión regulada es de  $7 \text{ Kg/cm}^2$
- Se fija un régimen de funcionamiento de 2000 rpm
- No existe contrapresión de escape.

- Todos los procesos termodinámicos son ideales
- No se tienen en cuenta los valores de temperatura alcanzados durante la expansión

Además, para la determinación de algunos parámetros necesarios para el análisis del prototipo, se utiliza un simulador del MRV desarrollado para tal fin, sobre plataforma una Excel (Fig. 10) el cual permite establecer y trazar una geometría parametrizada de acuerdo con los datos geométricos principales (ancho de paleta, desarrollo axial, diámetros de aro, rotor y carcasa, etc), una vez ingresadas estas variables dimensionales, se fija una velocidad angular y crea una simulación de movimiento con animación de 360° de giro generando las curvas termodinámicas principales, en cada cámara, y las curvas de la cinemática y dinámica del mecanismo a ese número de revoluciones. El motor de cálculo del simulador se fundamenta en las ecuaciones del modelo matemático<sup>[4]</sup>

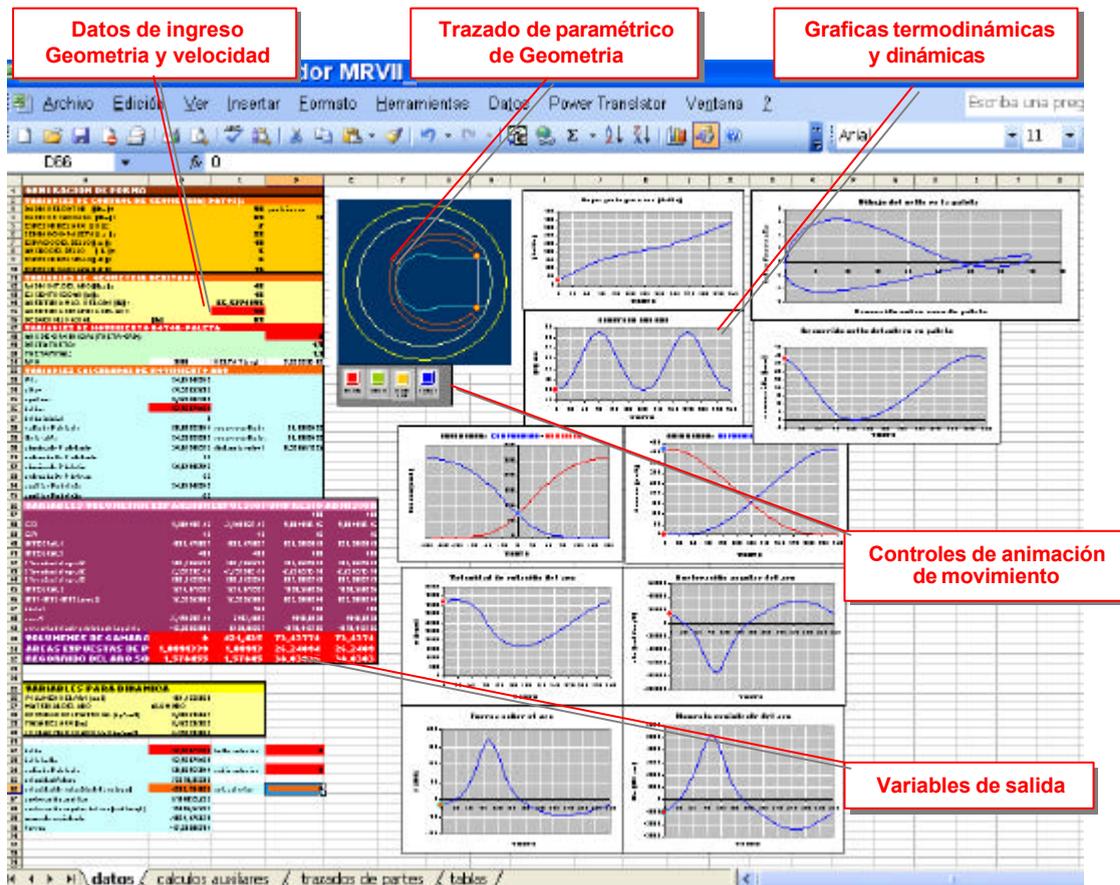


Fig. 10 – Pantalla principal del simulador

Aclarado esto, se continuará con la descripción de las modificaciones que deberán realizarse al MRV. En relación al esquema presentado en la Fig. 3 para el presente estudio se prescindirá de

- Bujía de encendido
- Lumbreira de transferencia
- Lumbreira de escape
- Lumbreira de admisión
- Canal de transferencia

Por otra parte, se colocarán puntos de inyección de aire comprimido y escape en la cámara exterior según se muestra en el gráfico siguiente (Fig. 11):

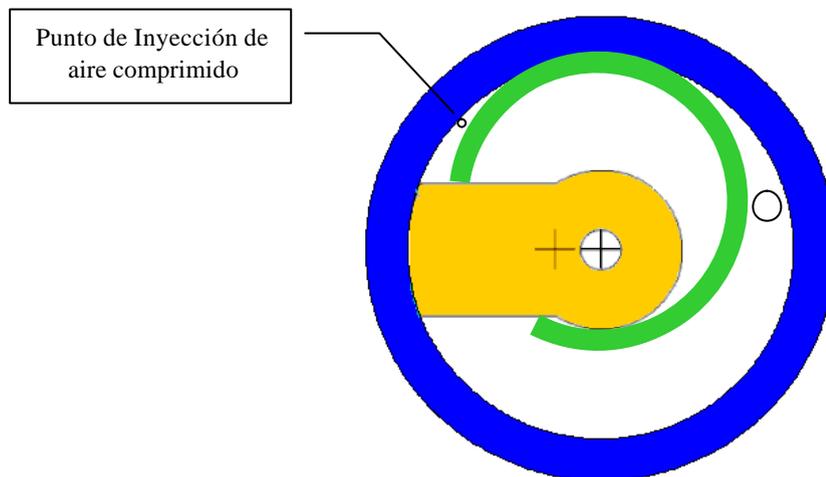
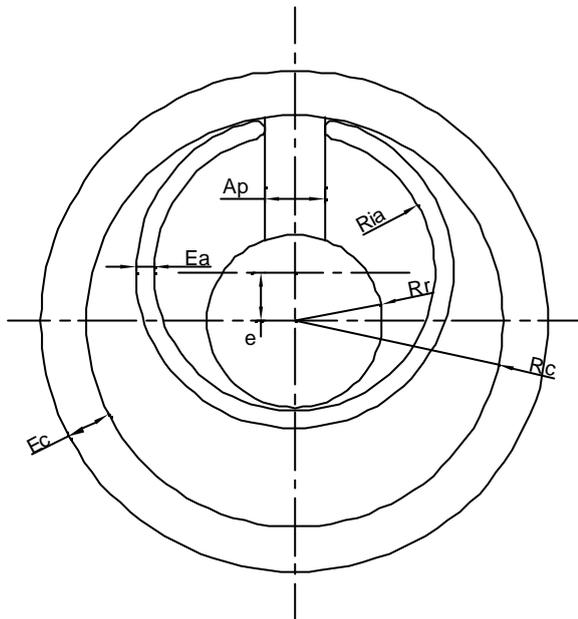


Fig. 11 – MRV modificado para funcionar con aire comprimido

Es necesario considerar que las cuatro cámaras generadas por esta disposición geométrica de las distintas partes del motor son fundamentales para poder utilizar al mismo como un convertidor de la energía contenida en el aire comprimido a energía mecánica disponible en un eje.

### 5.1 Características del prototipo a estudiar

El análisis del prototipo se realiza en base al esquema y dimensiones de la Fig. 12.



|                       |          |         |
|-----------------------|----------|---------|
| Ancho de la paleta    | $A_p$    | 20,0 mm |
| Radio int. del aro    | $R_{ia}$ | 46,5 mm |
| Espesor del aro       | $E_a$    | 6 mm    |
| Excentricidad         | $e$      | 16,5 mm |
| Eradio del rotor      | $R_r$    | 30 mm   |
| Radio de la carcaza   | $R_c$    | 69 mm   |
| Espesor de la carcaza | $E_c$    | 16 mm   |

Figura 12– Dibujo del prototipo y dimensiones

El desarrollo axial del prototipo analizado es de 69 mm.

## 5.2 Inyección de aire comprimido en la cámara exterior

La inyección se realizará a una presión de  $7 \text{ Kg/cm}^2$  y comenzará  $40^\circ$  después de que el centro de la paleta haya pasado por la posición del punto P (Fig. 13a) y se extenderá hasta que el centro de la paleta haya llegado a la posición  $P_1$   $180^\circ$  después de P (Fig. 13b). Finalizada la inyección, continuará la expansión del aire ingresado hasta que la cara posterior de la paleta alcance el punto P. La presión del aire actuará sobre la cara posterior de la paleta (línea roja) y producirá una fuerza que irá variando a medida que la paleta gire; esto se debe a que el área expuesta a la presión varía como consecuencia de la excentricidad que existe entre el rotor y el aro.

Gráficamente:

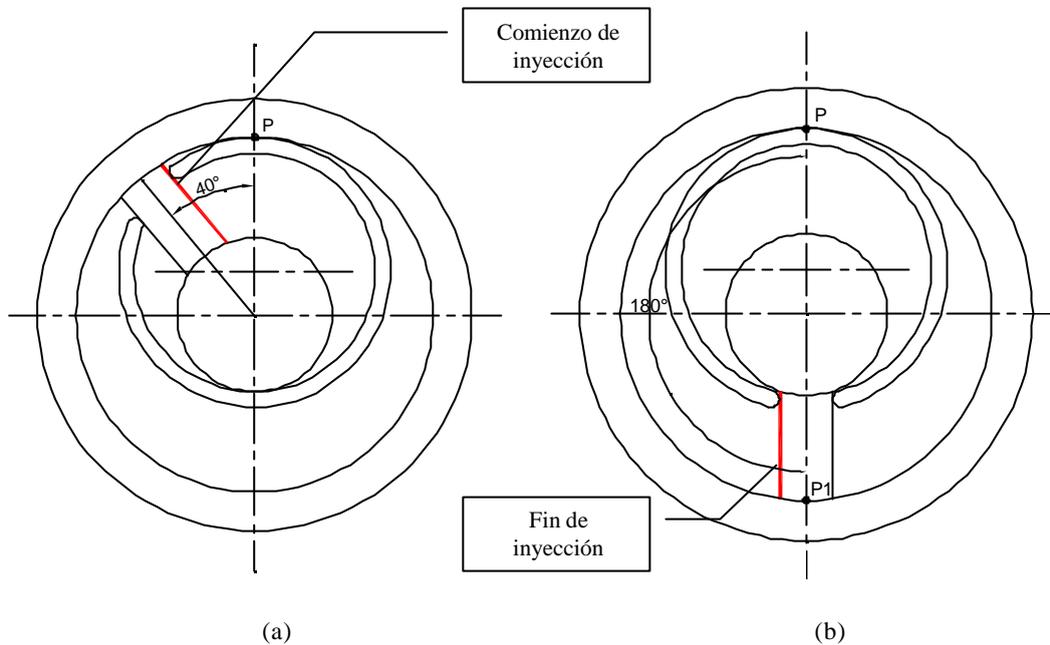


Figura 13 (a y b) – Intervalo de inyección de aire comprimido

### 5.3 Determinación de los valores característicos del motor

Para determinar los valores característicos<sup>[5]</sup>, se utiliza un simulador numérico del MRV desarrollado a tal fin y una planilla secundaria confeccionada en Excel que permite el cálculo de cada valor.

Para poder ingresar a esta planilla es necesario determinar los parámetros que se obtienen a continuación. Para ello se deberán considerar las hipotéticas planteadas anteriormente en la sección 5.

Las condiciones iniciales del aire comprimido son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 300 \text{ Kg/cm}^2 = 3000000 \text{ Kg/m}^2 \\
 T_1 &= 27 \text{ }^\circ\text{C} = 300 \text{ }^\circ\text{K} \\
 R_{\text{aire}} &= 29,27 \text{ Kg} * \text{m/Kg} * \text{ }^\circ\text{K} \\
 k &= 1,4
 \end{aligned}$$

Con esto se obtiene el volumen específico del aire comprimido en el depósito que vale:

$$v_1 = R * T_1 / p_1 = 29,27 * 300 / 3000000 = 0,0029 \text{ m}^3/\text{Kg} \quad (1)$$

Si se considera que la expansión del aire desde 300 Kg/cm<sup>2</sup> hasta la presión de trabajo de 7 Kg/cm<sup>2</sup> es adiabática, se debe cumplir que:

$$p_1 * v_1^k = p_2 * v_2^k \quad (2)$$

De donde, el volumen específico del aire al ingresar al motor vale :

$$v_2 = (p_1/p_2 * v_1^k)^{1/k} = (300/7 * 0,0029^k)^{1/k} = 0,0428 \text{ m}^3/\text{Kg} \quad (3)$$

Entonces, la densidad del aire a 7 Kg/cm<sup>2</sup> será:

$$d = 1/v^2 = 1/0,0428 \text{ m}^3/\text{Kg} = 0,0233 \text{ Kg/m}^3 \quad (4)$$

Por otra parte se sabe que el volumen específico es igual al cociente entre el volumen geométrico y la masa correspondiente; entonces:

$$v_2 = V_2/m_2 \quad (5)$$

Siendo V<sub>2</sub> el valor del volumen geométrico desarrollado en la cámara exterior durante el proceso de inyección y cuyo valor es de 194,46 cm<sup>3</sup> (dato obtenido con el simulador del MRV).

La masa de aire a 7 Kg/cm<sup>2</sup> ingresada al motor durante la inyección, para generar un ciclo, valdrá:

$$m_2 = V_2/v_2 = 194,46 \text{ cm}^3 / 42800 \text{ cm}^3/\text{Kg} = 0,0045 \text{ Kg} \quad (6)$$

Si ahora se fija un régimen de revoluciones n = 2000 rpm, se tendrá:

$$t_v \text{ (tiempo en segundos por revolución)} = 1/n * 60 = 1/2000 * 60 = 0,03 \text{ seg/rev} \quad (7)$$

Fijando un intervalo angular de análisis de 10 °, se tiene que el tiempo transcurrido cada 10 ° es:

$$t_{(10^\circ)} = t_v * 10^\circ/360^\circ = 0,00083 \text{ seg} \quad (8)$$

El último dato que se necesita para el análisis es el momento de inercia polar del aro; el mismo vale:

$$J_p = 1/2 * M * (R_i^2 + R_e^2) \quad (9)$$

Utilizando el simulador MRV, se determina que la masa y el momento de inercia polar del aro valen: M = 0,4 Kg y J<sub>p</sub> = 9,837 Kg \* cm<sup>2</sup>.

Todos los valores calculados, se ingresan en la planilla Excel en la cual se utilizó como variable independiente el ángulo de giro del centro de la paleta (condición impuesta por el simulador MRV) ya que todos los valores generados por el simulador están basados en esta condición.

En la planilla se calculan una gran cantidad de valores; de todos ellos, los que más interesan son:

- Área expuesta de la cara anterior de la paleta (simulador MRV)

- Volumen desarrollado en la cámara exterior (simulador MRV)
- Peso específico del aire
- Presión del aire
- Cupla motriz
- Aceleración angular del aro (simulador MRV)
- Cupla resistente del aro
- Cupla útil
- Potencia
- Caudal de aire consumido

De la planilla de Excel, surgen los siguientes valores y gráficos de las figuras 14, 15 y 16:

$G_m$  (caudal medio de aire consumido) = 41,1 gr de aire por segundo  
 $P_m$  (presión media) = 5,364 Kg/cm<sup>2</sup>  
 $C_{mm}$  (cupla motriz media) = 4,3 Kgm  
 $C_{rm}$  (cupla resistente media) = 0,024 Kgm  
 $C_{um}$  (cupla útil media) = 4,278 Kgm  
 $N_{um}$  (potencia útil media) = 11,94 CV ~ 12,00 CV

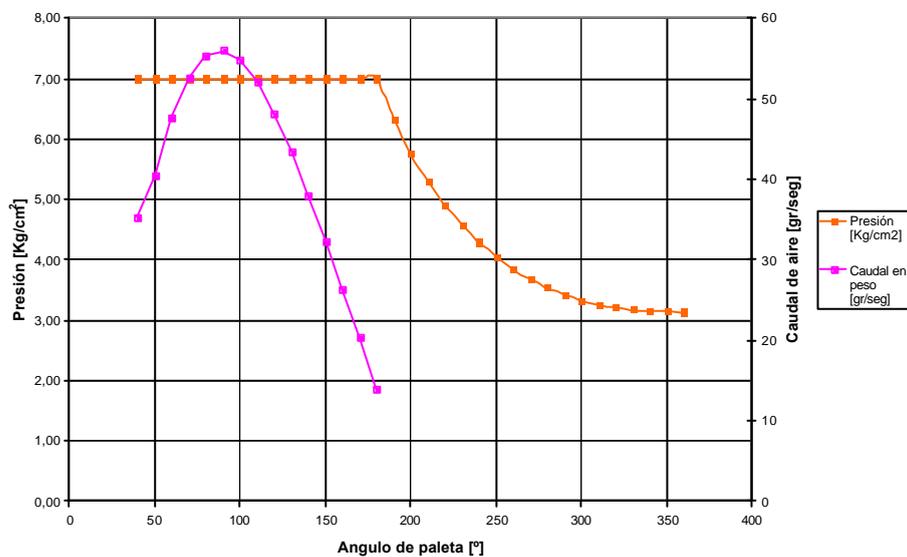


Figura 14 – Representación de la presión de inyección y el caudal másico de aire en función del ángulo girado por la paleta para un régimen de 2000 rpm

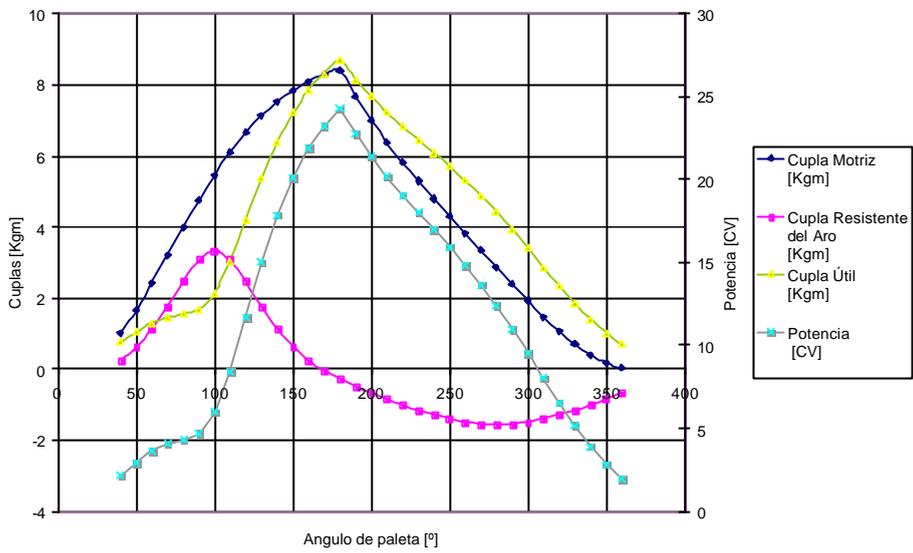


Figura 15 – Representación de las cuplas motriz, resistente, útil y potencia en función del ángulo girado por la paleta para un régimen de 2000 rpm

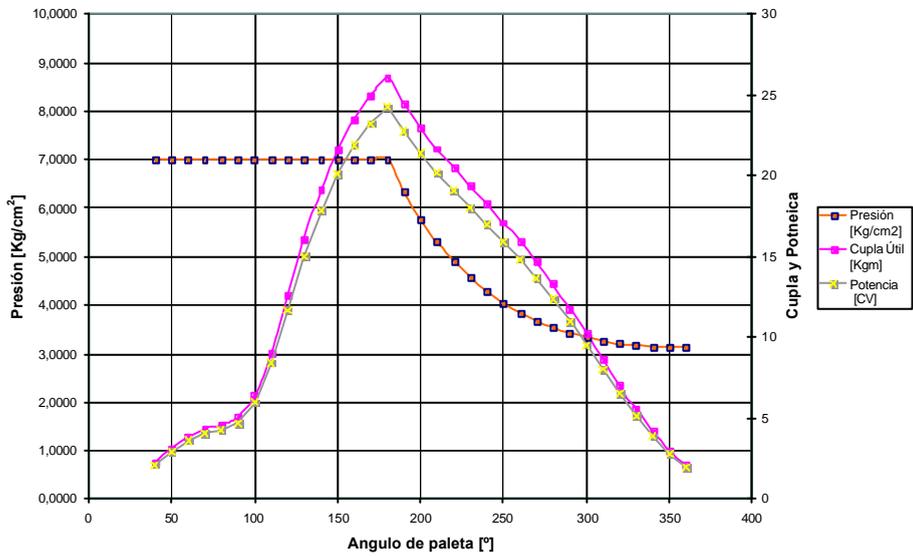


Figura 16 – Representación de la presión de inyección, cupla útil y potencia en función del ángulo girado por la paleta para un régimen de 2000 rpm

## 6 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En base a valores obtenidos se deduce:

Respecto a la potencia útil, es interesante notar que el valor de 12 CV no es despreciable para el prototipo de estudio teniendo en cuenta que los cálculos se han hecho en base a procesos de bajo rendimiento. Conociendo las características mecánicas de la unidad rotativa y si bien es cierto que en el análisis no se han contemplado las pérdidas por rozamiento, se considera que la introducción de las mismas no generará un impacto negativo de gran magnitud.

El gasto promedio de aire para las condiciones de análisis es de 41,1 gr de aire por segundo, cifra que alienta a profundizar el estudio de esta máquina accionada por aire comprimido. Para un régimen de 2000 rpm, una presión de accionamiento de 7 Kg/cm<sup>2</sup> y un tubo de alimentación de 1 m<sup>3</sup>, la duración en funcionamiento sería aproximadamente 8300 seg; algo así como 2,3 hs de autonomía. Cabe aclarar que estos resultados se desprenden de un prototipo meramente teórico y es de suponer que en caso de analizarse un modelo real, la autonomía se vería reducida.

El motor MDI con 90 Nm<sup>3</sup> de aire eroga una potencia de 1,43 CV durante 10 horas y 14,3 CV durante 1 hora. Estos 90 Nm<sup>3</sup> corresponden al volumen de aire tomado de la atmósfera que a 300 Kg/cm<sup>2</sup> ocupan aproximadamente a 1 m<sup>3</sup>. Teóricamente, para igual volumen y presión, el prototipo analizado del MRV podría erogar una potencia de 12 CV durante 2,3 horas.

Queda abierta la posibilidad de inyectar aire comprimido en la cámara interior; esto podría ser beneficioso ya que con el motor en régimen y en caso de no necesitar demasiada cupla se podría mantener al motor en funcionamiento inyectando un menor volumen de aire.

Si se establece como parámetro de referencia el motor MDI, se podría decir que el prototipo analizado trabajaría a un 50 % del rendimiento de un MDI de similar cilindrada. Este rendimiento podría mejorarse trabajando con mayores presiones, optimizando el proceso termodinámico y mejorando la configuración geométrica del prototipo analizado.

## 7 CONCLUSIONES

Por todo lo analizado, se puede decir que, teóricamente el MRV podría funcionar propulsado mediante aire comprimido. Esto justifica un estudio y un análisis pormenorizado de la situación, tendiente a dilucidar el verdadero alcance que podría tener esta posibilidad. Utilizando simulaciones de dinámica de gases mediante algún software comercial CFD y las ecuaciones de estado apropiadas podrían obtenerse resultados más próximos a la realidad.

Respecto de las aplicaciones de este tipo de motores se mencionan entre otras la posibilidad de utilizarlo como planta motriz de vehículos en general. Particularmente es interesante mencionar que este tipo de motor puede constituir un sistema idóneo para almacenar la energía generada por los sistemas no contaminantes como es la energía solar o la fuerza hidráulica. La energía sobrante de estos sistemas tiene un almacenamiento poco viable hasta ahora. El único sistema empleado es

el de baterías que almacenan la energía para devolverla cuando se necesita. Estos sistemas son pesados, onerosos y difíciles de mantener en buen estado; además son altamente contaminantes por el ácido sulfúrico de las baterías. En cambio, si se utilizando un dispositivo como el analizado, se tiene un sistema inmejorable para acumular la energía y cuando se requiera transformarla en electricidad. Con un motor de aire esta podría almacenarse en los cilindros de aire comprimido y a continuación con el motor de aire generar nuevamente electricidad cuando la fuente renovable no está disponible.

## **8 REFERENCIAS**

- [1] MDI Moteur Deve loppment International, <http://www.motordeaire.com>
- [2] MORÁN, VERDUR, AGUILERA, ROSSI, MERCURI, "Un Nuevo Motor Rotativo ", IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIDIM '99, 8º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica. Volumen III, Termofluidos. ISBN: 956-7069-41-7, 956-7069-44-1 (1999)
- [3] MORÁN, VERDUR, MERCURI, ROSSI, JAZNI, “Estudio Cinemático y Dinámico del Motor Rotativo Verdur”. Revista Ciencia e Ingeniería Vol. 23 N° 1. Facultad de Ingeniería – ULA – Mérida – Venezuela. (2002)
- [4] MORÁN, VERDUR, AGUILERA, MERCURI, ROSSI, “Modelo y Simulación del Motor Rotativo Verdur”, 9º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica - IV Congreso Nacional de Energía, COCIM-CONAE 2000, Valparaíso, CHILE (2000)
- [5] DANTE GIACOSA, "Motores Endotérmicos", ISBN 8428208484, Editorial OMEGA, Edición 1988.