

## OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA DE MOTORES DE DOS TIEMPOS USANDO ACÚSTICA

Guillermo O. Marclé<sup>a</sup>, Manuel Amor<sup>a</sup>, Leonardo R. Molisani<sup>a</sup> and Ricardo A. Burdiss<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Grupo de Acústica y Vibraciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36, Km 601, Río Cuarto, X5804BYA, Argentina, gmarcle@ing.unrc.edu.ar, <http://www.ing.unrc.edu.ar>*

<sup>b</sup> *Vibration and Acoustics Laboratories, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061-0238, USA, rburdiss@vt.edu, <http://www.val.me.vt.edu>*

**Palabras Clave:** motores de dos tiempos, curva de potencia, acústica.

**Resumen.** El objetivo principal de este trabajo de investigación es desarrollar herramientas de análisis y modelado de sistemas acústicos para mejorar las características operacionales de motores de dos tiempos. El fenómeno de propagación de las ondas de sonido en un conducto ha sido estudiado con mucho detenimiento. Una onda acústica que viaja por un conducto y en su trayecto encuentra que la sección transversal cambia, produce una onda reflejada cambiada de fase y viajando hacia la fuente de la cual proviene. Si la fuente de generación de las ondas acústicas es un motor de dos tiempos, podemos hacer que las performances del mismo cambien, si modificamos la ubicación y formas del conducto donde se propagan las mismas. Aunque el pico del pulso de escape se propagará a la velocidad supersónica, el reflejo de succión viajará a una velocidad subsónica y en promedio puede ser aproximada a la velocidad local del sonido. En un banco de ensayo inercial se han medido las potencias de motores con diferentes conductos, manteniendo constantes las condiciones de los experimentos. Estos prueban que solamente variando las formas del conducto las performances del motor cambian notoriamente. El estudio de las formas y la ubicación de las distintas partes que componen un sistema acústico y el fenómeno de propagación de las ondas de sonido hacen que el análisis de la relación motor-conducto acústico (escape) sean relevantes en la optimización de la performance del motor. En esta investigación relacionando los fenómenos de propagación de ondas acústicas en conductos de diferentes formas y las características del motor se predice el comportamiento global del mismo.

## 1 INTRODUCCION

El fenómeno de propagación de las ondas de sonido ha sido estudiado con mucho detenimiento. El siguiente trabajo consiste en generar ondas de sonido (presión acústica) a partir de una fuente. El pico de presión del pulso de escape se propagará a la velocidad supersónica, sin embargo el reflejo de succión viajará a una velocidad subsónica y en promedio puede ser aproximada a la velocidad local del sonido [1]. La onda de presión acústica al recorrer un conducto que en su longitud varía su sección transversal se encuentra con diferentes condiciones que posibilitan su reflexión [2, 3]. Para hacer un análisis detallado del fenómeno que ocurre con estas ondas, introduciremos dos conceptos de acústica: 1)- En un conducto una onda acústica se propaga a la velocidad del sonido. La velocidad de propagación depende de la temperatura del medio. 2)- Una onda que viaja por un conducto y en su trayecto encuentra que la sección transversal cambia, se refleja hacia la fuente de la cual proviene. Por ejemplo, si una fuente genera una onda de presión y esta en su viaje encuentra una tobera divergente, se refleja con signo cambiado, como onda de succión, hacia la fuente de emisión.

La velocidad del sonido depende de la temperatura del medio y está dada por la siguiente expresión [4]:

$$a = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad (1)$$

Donde:

$\gamma$ : Relación de los calores específicos para el aire.

$R$ : Constante del gas en este caso la del aire [J / Kg °K].

$T$ : Temperatura del medio en [°K].

Por ejemplo, si  $\gamma = 1.4$ ,  $R = 287 \text{ J / Kg } ^\circ\text{K}$ , y  $T = 725^\circ\text{K}$  la velocidad del sonido es dada por

$$a = \sqrt{1.4 \cdot 287 \cdot 725} = 540 \text{ m / seg}$$

### 1.1 Ondas de compresión

El objetivo de este apartado es hallar una expresión que estime la longitud recorrida por una onda de compresión y su reflejo a través de un conducto de sección que varía su forma. Esta expresión debe ser tal que permita cualificar el efecto de las ondas dentro de los diferentes conductos de la cámara de escape [5]. El proceso de propagación acústica debe estar sintonizado con la velocidad de rotación del motor.

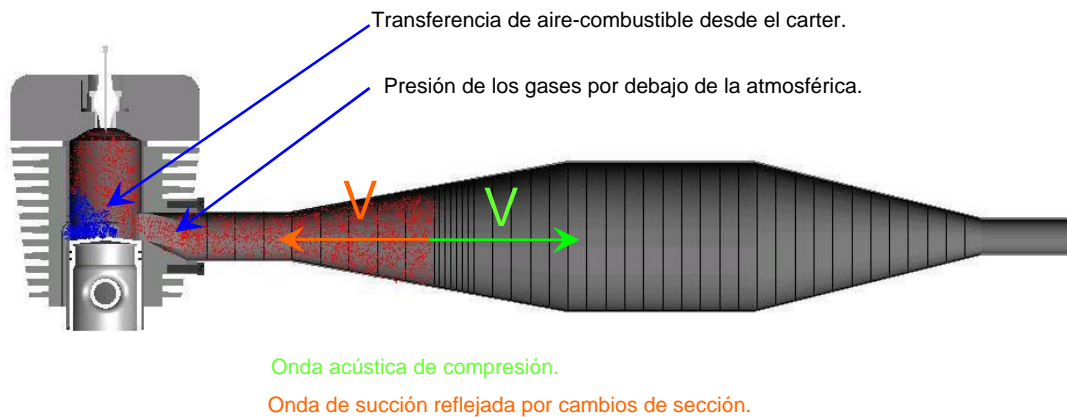
De esa forma cuando el pistón en su camino de expansión descubre la lumbrera de escape, provoca una perturbación en el conducto de salida. Los gases que salen del cilindro se encuentran a una presión por encima de la presión atmosférica, generando una perturbación que viaja en promedio a la velocidad sonido [1]. En este viaje la onda de compresión recorre el conducto perturbando al medio en su trayecto y sensando los cambios que se producen en la sección. Cuando la onda acústica llega a un cambio de sección, comienza el proceso de reflexión.

El tiempo que tarda el reflejo de la onda de compresión en llegar a la fuente de la cual proviene es la suma del tiempo que tarda la onda de compresión en llegar a un cambio de

sección más el tiempo en que tarda el reflejo en llegar a la fuente de la cual proviene, de esa forma

$$t = t_1 + t_2 \quad (2)$$

Donde  $t_1$  es el tiempo de la onda de compresión en llegar a un cambio de sección y  $t_2$  es el tiempo que la onda reflejada demora en llegar a la fuente. La Figura 1 muestra el fenómeno que ocurre durante el tiempo  $t$ .



**Figura 1: Corte transversal de un motor y su correspondiente cámara de escape**

Si  $a$  es la velocidad del sonido,  $L_e$  es la longitud recorrida por la onda acústica de compresión hasta llegar a un cambio de sección y  $L_r$  la longitud recorrida por la onda reflejada hasta llegar a la fuente, entonces  $t$  es dado por

$$t = \frac{L_e}{a} + \frac{L_r}{a} \quad (3)$$

Pero como,

$$L_e = L_r \quad (4)$$

La expresión (3) queda

$$t = \frac{L_e}{a} + \frac{L_e}{a} = \frac{2L_e}{a} \quad (5)$$

Si el motor gira a  $n$  revoluciones por minuto (rpm) y  $\alpha_e$  es el ángulo de giro del cigüeñal para posicionar el pistón después que descubrió la lumbrera de escape, el tiempo que tarda el pistón en recorrer un determinado ángulo es

$$t_m = \frac{\alpha_e}{\omega} = \frac{60 \cdot \alpha_e}{360 \cdot n} = \frac{\alpha_e}{6 \cdot n} \quad (6)$$

Igualando las expresiones (5) y (6), despejando  $L_e$ , es posible obtener

$$L_e = \frac{a \cdot \alpha_e}{12 \cdot n} \quad (7)$$

Para que la longitud quede expresada en mm,  $a$  debe estar expresada en m/seg,  $\alpha_e$  en

grados,  $n$  en rpm, para que la expresión final sea

$$L_e = \frac{1000.a.\alpha_e}{12.n} \quad (8)$$

Esta expresión sencilla permite ubicar las distintas partes que componen la cámara acústica. Como puede observarse la longitud  $L_e$  depende fundamentalmente del ángulo de giro y de la velocidad de rotación del cigüeñal. En la ecuación (8),  $\alpha_e$  es el recorrido angular del cigüeñal del motor desde que la lumbrera de escape abre, y todos los fenómenos que ocurren en el son de fundamental importancia para las performances esperadas en el motor.

## 1.2 Análisis acústico del diseño de una cámara de escape para distintas velocidades del motor

El objetivo de este apartado es mostrar como cambia la potencia, torque y la velocidad máxima del motor cuando una onda acústica viaja por las distintas partes de la cámara de escape a medida que el motor cambia su velocidad de rotación.

La hipótesis simplificativa que se considera es que la temperatura de los gases de escape, permanecerá constante a lo largo de todo el conducto, esto permite establecer que la velocidad de propagación del sonido a través del conducto permanecerá invariable [1].

Asumiendo que el motor cambia la velocidad de giro en forma constante los efectos de las ondas de compresión y succión aparecen en la lumbrera de escape en períodos angulares diferentes relativos a la posición de giro del cigüeñal. Las ondas reflejadas de succión y de compresión deben llegar a la lumbrera de escape en diferentes posiciones del pistón del motor. Lo óptimo esperado es que cuando el pistón descubre la lumbrera de escape genera una onda de compresión que viaja a través del conducto, cuando se encuentra con el difusor refleja una onda de succión. El conducto, frente de la lumbrera de escape, se encuentra a una presión que es superior a la atmosférica, con la llegada de la onda de succión comienza a disminuir la presión hasta llegar a un mínimo. La presión máxima de succión debe ubicarse cuando el pistón este en el Punto Muerto Inferior (PMI) y en el conducto la onda de compresión esté transitando la distancia que existe entre la lumbrera de escape y el centro del difusor [1,6,7]. La onda de succión contribuye junto a la lumbrera de transferencia a barrer los gases quemados producto del proceso de combustión.

La onda de compresión reflejada se genera cuando la onda generada por la fuente transita el contra cono. En ese instante de tiempo, frente a la lumbrera de escape la presión comienza a aumentar, hasta llegar a un máximo, impidiendo la salida de los gases frescos del cilindro. Un concepto básico, es que la salida de gases frescos que están dentro del cilindro deben ser mínimos o nulos para que sean aprovechados en el proceso de combustión [1]. Para que el concepto anterior se cumpla, de acuerdo a resultados experimentales realizados por los autores, la ubicación de la onda de compresión generada por la fuente tiene que estar transitando el centro del contra cono. En este instante se genera frente de la lumbrera de escape un pico de compresión necesario para frenar los gases frescos, y de esta forma mantenerlos dentro del cilindro. El fenómeno anterior es deseable que ocurra a una determinada velocidad de giro del motor en la cual se obtiene el torque máximo. Este estudio permitió obtener dos distancias importantes: la longitud desde la lumbrera de escape hasta el centro del difusor y hasta la longitud al centro del contra cono.

Si el motor fuera de tipo estacionario esta condición es la óptima [5]. Pero esta situación no es el caso en estudio. El motor al aumentar la velocidad de rotación realiza todo el proceso en menor tiempo, pero se asume que las ondas acústicas dentro del conducto de escape viajan

en promedio a la velocidad local del sonido [1]. Entonces los picos de las ondas de succión y de compresión reflejadas se presentan en la lumbrera de escape retrasados con respecto a la situación anterior. Para cada nuevo aumento de la velocidad de rotación del motor, el retraso de las ondas es cada vez mayor.

Las experiencias realizadas en un banco de ensayos inercial muestran que cuando el comienzo de la onda de compresión reflejada coincide con el cierre de la lumbrera de transferencia del motor, el mismo encuentra la potencia máxima. Determinamos en esta situación la distancia desde la lumbrera de escape hasta el comienzo del contra cono para esa velocidad de rotación del motor. Al aumentar la velocidad de rotación del motor la onda de compresión reflejada se retrasa relativa al cierre de la lumbrera de transferencia, llegando cada vez más tarde y más débil hasta anular su contribución.

De esa forma, el motor sigue aumentando la velocidad de rotación, donde la aceleración del volante de inercia del banco de ensayos es menor debido a lo anteriormente expresado. En frente de la lumbrera de escape existe solamente la onda de succión reflejada, que cada vez que aumenta la velocidad de rotación es más débil. Estas condiciones continúan hasta que los efectos de las ondas reflejadas se anulan totalmente y el motor deja de acelerar. De acuerdo a las experiencias desarrolladas en el banco de ensayos esta situación límite se da cuando la onda generada por la fuente recorre el final del difusor y el motor ha llegado a la velocidad de rotación máxima. Básicamente este procedimiento nos permite establecer donde se encuentran las ondas acústicas de compresión y de succión cuando el motor cambia su velocidad de giro.

Para ilustrar el procedimiento de diseño nos basaremos en un ensayo realizado en un motor Morini© de 50 cc con las características mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1: parámetros del motor Morini© de 50 cc.**

<i>Parámetro</i>	<i>Dimensiones</i>
Diámetro del pistón	42 mm
Carrera	38.8 mm
Angulo de apertura de la lumbrera de escape	83° después del PMS
Angulo de apertura de la transferencia	121° después del PMS
La admisión es por válvula de láminas	
Carburador	Dellorto 12 – 14 mm
Relación de compresión teórica	15.5 : 1
Relación de compresión real	8 : 1
Sistema de encendido	electrónico

Para transmitir energía mecánica el motor cuenta con un embrague centrífugo con tres zapatas. Estas zapatas están sostenidas con resortes tipo Bellville© a un centro de giro. El motor está acoplado a un banco de ensayo inercial para determinar cuales son las performances del mismo a diferentes velocidades de rotación [8,9]. Los parámetros experimentales que se obtienen son potencia, torque, tiempo y velocidad de giro del motor. La Figura 2 muestra las dimensiones de la cámara acústica para el cual fueron realizados los ensayos.

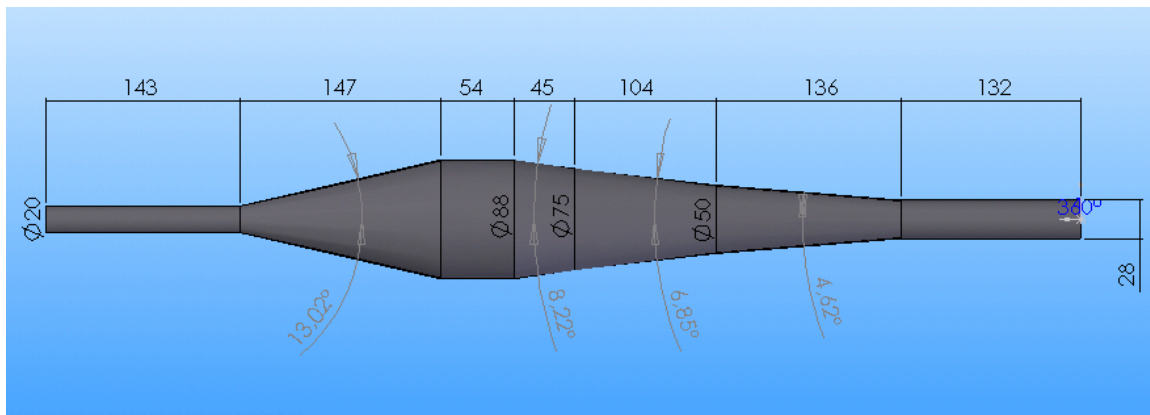


Figura 2: Dimensiones de la cámara de escape

Los resultados obtenidos en el banco de ensayos son mostrados en la Figura 3,

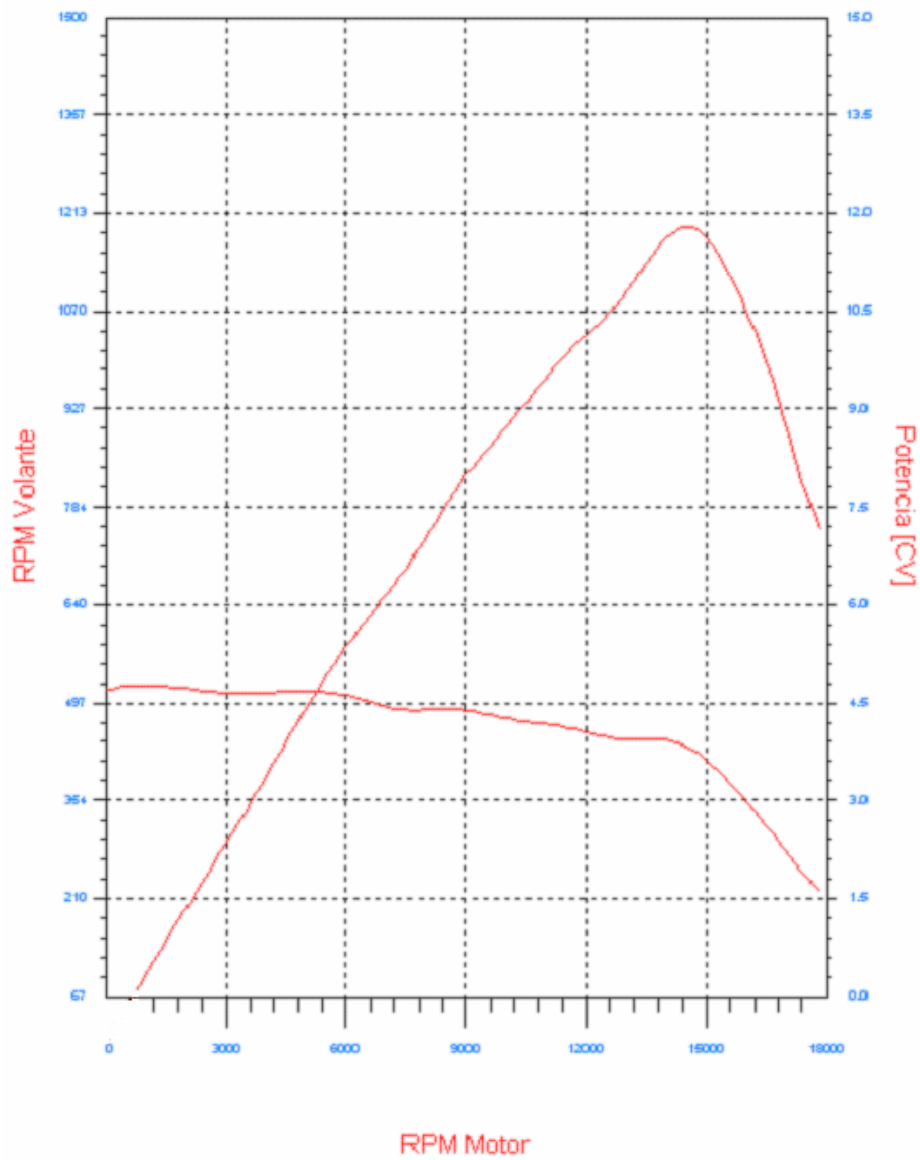
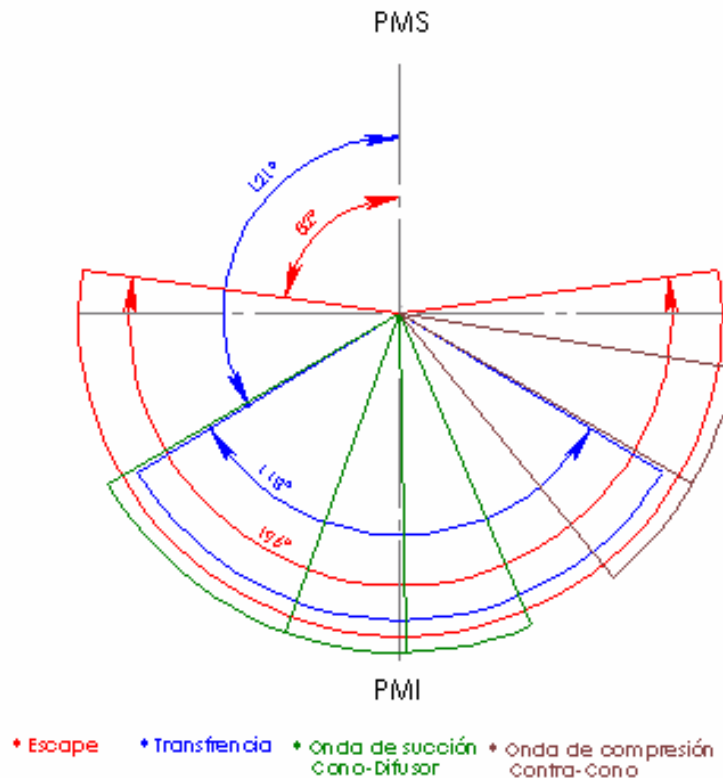


Figura 3: Torque y potencia obtenidas del banco de ensayos inercial.

A continuación se realiza un análisis de las dimensiones de la cámara acústica y de las performances obtenidas en función de la velocidad de giro del motor. Para ello nos basaremos en la Figura 4 donde muestra en un gráfico muy sencillo el período de apertura y cierre de la lumbrera de escape y de transferencia respectivamente. También la Figura 4 muestra la distribución de las ondas acústicas de compresión y de succión para la velocidad de diseño del motor que es la velocidad de rotación a torque máximo.



**Figura 4: Distribución de las aperturas, cierres de las lumbreras de escape, de transferencia y las correspondientes distribuciones de las ondas de succión y de compresión.**

La forma de obtener este gráfico es la siguiente:

- Graficar las aperturas y los cierres de las lumbreras (en grados) de escape y transferencia.
- Marcar el comienzo, el fin y el pico de la onda de succión como reflejo de la onda de compresión original generada por el motor. Para determinar los ángulos anteriores debemos despejar de la ecuación (8)

$$\alpha = \frac{12.n.L}{1000.a} \quad (9)$$

Un ejemplo nos ayudará a mostrar lo anteriormente expuesto. Asumiendo que la velocidad del sonido es igual a 540 m/seg y la velocidad de giro del motor donde el torque es máximo (n) es de 13000 rpm. La longitud desde la lumbrera de escape hasta el comienzo del difusor es de 268 mm, y el ángulo de giro del cigüeñal desde la apertura de la lumbrera de escape es

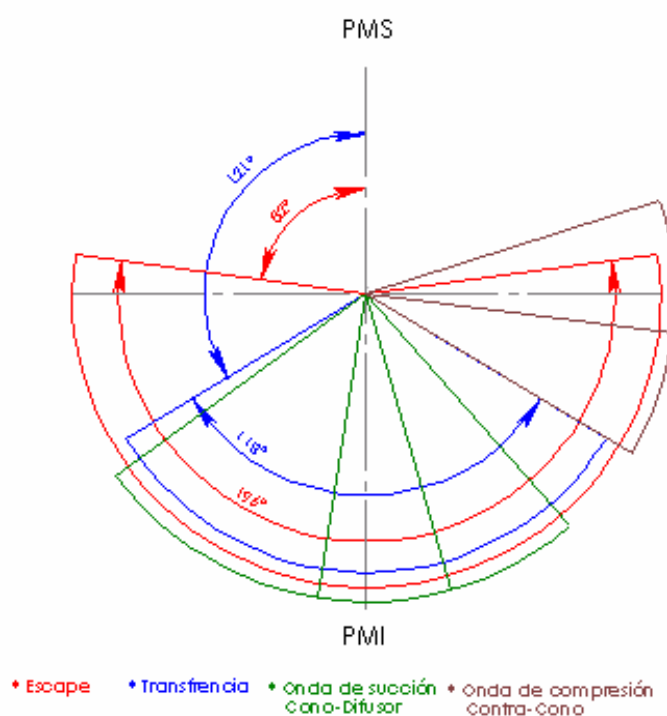
$$\alpha = \frac{12.n.L}{1000.a} = \frac{12.13000\text{rpm}.268\text{mm}}{1000.540\text{m/seg}} = 77.42^\circ \quad (10)$$

Procediendo de la misma forma encontramos los ángulos para el resto de las longitudes. Como puede observarse la onda de succión comienza cuando la onda generada por el escape (onda compresión) del motor transita el comienzo del difusor. El pico de la onda de succión

se corresponde con el punto muerto inferior del pistón y es la distancia que existe entre la lumbrera de escape y la mitad del difusor. Luego de recorrida esta distancia, la onda de succión termina al fin del difusor mostrada en la Figura 4.

Analizando de la misma manera se obtiene la distribución de la onda de compresión reflejada para esa velocidad de giro del motor. Observando con más detenimiento se puede establecer que el pico de la onda de compresión se encuentra cuando se produce el cierre de la lumbrera de transferencia, al igual que el pico de succión que se ubica en el punto muerto inferior.

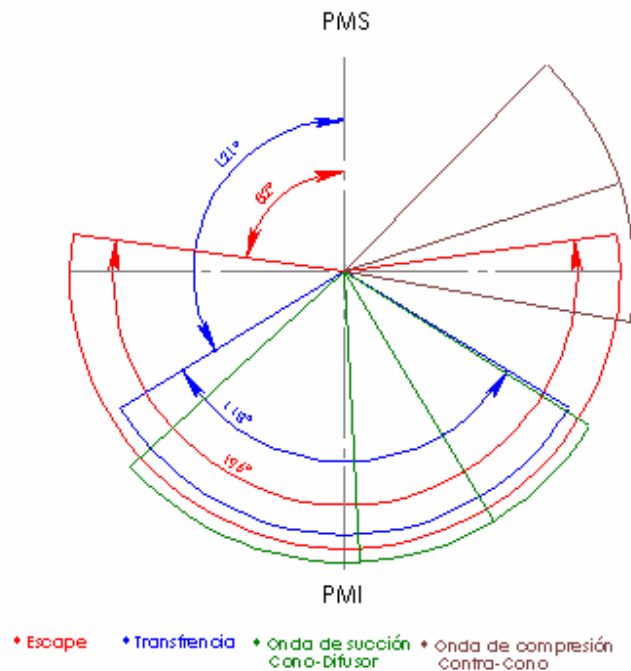
Hasta ahora solo se ha llevado a cabo el análisis para 13000 rpm. Pero si la velocidad de giro aumenta a 14400 rpm donde se obtiene la potencia máxima del motor, se llega a la situación en que las ondas tanto de succión como de compresión se retrasan con respecto al motor como se ilustra en la Figura 5.



**Figura 5: Distribución de las aperturas, cierres de las lumbreras de escape, de transferencia y las correspondientes distribuciones de las ondas de succión y de compresión**

A medida que las ondas se retrasan se observa que hay un instante en el tiempo para el cual el comienzo de la onda de compresión llega al cierre de la transferencia. Para este punto en particular, la onda de compresión llega demasiado tarde, no reteniendo los gases frescos dentro del cilindro. Esta situación hace que halla un cambio en la aceleración del motor, que corresponde a la potencia máxima del mismo, la cual es mostrada en la Figura 3. De esta manera, el motor sigue aumentando de velocidad angular y la onda acústica sigue atrasándose como se muestra en la Figura 6.





**Figura 6: Distribución de las aperturas, cierres de las lumbreras de escape, de transferencia y las correspondientes distribuciones de las ondas de succión y de compresión**

Otra situación ocurre cuando la distancia desde la lumbrera de escape hasta el fin del difusor coincide nuevamente con el cierre de la transferencia. En este caso se ha encontrado en los experimentos llevados a cabo en el banco inercial, que el motor desarrolla la máxima velocidad de rotación. En su momento la onda de compresión reflejada había dejado de tener efecto frente de la lumbrera de escape. Ahora la onda de succión llega a la lumbrera de escape en forma muy débil anulándose cualquier efecto de la cámara de escape sobre el motor.

## 2 MODELO ACÚSTICO DE UNA CAMARA DE ESCAPE

El modelo tiene como finalidad calcular la presión  $p$  en el interior de la cámara de escape. El problema acústico puede modelarse usando la ecuación de Helmholtz [10] considerando simetría axial

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_o} \nabla p + q \right) - \frac{k^2}{\rho_o} p = 0 \quad (11)$$

Donde  $\rho_o$  es la densidad del aire,  $q$  es una fuente tipo dipolo,  $k$  es el número de onda definido por

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (12)$$

En la cual  $\omega$  es la frecuencia angular y  $c$  es la velocidad del sonido. Las condiciones de borde en la pared fueron asumidas de tipo pared rígida

$$\left( -\frac{\nabla p}{\rho} \right) \cdot \vec{n} = 0 \quad (13)$$

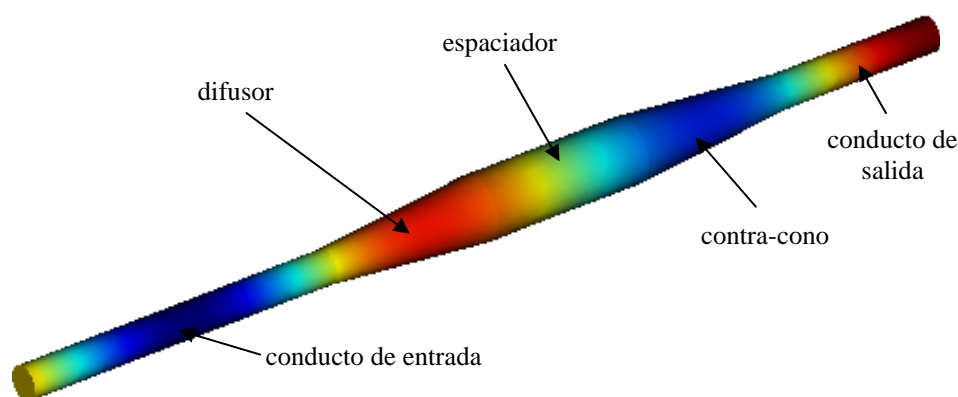
En la entrada del conducto la condición de borde es una combinación de ondas planas viajando en los dos sentidos.

$$\left( -\frac{\nabla p}{\rho} \right) \cdot \vec{n} = \frac{i\omega}{\rho c} p - \frac{2i\omega}{\rho c} p_o \quad (14)$$

En esta ecuación  $p_o$  corresponde a la presión externa aplicada e  $i$  es la unidad imaginaria. En el conducto de salida una onda plana viajando hacia fuera del conducto es fijada como

$$\left( -\frac{\nabla p}{\rho} \right) \cdot \vec{n} = \frac{i\omega}{\rho c} p \quad (15)$$

La distribución de presión acústica obtenida en el interior del conducto de escape puede ser observada en la Figura 7. La velocidad del motor corresponde a 14400 rpm a potencia máxima y el ángulo del cigüeñal es de 190°. La figura muestra la zona de succión cerca de la lumbrera de escape en el conducto de entrada, que colabora en la extracción de los productos de la combustión. En la sección cónica se haya una onda de compresión generada previamente en el contra cono que se continúa trasladando a la zona de la lumbrera evitando que la mezcla combustible sea expulsada del cilindro.



**Figura 7: distribución de presión acústica en el interior del conducto de escape a 14400 RPM (azul succión y rojo compresión).**

En el diseño de los conductos de escape un parámetro importante es la atenuación de energía acústica  $E$ , en función de la frecuencia

$$E = 10 \text{Log}_{10} \left( \frac{w_{sal}}{w_{ent}} \right) \quad (16)$$

donde  $w_{sal}$  y  $w_{ent}$  son la energía acústica en la salida y en la entrada de la cámara de escape respectivamente. La energía acústica es calculada a través de las siguientes relaciones

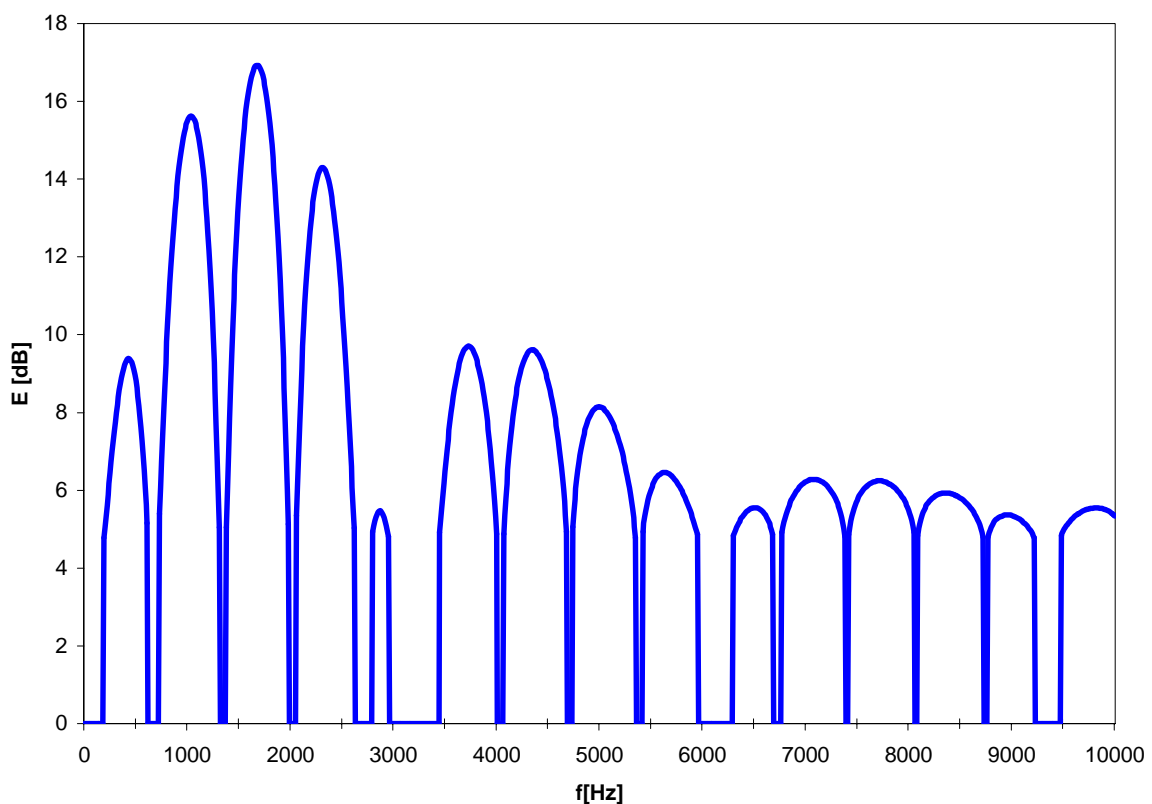
integrales,

$$w_{sal} = \int_{A_{sal}} \frac{|p|^2}{2\rho c} dA \quad (17)$$

y

$$w_{ent} = \int_{A_{ent}} \frac{|p_o|^2}{2\rho c} dA \quad (18)$$

Donde  $A_{sal}$  y  $A_{ent}$  corresponden al área de la sección de los extremos del conducto de escape.



**Figura 8: Atenuación acústica del cámara de escape en dB como función de la frecuencia.**

La Figura 8 muestra la atenuación acústica debido a la presencia de la cámara de escape en función de la frecuencia. El resultado de este estudio paramétrico revela que la mayor disipación de energía acústica se produce a baja frecuencia, con excepción de cortes abruptos que corresponden a frecuencias de resonancia de los distintas partes componentes de la cámara de escape.

### 3 CONCLUSIÓN

A medida que en un motor de dos tiempos aumenta su velocidad de rotación las ondas acústicas de compresión y de succión reflejadas dentro del conducto de escape se retrasan con respecto al ángulo de apertura de sus lumbreras. El estudio de este retraso de las ondas acústicas permite predecir cómo las distintas performances del motor son afectadas.

Haciendo un análisis dinámico del fenómeno de propagación de ondas acústicas es posible hallar las dimensiones óptimas de la cámara de escape de un motor de dos tiempos para sus diferentes condiciones operacionales.

## REFERENCIAS

- [1] G. P. Blair, *Design and Simulation of Two Strokes Engines*, SAE International, ISBN 1-56091-685-0, 1996.
- [2] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, and J. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-84789-5, 2000.
- [3] Robert D. Finch, *Introduction to Acoustics*, Prentice Hall, ISBN 0-02-337570-1
- [4] Frank Fahy, *Sound and structural Vibration*, Academic Press, ISBN 0-12-247671-9
- [5] R. Magallanes y R. Toselli, *Teoría de Motores*, Comando de Personal, Fuerza Aérea Argentina, 1980
- [6] G. P. Blair, M. B. Johnston, *Simplified Design Criteria for Expansion Chambers for Two-Cycle Gasoline Engines*, SAE Paper No. 700123, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1970
- [7] A. Graham Bell, *Two Stroke Performance Tuning, Second Edition*, Motorbooks Intl, ISBN 1859606199, 1999.
- [8] R. J. Kee and G. P. Blair. *Acceleration Test Method For A High Performance Two-Stroke Racing Engine*. SAE Conference Proceedings P, 1994.
- [9] P. Harrison. *Motorcycle Dynamometer*, Final Year Project, B.A. in Computer Science, 2004.
- [10] Morse, P. and Ingard, U., *Theoretical Acoustics*, Princeton, New Jersey, ISBN: 0691024014, 1987.