

**NOTA TECNICA**  
**DETERMINACION DEL PUNTO DE OPERACION Y DE LA CURVA**  
**CARACTERISTICA DE UN VENTILADOR EN FUNCIONAMIENTO**

**WILLIAM CASTRO M.**

Departamento de Recursos Minerales, Facultad de Minas  
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

**RESUMEN**

En esta nota técnica se propone una metodología de trabajo para la determinación de la curva característica de un ventilador principal durante su funcionamiento en la mina. El procedimiento se basa en la ubicación de una sección en la cual las mediciones sean representativas del comportamiento aerodinámico del ventilador; para lograr lo anterior se analizan detenidamente los gradientes de carga tanto en las minas ventiladas por inyección como en las ventiladas por succión, que es el caso de las minas de carbón por aspectos reglamentarios. Se describen las instalaciones y las pequeñas adecuaciones requeridas para efectuar las mediciones, la instrumentación, el método de trabajo para nuestras pequeñas minas y la interpretación de los resultados luego de una campaña de mediciones a nivel de un ventilador.

## **1. INTRODUCCION**

El ventilador es el principal elemento en una red de ventilación, y el conocimiento de su punto de operación y de sus curvas características es fundamental para poder realizar el planeamiento adecuado de una explotación subterránea. Se estima que en una mina medianamente mecanizada más del 50% del consumo de energía eléctrica se efectúa en operaciones de ventilación; en la factura periódica una buena proporción está representada por los costos de funcionamiento de los ventiladores principales y de los ventiladores auxiliares, de aquí se hace evidente la necesidad de una operación racional de estos elementos, y lo más racional es conocer como están funcionando, qué posibilidades tienen, como están siendo solicitados y como podrían responder si se cambiaran estas solicitudes.

El conocimiento del comportamiento aerodinámico de un ventilador no se logra conociendo la potencia nominal del motor que lo acciona, porque aunque el motor funcionara permanentemente a esta potencia, caso irreal, a cada valor de potencia podrían corresponder muchísimas parejas caudal-carga, quedando indeterminada la situación. El punto de funcionamiento hay que determinarlo por medición directa, la misma que las curvas características en caso de que sean desconocidas.

El método de trabajo propuesto se refiere exclusivamente a los ventiladores helicoidales, ya que son los más utilizados en las minas subterráneas, pero los principios generales son válidos y las curvas características tienen la misma forma cualquiera que sea el tipo de ventilador.

## **2. GRADIENTES DE CARGA**

Los gradientes de carga muestran la variación, en el sentido de la circulación del aire en la mina, de la carga total  $H_t$  y de las componentes de ésta, carga dinámica  $H_d$  y carga estática  $H_s$ .

Antes de continuar con el análisis de los gradientes es conveniente aclarar que en una mina se consume toda la carga estática que sea suministrada por una fuente de carga aeromotriz. En ningún momento puede haber déficit ni superávit de carga estática porque si el suministro de carga aumenta la mina responde consumiendo más al incrementarse los caudales de aire que circulan en ella; en el caso contrario, ante una disminución de la carga estática suministrada, la mina responde disminuyendo el consumo al reducirse los caudales de aire que circulan.

En lo que se refiere a la carga dinámica  $H_d$ , puede decirse que esta forma de energía mecánica no se disipa a menos que se convierta en carga estática cuando la velocidad de la corriente de aire se reduzca.

### **2.1 Ventilación por inyección**

Una mina se ventila por inyección cuando el ventilador está ubicado en la entrada de aire. Todos los puntos de la mina se encuentran a sobreprotección con respecto a la atmósfera.

Considerando valores relativos para todas las componentes de la carga total, se pueden establecer los siguientes gradientes sobre un sistema esquematizado mina-ventilador. Figura 1.



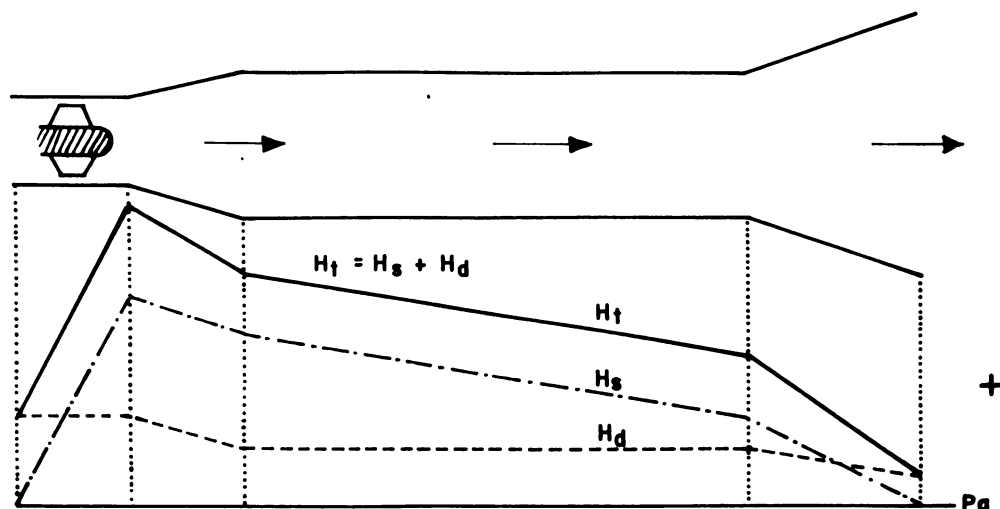


FIGURA 1. Gradientes de carga en una mina a inyección.

La carga dinámica  $H_d$  siempre es positiva y permanece constante mientras la sección de las galerías no cambie; en el retorno, lo mismo que en la divergencia de conexión entre el ventilador y la mina la carga dinámica disminuye al convertirse parcialmente en estática debido a que en ambos casos se tienen expansiones de la sección de flujo.

A la entrada de aire la carga estática es igual a cero lo mismo que a la salida. A través del ventilador sufre un salto de presión equivalente al suministro de éste y a lo largo de toda la mina va disminuyendo al disiparse por frotamiento.

Teniendo en cuenta que la carga total  $H_t$  es igual a la suma de la carga dinámica  $H_d$  más la carga estática  $H_s$ , podemos decir que a la entrada de la mina y a la salida, la carga total es igual a la dinámica en cada una de esas secciones puesto que ya se había dicho que ellas la carga estática es igual a cero.

A lo largo de la mina la carga total disminuye al disiparse la carga estática por fricción y esto asegura el sentido de la circulación de aire entre la entrada y el retorno. Hay que tener muy presente que la carga total siempre debe disminuir en el sentido de la circulación del aire porque éste siempre se mueve de una zona de mayor potencial a un zona de menor potencial.

Analizando los gradientes anteriores, podemos concluir que

la sección en la cual se deben hacer las mediciones de caudal total y carga total para que éstas sean representativas del comportamiento aerodinámico del ventilador se debe ubicar exactamente a la salida de éste, en la dirección del flujo de aire. En esta sección el caudal medido es igual al caudal que mueve el ventilador y la carga total medida es igual a la carga total suministrada por éste a la corriente de aire.

## 2.2 Ventilación por succión

Una mina se ventila por succión cuando el ventilador está ubicado en el retorno de aire. Todos los puntos de la mina se encuentran a depresión con respecto a la atmósfera.

Considerando valores relativos con respecto a la presión atmosférica para las componentes de la carga total, se pueden establecer los siguientes gradientes de carga sobre un sistema esquematizado mina-ventilador, como se muestra en la figura 2.

La carga dinámica siempre es positiva y permanece constante a lo largo de la mina mientras la sección no cambie; sufre un incremento en la convergencia mediante la cual se conecta el ventilador a la mina; es constante a través del ventilador cilíndrico circular; y disminuye, convirtiéndose parcialmente en carga estática, a lo largo del evasor conectado al ventilador.

A la entrada de aire y a la salida la carga estática es nula.



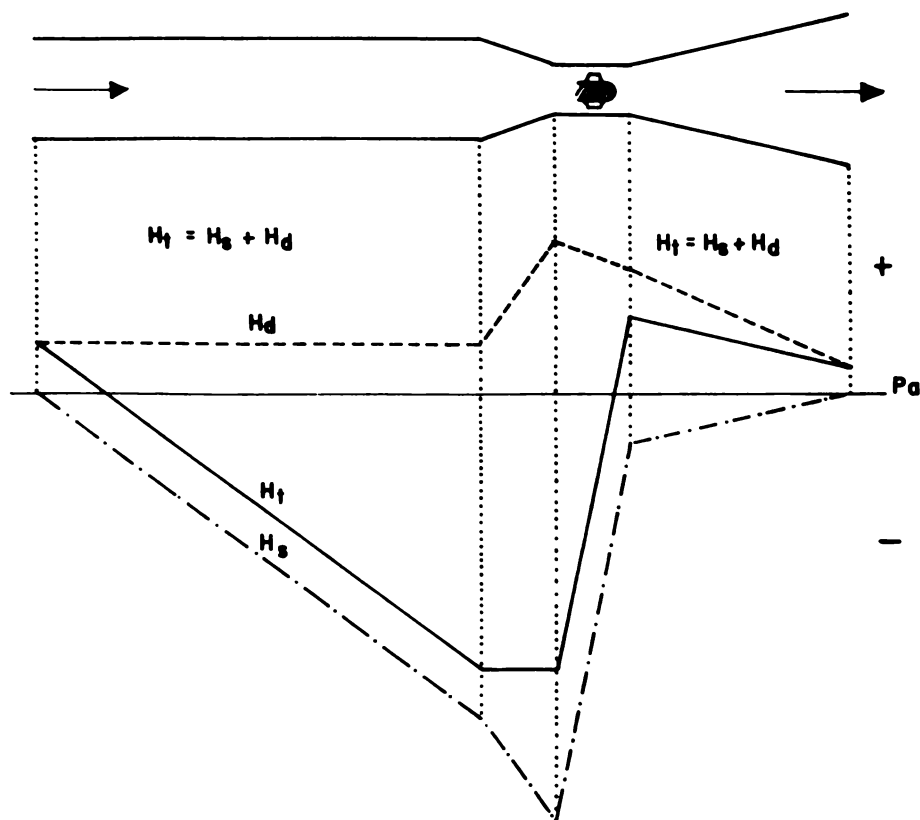


Figura 2. Gradientes de carga en una mina a succión

Disminuye a lo largo de la mina al disiparse por frotamiento de la corriente de aire contra las paredes de las galerías, se incrementa su pérdida a través de la convergencia, sufre un salto de presión a través del ventilador, equivalente a la carga estática suministrada por éste, y finalmente aumenta desde un valor negativo hasta cero a la salida del evasor.

A la entrada y a la salida del aire la carga total es igual a la carga dinámica en la sección correspondiente. A lo largo de la mina la carga total disminuye asegurando la circulación del aire. Se ha podido establecer experimentalmente que a lo largo de la convergencia la disminución de la carga total es despreciable.  $H_t$  sufre un salto a través del ventilador y luego empieza a disminuir hasta el valor de la carga dinámica a la salida del evasor. En cualquier sección de la mina se verifica fácilmente que la carga total es igual a la suma algebraica de los valores de carga estática y carga dinámica. El análisis de gradientes anteriores nos permite concluir que la medición del caudal movido por el ventilador puede hacerse, en el

sentido del flujo, antes del ventilador en la convergencia o después del ventilador sobre el evasor de salida.

En lo que se refiere a la medición de la carga total, ésta solo puede hacerse antes del ventilador para que represente el valor de  $H_t$  suministrado por éste a la corriente de ventilación.

### 3. MEDICIONES SOBRE EL VENTILADOR

Como se especificó anteriormente, en una mina ventilada por inyección las mediciones de caudal y carga deben hacerse después del ventilador, en el sentido del desplazamiento del aire; y en una mina ventilada por succión las mediciones de caudal se pueden hacer antes o después del ventilador mientras que las mediciones de carga total se deben hacer necesariamente antes del ventilador.

#### 3.1 Medidas de caudal y carga en una convergencia

En la Figura 3 se muestra una convergencia que puede



servir como sistema de conexión mina-ventilador. Como se dijo antes, experimentalmente se ha determinado que la carga total permanece sensiblemente constante en la convergencia de la Figura 3. En las siguientes expresiones  $S$  representa la sección,  $Q$  el caudal de aire,  $v$  la velocidad de la corriente,  $\rho$  la masa específica del aire y  $g$  la aceleración de la gravedad.

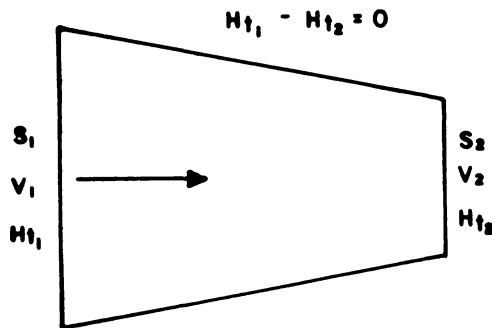


Figura 3. Estrechamiento gradual

$$H_{t1} - H_{t2} = (H_{s1} - H_{s2}) + (H_{d1} - H_{d2}) = 0$$

$$\Delta H_s = H_{d2} - H_{d1}$$

con

$$V_1 = \frac{Q}{S_1}, \quad V_2 = \frac{Q}{S_2}$$

$$\Delta H_s = \frac{\rho}{2g} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho}{2g} Q^2 \left( \frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right)$$

Esta expresión se puede representar como:

$$Q = a \sqrt{\Delta H_s}$$

donde

$$a = \sqrt{\frac{2g}{\rho \left( \frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right)}}$$

y con ella se puede calcular fácilmente el caudal porque  $\Delta H_s$  se puede medir abriendo pequeños agujeros a nivel de las secciones  $S_1$  y  $S_2$  e interconectándolos con mangueras a un manómetro donde se lea directamente el valor  $\Delta H_s$ ; se pueden también medir independientemente  $H_{s1}$  y  $H_{s2}$ . Además,

$$H_{d1} = \frac{\rho V_1^2}{2g} \quad \text{y} \quad H_{d2} = \frac{\rho V_2^2}{2g} \quad [mm]$$

Por lo tanto:

$$H_{T1} = H_{T2} = H_T = H_{s1} + H_{d1} = H_{s2} + H_{d2}$$

### 3.2 Medida de caudales y carga en una divergencia

En la Figura 4 se muestra una divergencia que puede servir como sistema de conexión ventilador-mina o como sistema recuperador de carga estática en forma de evasor.

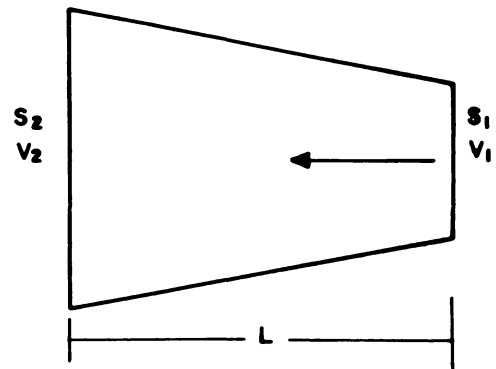


Figura 4. Expansión gradual

En este caso se cumple también que  $Q = a(\Delta H_s)^{1/2}$  pero en  $a$  se debe considerar además de la resistencia singular ocasionada por el cambio de sección, una resistencia regular  $R$  que ocasiona pérdida de carga por frotamiento a lo largo de la divergencia:

$$R = \frac{1.5 L (\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2}) (S_1 + S_2)}{4 S_1^2 S_2^2}$$

Esta es la resistencia en murgues de un tronco de cono como el de la Figura 4. En este caso,

$$a = \frac{1}{\sqrt{R + \frac{\rho}{2g} \left( \frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2} \right)}}$$

lo cual permite calcular fácilmente el caudal porque  $\Delta H_s$  se puede medir como se indicó en el caso anterior.

En este caso  $H_{t1}$  y  $H_{t2}$  son un poco diferentes y se pueden calcular de igual manera que en el caso precedente. Se debe tomar como carga total del ventilador el valor medido en la ubicación más próxima a éste.



#### 4. CURVA CARACTERISTICA DEL VENTILADOR

Para poder trazar la curva característica se requieren como mínimo tres puntos de funcionamiento ubicados sobre ella.

En la Figura 5 se muestra la instalación típica de un ventilador principal en una mina de carbón a succión. Manipulando las puertas A Y B convenientemente se pueden lograr los tres puntos deseados para trazar la curva característica del ventilador.

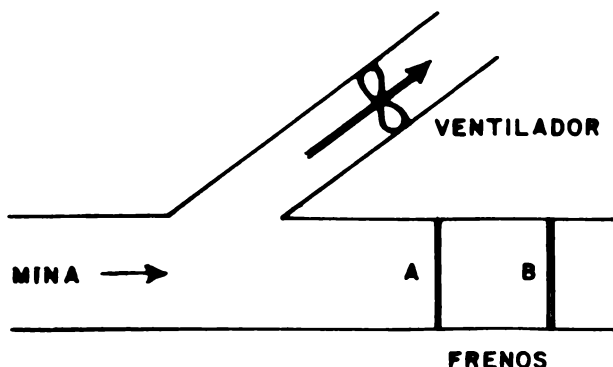


Figura 5. Instalación típica de un ventilador principal

Con las dos puertas cerradas se determina un punto de funcionamiento, con una puerta cerrada se determina el segundo y con las dos puertas abiertas se logra el tercer punto.

Hay que advertir que una vez medidas las secciones  $S_1$  y  $S_2$  con el ventilador detenido, las mediciones de  $\Delta H_f$  en cada caso se deben hacer suficientemente rápido para no perturbar la ventilación en la mina durante un período largo que puede comprometer la seguridad.

En la Figura 6 se muestra un conjunto de curvas características típicas para un ventilador helicoidal idealizado.

#### 5. CONCLUSIONES

No sobra resaltar de nuevo la importancia que tiene el conocimiento de las curvas características de un ventilador que funciona en una mina en operación. Este conocimiento preciso permite el planeamiento de la ventilación de la mina a corto, mediano y largo plazo; su desconocimiento convierte cualquier cambio requerido en la estructura de la red en un tanteo costoso, no siempre evidente, y que puede llegar a comprometer la seguridad de la instalación si las solicitudes que se le imponen al ventilador sobrepasan

su capacidad y pueden llevarlo a funcionar, por ejemplo, en situación de bombeo. Aunque esto no ocurra, las tentativas por reubicar un ventilador cuando no se puede prever su comportamiento, son operaciones arriesgadas, en muchos casos condenadas al fracaso.

El método propuesto para determinar el punto de funcionamiento del ventilador y su curva de operación es de rápida ejecución, requiere una adecuación mínima de la instalación, los instrumentos necesarios son de muy fácil fabricación, la realización de las mediciones es simple y la interpretación de los resultados es elemental para una persona con mínimos conocimientos sobre ventilación de minas.

Una vez conocidas las características de cada instalación, se puede adecuar fácilmente un sistema de mediciones que permita hacer un registro continuo del caudal y de la carga total movidos por el ventilador; esto permitiría consultar en cualquier momento acerca de las características aerodinámicas del propio ventilador y de su interrelación con la mina donde está ubicado.



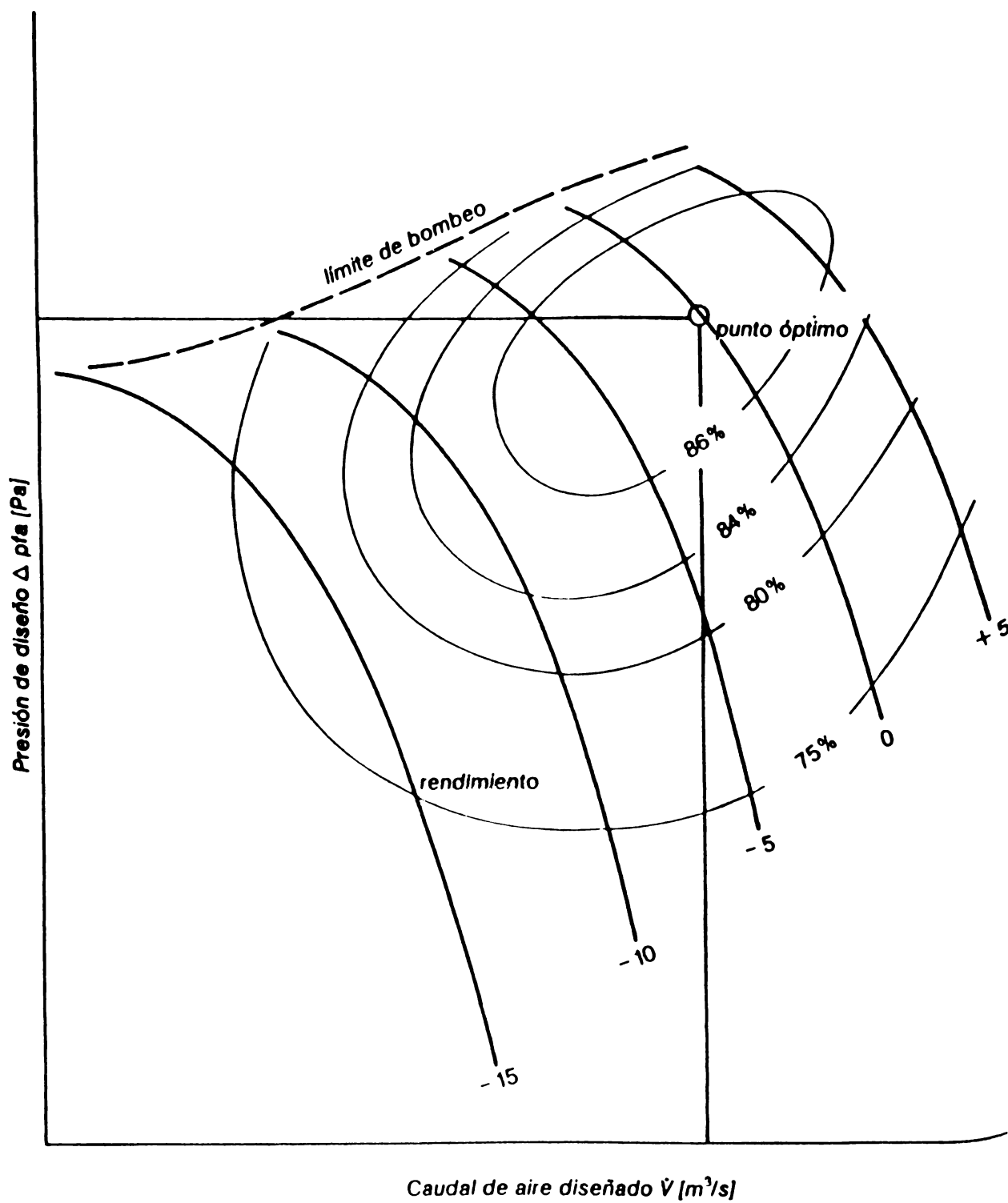


Figura 6. Curvas características típicas de un ventilador helicoidal