

OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE TÚNELES Y EXCAVACIONES DE GRAN LONGITUD

D. I. Naupari E.
Airtec S.A.

J. A. Oviedo H.
Airtec S.A.

RESUMEN: Los sistemas de ventilación para la construcción de túneles y excavaciones de gran longitud representan un desafío desde el punto de vista de la ventilación ya que se deben vencer grandes resistencias e introducir aire en el frente a fin de tener un adecuado ambiente de trabajo. Muchas veces se suele sobredimensionar el tamaño de los equipos incurriéndose en sobrecostos iniciales así como operativos. El objetivo de este estudio es el de mostrar un método de cálculo que relaciona las fugas y el consumo de potencia de los ventiladores a fin de hallar la disposición óptima de equipos y lograr así un equilibrio entre el costo inversión inicial dado por el número de equipos y el costo operativo generado por el consumo de potencia de los mismos. Se verá que a cierto número de equipos tendremos el punto de inflexión en la curva de costo total de ventilación, es decir el costo total mínimo que permite garantizar el caudal requerido en el frente y que es técnicamente factible de ejecutar.

ABSTRACT: The ventilation systems of tunnels and excavations of great length are a challenge for the ventilation because they must overcome high resistances and transport air into the front to take a proper working environment. Often the size of equipment is overestimated incurred in excessive initial and operating cost. The objective of this study is to show a method of calculation that relates the leakage of air in the ducts and the power consumption of the fans in order to find the optimal disposition of equipment and thus achieve balance between the initial investment cost by the number of fans and the operating cost generated by the power consumption of the fans. With some number of fans the curve of cost is the low for ensures the required flow at the front of working and is technically feasible to implement.

1 CONSIDERACIONES INICIALES DEL MÉTODO

La caída de presión (P) debido a la fricción en una manga circular para un cierto tramo de longitud (L) puede ser calculado mediante la ecuación de Atkinson:

$$P = \frac{KOLQ^2}{A^3} \quad Pa$$

Donde K es el factor de fricción empírico en Kg/m³, O es el perímetro de la manga en m, L es la longitud de la manga en m, Q es el caudal en m³/s y A es el área de la sección transversal de la manga en m.

Si consideramos un elemento diferencial de manga de longitud Δx podemos obtener el diferencial de presión ΔP igual a:

$$\Delta P = \frac{4^3 K Q^2}{D^5 \pi^2} \Delta x$$

(2)

Es importante recordar que los efectos de la compresibilidad del aire serán significativos si el ventilador ejerce una presión mayor a 5 KPa (20 "H₂O), Dado que los cálculos consideraran equipos con presiones iguales o menores a dicho valor se asumirá el aire como fluido incomprensible.

La cantidad de aire fugado a través de una manga depende en gran medida de la diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la manga a lo largo de la misma.

(3)

$$P(x) = P_{dentro}(x) - P_{fuera}(x)$$

La velocidad del aire que escapa a través de un agujero, V , puede ser calculada usando la formula:

$$V = \sqrt{\frac{P}{\frac{\rho}{2}(1 + K_0)}} \quad m/s \quad (4)$$

Donde K_0 es el coeficiente de pérdida de un punto de fuga.

Para un determinado tramo de manga Δx , el flujo másico de aire será:

$$\Delta m = (\pi D \Delta x) A_s \sqrt{2\rho P} \quad kg/s \quad (5)$$

Donde:

$$A_s = \frac{A_R}{\sqrt{1 + K_0}}$$

Representa el Área Específica de fugas en m^2/m^2 y A_R representa el Área Relativa de fugas (m^2 por m^2 de área superficial de manga)

Por lo tanto la variación del caudal estará dada por la ecuación:

$$\Delta Q = A_s \pi D \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \Delta x \quad (7)$$

2 PORCENTAJE DE FUGAS

Las fugas por lo general se expresan en un tanto por ciento por cada 100m de manga, este porcentaje nos relaciona el caudal de ingreso del ventilador con el caudal en la descarga de la manga.

$$\% / 100m = \frac{Q_i - Q_s}{Q_i L} 10^4 \% \quad (8)$$

Donde Q_i es el caudal en ingreso del ventilador, Q_s es el caudal en la descarga de la manga y L es la longitud de la manga en metros.

En el siguiente grafico 1 podemos ver el **% de fugas por cada 100m de manga**, eje vertical, para diámetros desde 18" (curva superior) hasta 60" (curva inferior), el eje horizontal del gráfico muestra la distancia en metros desde 100m hasta 1000m

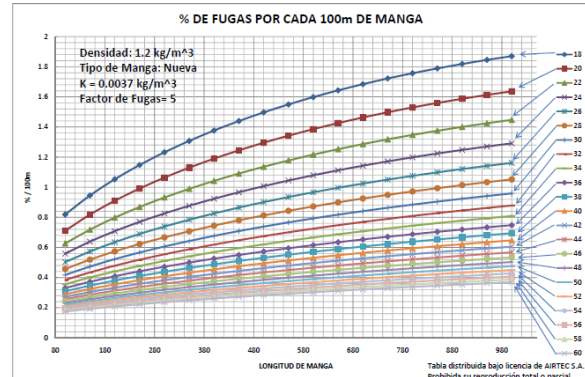


Grafico1: % de Fugas / 100 m de manga.

Como podemos observar la manga de 18" posee un mayor % de fugas que mangas de mayores dimensiones debido a que trabajara con mayores presiones (Producto de su mayor caída de presión por unidad de longitud). Mangas de mayores dimensiones como por ejemplo de 60" tendrán un % de fugas relativamente bajo ya que trabajaran con menores presiones aun cuando se tengan las mismas velocidades de aire dentro de la manga. .

En ambos casos notamos que el % de fugas aumenta con la longitud esto quiere decir que si por ejemplo escogiésemos una manga de 18" y colocásemos un solo tramo de ventilación de 1000m tendríamos que estimar las fugas con un factor de 1.88% / 100m mientras que si fuesen dos tramos de ventilación de 500m cada uno (Instalados en serie) se tendrá que para cada tramo el factor de estimación de las fugas será de 1.5% / 100m, si el caudal requerido en el frente es de $4.72m^3/s$ con la primera opción sería necesario ingresar $5.81m^3/s$ mientras que con la segunda opción solo sería necesario ingresar $5.52m^3/s$.

El ejemplo anterior aunque es simplemente ilustrativo nos muestra la oportunidad de mejorar y optimizar el sistema de ventilación ya que al aumentar el número de tramos tendremos una reducción del caudal y por ende una reducción del consumo de energía pero

al mismo tiempo tendremos un incremento en la infraestructura necesaria para dicho sistema de ventilación por un lado se presenta la reducción de los costos operativos pero por otro lado el incremento de los costos fijos o de inversión.

3 COSTOS FIJOS Y VARIABLES

Los costos operativos o variables en los que se incurre para realizar la ventilación de un túnel de gran longitud son generados principalmente debido al consumo de energía de los ventiladores. El consumo de energía de cada ventilador es calculado mediante la fórmula:

$$Potencia_{VENT.} = \frac{PQ}{1000 Ef} \quad KW \quad (9)$$

Donde P es la Presión Total del ventilador en Pa , Q es el caudal entregado por el ventilador en m^3/s y Ef_v es la Eficiencia Total del Ventilador.

El consumo total de energía dependerá del tiempo de ejecución de la obra, el número de ventiladores trabajando y el cronograma de avances (La cantidad de ventiladores operando se incrementará a medida que avance la obra), como sabemos el costo de la energía se expresa en $\$/KW - Hr$. Dado que los ventiladores se incrementarán conforme se vaya ejecutando la obra y si consideramos una velocidad de avance constante podemos considerar la inversión Total en Energía en toda la duración de la obra como sigue:

$$\begin{aligned} & \$_{ENERGÍA\ TOTAL} \\ & = (\#Vent.) (Pot_{VENT.}) \left(\frac{\$}{KW - Hr} \right) (Tiempo)(0.55) \quad \$ \end{aligned} \quad (10)$$

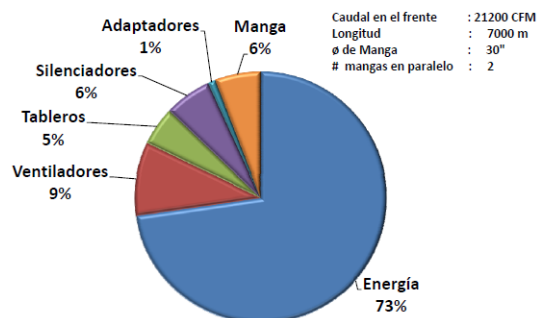
Donde el Tiempo de ejecución de la obra estará dado en horas, Asimismo se ha considerado un factor de 0.55 que estima un promedio de utilización de los equipos según el cronograma de avance...

Los costos fijos viene dados por la infraestructura necesaria para el sistema de ventilación estos costos fijos son principalmente:

- Ventiladores
- Tableros
- Silenciadores
- Adaptadores a manga
- Manga de ventilación

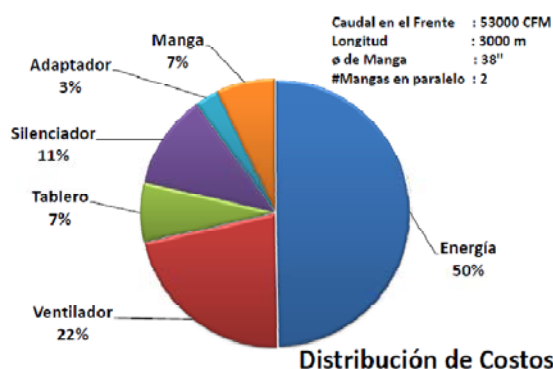
- Otros (cables para energía, cables de acero, etc.)

La distribución de costos puede ser muy variada dependiendo de la longitud del túnel a excavar y el número de tramos seleccionado, en los gráficos 2 y 3 podemos ver la distribución de costos promedio para un túnel de 7000m con 14 tramos y 3000m con 7 tramos respectivamente.



Distribución de Costos

Gráfico 2: Distribución de Costos de sistema de ventilación de túnel de 7000m con 14 tramos.



Distribución de Costos

Gráfico 3: Distribución de Costos de sistema de ventilación de túnel de 3000m con 7 tramos.

4 RESULTADOS

Finalmente luego de realizar una evaluación de costos en un proyecto de ventilación para diferentes números de tramos podemos evaluar cada uno de ellos escogiendo el más conveniente para el sistema de ventilación (El de menor costo total, menor número de equipos y factibilidad técnica de los mismos).

Como podemos ver en el gráfico 4 existe un punto para un determinado número de tramos donde el "Costo Total" se hace mínimo, también puede haber puntos cercanos al anterior (Con menor número de tramos) donde la diferencia de costos totales frente al mínimo puede considerarse insignificante que hace que estos

puntos pueden ser considerados como la solución más adecuada por la menor cantidad de equipos que usara.

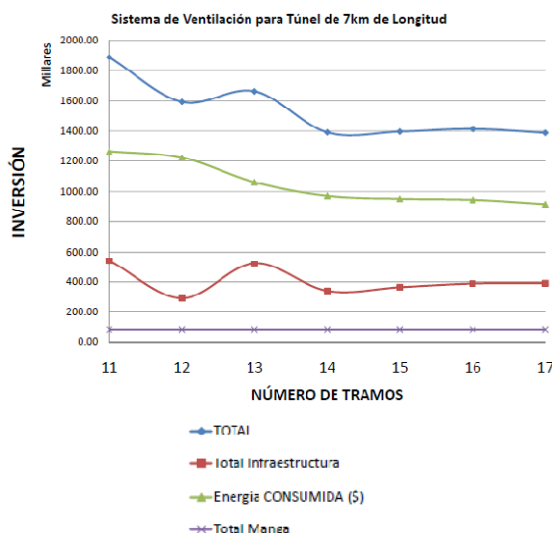


Gráfico 4: Distribución de costos para sistema de ventilación de túnel de 7000m.

5 CONCLUSIONES

La variable dominante en la optimización de un sistema de ventilación de un túnel de gran longitud es el consumo de energía este a su vez depende del caudal, del diámetro de la manga, el porcentaje de fugas y del tiempo de ejecución de la obra. El caudal en el frente por lo general depende de la cantidad de equipos diesel y personas en el frente de trabajo y rara vez podría ser modificado, el diámetro de la manga deberá ser el mayor posible para reducir al máximo el consumo de energía o en todo caso evaluar la posibilidad de hacer el uso de líneas en paralelo, Asimismo es muy importante considerar las fugas ya que el no incluir las mismas hará que el sistema de ventilación sea deficiente con las problemas y consecuencias que ello generara (Tiempo de dilución excesivo, aire contaminado, temperaturas elevadas, baja productividad, etc.).

La optimización económica del sistema de ventilación deberá considerar el adecuado cálculo de los parámetros de ventilación, sobre todo el caudal. Al no considerar las fugas tendríamos menores costos de ventilación sin embargo no se lograra generar condiciones adecuadas de trabajo en el frente.

6 REFERENCIAS

Hartman H. L., Mutmansky J. M., Ramani R. V., Wang Y. J., 1997 Mine Ventilation and Air Conditioning, 3rd Ed. Wiley-Interscience.

Anisdahl L. M., B. Johansson & K. Thoen, Study on the performance of ventiflex ducting and coupling, 12th U.S. /North American Mine Ventilation Symposium 2008.

J. Partyka & O. Johnson, Airflow in leaking ducts with multiple fans, Mine Ventilation, Ganguli & Bandopadhyay.

F. Calizaya & Pierre Mousset-Jones, Estimation of Leakage Quantity for Long Auxiliar Ventilation Systems, Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress - May 17-22, 1997.

AIRTEC S.A, Curvas Características de Ventiladores Axiales Mineros, 2005.