



## Perfeccionamiento del sistema de ventilación del túnel Levisa-Mayarí del trasvase Este-Oeste \*

**Melinda Rondón Rosales**

Especialidad: Ingeniería en Minas

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** Se propuso el perfeccionamiento del sistema de ventilación del túnel Levisa-Mayarí para lograr condiciones higiénico-sanitarias adecuadas. Se definieron los factores que intervienen en la ventilación y se calcularon los parámetros del sistema de ventilación del túnel Levisa-Mayarí, estableciéndose el caudal requerido por personas y equipo diésel en el túnel, así como las resistencias y cantidad de aire necesaria para ventilar, según la cantidad de sustancia explosiva que se utilice. Se determina la demanda de aire para la ventilación que garantiza la formación de una atmósfera saludable.

**Palabras clave:** trasvase; sistema de ventilación; ventilación de túneles.

---

\* Trabajo tutorado por el Dr. Roberto Watson Quesada.  
Recibido: 2 diciembre 2015 / Aceptado: 30 agosto 2016.

## Upgrades to the Levisa-Mayarí tunnel venting system in the East-West transfer pipeline

**Abstract:** An upgrade to the Levisa-Mayarí tunnel venting system was proposed to ensure that adequate hygienic and sanitary requirements are met. The factors required to achieve proper ventilation were defined and the parameters for the ventilation system of the Levisa-Mayarí tunnel were calculated. The calculations include the volumes required per capita and per diesel equipment inside the tunnel as well as the resistance and the amount of air required for venting according to the quantities of explosive substances to be used. The air requirement for venting was estimated in order to create a healthy atmosphere.

**Key words:** Pipeline; venting system; tunnel venting system.

## Introducción

El túnel Levisa-Mayarí, perteneciente al trasvase Este-Oeste, se construye a partir de la necesidad de transportar agua desde los ríos que nacen en el macizo montañoso de Nipe-Sagua-Baracoa hacia las fértiles llanuras del norte de Holguín y Las Tunas y el noreste de Camagüey y el norte y centro del Valle del Cauto.

La ventilación en minas y túneles constituye una operación fundamental cuya función es la de renovar el aire, diluir los gases contaminantes y polvo así como controlar los humos en caso de incendio. Esta operación asegura unas condiciones ambientales no peligrosas para la circulación (respiración y visibilidad) y en caso de incendio garantiza las condiciones de evacuación y de intervención de los equipos de emergencia (Bulchakov, 2011).

Con base en el volumen de los gases nocivos emitidos se adecua el volumen de aire limpio y fresco necesarios. Existen diferencias entre la ventilación en fase de construcción y de explotación, pues en la primera se emiten más contaminantes, principalmente en la zona del frente de avance, estando además allí los operarios durante toda la jornada de trabajo. Otra diferencia importante en la ventilación durante la construcción de un túnel es que solo tiene una entrada, por lo que la ventilación debe conseguirse asegurando la circulación desde la entrada hasta el frente de avance (Abramov, 2007; Bitkolov, 2008).

El caudal necesario, para satisfacer las necesidades del personal y de los equipos que en conjunto laboran al interior de la mina, se establecen de acuerdo a los requerimientos legales, normas de confort y eficiencia del trabajo (Andrade, 2008).

Para efectuar una ventilación adecuada se debe atender a: a) determinar la función a realizar (el calor a disipar, los tóxicos a diluir, los sólidos a transportar, etc.), b) calcular la cantidad de aire necesaria, c) establecer el trayecto de circulación del aire (Soler & Palau, 2015).

El caudal de aire es el principal factor en la caracterización de un sistema de ventilación, ya que establece las condiciones ambientales de la mina, tales como temperatura y humedad, las cuales les brindan a los trabajadores un confort en sus labores. El caudal se ve afectado por las resistencias generadas por las galerías y la capacidad de los ventiladores (Córdoba & Molina, 2011).

Como consecuencia del laboreo de las excavaciones subterráneas del trasvase Este-Oeste (cuyas longitudes alcanzan más de 800 m) durante los trabajos de voladuras, así como en los trabajos de carga-transporte, se enrarece la atmósfera en los frentes de avance, lo cual afecta la higiene del trabajo y, en muchas ocasiones, provoca interrupción de las actividades productivas, como es el caso del túnel Levisa-Mayarí. Por ello se pretende perfeccionar el sistema de ventilación del túnel Levisa-Mayarí para lograr condiciones higiénico-sanitarias adecuadas.

La ventilación en toda labor minera deberá ser con aire limpio, de acuerdo a las necesidades del personal, de las maquinarias y para evacuar los gases, humos y polvo suspendido que pudiera afectar la salud del trabajador. Todo sistema de ventilación en la actividad minera, en cuanto se refiere a la calidad de aire, deberá mantenerse dentro de los límites máximos permisibles siguientes:

Polvo inhalable: 10 mg/m<sup>3</sup>

Polvo respirable: 3 mg/m<sup>3</sup>

Oxígeno (O<sub>2</sub>): mínimo 19,5 % y máx. 22,5 %

Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): máx. 9 000 mg/m<sup>3</sup> o 5 000 ppm. 30 000 para un lapso de 15 min

Monóxido de carbono (CO): máx. 29 mg/m<sup>3</sup> o 25 ppm

Metano (NH<sub>4</sub>): máx. 5 000 ppm

Hidrógeno sulfurado: máx. 14 mg/m<sup>3</sup> o 10 ppm

Gases nitrosos (NO<sub>2</sub>): máx. 7 mg/m<sup>3</sup> de 3 ppm o 5 ppm

Gases nitrosos (NO): 25 ppm

Anhídrido sulfuroso: 2 ppm mínimo a 5 ppm máx

Aldehídos: máx. 5 ppm

Ozono: máx. 0,1 ppm.

Debe destacarse que es el sistema más efectivo para el control de los contaminantes del aire y para el mantenimiento de una velocidad constante del aire (Pak, 2008).

En todas las labores subterráneas se mantendrá una circulación de aire limpio y fresco en cantidad y calidad suficiente de acuerdo al número de personas, el total de HP de los equipos con motores de combustión interna así como para la dilución de los gases que permitan contar en el ambiente de trabajo con un mínimo de 19,5 % y un máximo de 22,5 % de oxígeno. Cuando las minas se encuentren hasta 1 500 m sobre el nivel del mar, en los lugares de trabajo, la cantidad mínima de aire necesaria por hombre será de seis metros cúbicos por minuto (Komarov, 2010).

### **Condición actual de la ventilación en el túnel Levisa-Mayarí del trasvase Este-Oeste**

La ventilación en el túnel Levisa-Mayarí tiene pésimas condiciones; es insuficiente, debido a que se abastece de un flujo de aire fresco que solo alcanza el 15 % de su caudal necesario. Además, existen roturas de la tubería de ventilación por las voladuras, ya que las mismas son de PVC poli (cloruro de vinilo) por lo que son muy vulnerables a las rocas lanzadas producto de las voladuras; situación que se va acumulando en la medida que se desplaza el frente de arranque y se van instalando nuevos tramos de tubería para que estas sean afectadas nuevamente.

Además de esto existen otras deficiencias, como por ejemplo:

-El ventilador está muy próximo a la entrada del túnel, el mismo se encuentra fuera, a 3 m de distancia de la boca.

-La distancia de la boca de la tubería de ventilación al frente de trabajo es de 30 m.

El túnel está dotado de un ventilador con las siguientes características:

Caudal de aire de inyección:  $Q=60\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$

Presión estática disponible por ventilador:  $P_{\text{est}}=347\ \text{mmca}$  (3 400 Pa)

Con silenciador o amortiguador de ruido en boca de aspiración y descarga

460 V, 60 Hz, 86,0 kW, 132 A

Motor Ip: 55, 3 500 rpm

Diámetro conexión: 900 mm

Con adaptador para conductos: (900 x 1 100) mm

Diámetro de anclaje: 18 mm

Con pizarra de control

Marca: ZITRÓN

Modelo: GEL 9-86.

Para solucionar el problema de la posición del ventilador, ya que sería muy difícil su cambio de posición, se recomienda agregarle a su boca de aspiración un tramo de tubería de PVC de, al menos, unos 10 m; además, se puede colocar un colector de 1 800 mm. La boca de aspiración se orientará según la dirección principal del viento, siempre que no provenga de la zona de la escombrera o alguna fuente contaminante, así la recirculación del aire viciado sería casi nula.

## **Determinación de los parámetros del sistema de ventilación del túnel Levisa-Mayarí**

### **Caudal requerido por el número de personas**

Se exige una corriente de aire fresco de no menos de tres metros cúbicos por minuto (6 m<sup>3</sup>/min.) por persona, en cualquier sitio del interior del túnel.

$$Q_1 = F * N * K$$

$$Q_1 = 6 * 5 * 4$$

$$Q_1 = 120 \text{ m}^3/\text{min.}$$

Donde:

$$K = (4-5);$$

F- Caudal mínimo por persona (6 m<sup>3</sup>/min);

N- Número de personas en el lugar, en nuestro caso consideramos cinco personas.

A pesar de que este método es utilizado con frecuencia, se debe considerar "F" solo como referencia, pues no toma en cuenta otros factores consumidores de oxígeno, como lo son la putrefacción de la madera, la descomposición de la roca, la combustión de los equipos, etc.

### **Caudal requerido por equipo Diésel**

Se recomienda un mínimo de 2,83 (m<sup>3</sup>/min) por cada HP del equipo.

El mínimo caudal de aire requerido es de 2,83 m<sup>3</sup>/min y no se acepta factores de corrección. Se pide la potencia al freno o potencia bruta, que es la máxima potencia proporcionada por el motor, sin tener en cuenta las pérdidas por transmisión, si es que no se cuenta con la curva de potencia entregada por el fabricante (gráfico KW vs. RPM) o con una recomendación de ventilación para el equipo proporcionada por el fabricante y certificada por algún organismo confiable.

$$Q_2 = \text{HP} * N * K$$

$$Q_2 = 12\ 678,4 \text{ m}^3/\text{min.}$$

Donde:

HP- Potencia máxima;

N- Mínimo caudal de aire requerido.

## Resistencia aerodinámica de la excavación

### Sección típica 1

$$R_1 = \alpha * L * P / S^3$$

$$R_1 = 0,00143 * 713,6 * 23,13 / (30,81)^3$$

$$R_1 = 0,00081 \text{ N.S}^2/\text{m}^6.$$

### Sección típica 2

$$R_1 = \alpha * L * P / S^3$$

$$R_1 = 0,00143 * 793 * 20,78 / (30,07)^3$$

$$R_1 = 0,00087 \text{ N.S}^2/\text{m}^6.$$

### Sección típica 3

$$R_1 = \alpha * L * P / S^3$$

$$R_1 = 0,00143 * 456,9 * 20,34 / (29,34)^3$$

$$R_1 = 0,00053 \text{ N.S}^2/\text{m}^6.$$

### Sección típica 4

$$R_1 = \alpha * L * P / S^3$$

$$R_1 = 0,00143 * 861,1 * 19,44 / (29,05)^3$$

$$R_1 = 0,00098 \text{ N.S}^2/\text{m}^6$$

$$R_{1\text{prom}} = 0,00080 \text{ N.S}^2/\text{m}^6.$$

Donde:

$\alpha$ -Resistencia aerodinámica por fricción;

L-Longitud del túnel por sección;

P-Perímetro del túnel por sección;

S-Área de sección transversal por sección.

## Pérdida de presión por fricción

$$h = R * Q^2$$

$$Q_3 = S * V$$

**Sección típica 1**

$$Q_3=30,81*0,2=6,16 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Sección típica 2**

$$Q_3=30,07*0,2=6,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Sección típica 3**

$$Q_3=29,34*0,2=5,86 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Sección típica 4**

$$Q_3=29,05*0,2=5,81 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$Q_{3\text{prom}}=19,48 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$h=0,00080 * (19,48)^2;$$

$$h=0,30 \text{ Pa.}$$

Donde:

Q-Cantidad de aire que pasa por el túnel;

V-Velocidad del aire que pasa por el túnel.

Estas resistencias son calculadas en el momento donde más se utiliza la ventilación, que es para eliminar los gases producto de la voladura, ya que en este período de ventilación no existe ninguna maquinaria ni objeto que pueda dificultar el paso del aire por el túnel; no calculamos las resistencias frontales.

En el caso de que las máquinas mineras estén trabajando en el túnel se considera que las resistencias frontales son despreciables y, por lo tanto, no tienen una gran influencia sobre la resistencia aerodinámica general del túnel, ya que, en este caso, la maquinaria entra y sale del túnel constantemente.

**Cantidad de aire según el factor polvo en la excavación**

$$Q_4=V_{\text{rac}}*S$$

$$Q_4=0,7*29,81$$

$$Q_4=20,867 \text{ m}^3/\text{s}.$$



Donde:

S- Área de la sección transversal de la excavación;

Vrac-Velocidad racional del movimiento del aire en el túnel (0,25-0,7 m/s).

### Resistencia aerodinámica de la tubería

$$R_2 = 6,45 * \alpha * L / D^5$$

$$R_2 = 6,45 * 0,0013 * 2790 / 0,8^5$$

$$R_2 = 71,39 \text{ N.S}^2/\text{m}^8.$$

Donde:

$\alpha$ -Coeficiente de resistencia aerodinámica de la tubería;

L-Longitud de la tubería;

D-Diámetro de la tubería.

### Distancia de la boca de la tubería al frente de trabajo

Esta distancia, según V.N. Varonin:  $1 \leq 4\sqrt{S_{exc}}$

$$D_f = 4\sqrt{29,81}$$

$$D_f = 21,84 \text{ m.}$$

Donde:

$S_{exc}$ - área de la sección transversal de la excavación.

### Cálculo de la cantidad de aire según el consumo de sustancia explosiva en el método de ventilación por inyección

En el método de ventilación por inyección de las excavaciones las fórmulas de Varonin y de Mustel, que son respectivamente:

$$Q = 7,8 * t^{-1} * \sqrt[3]{A * V^2}$$

$$Q = \frac{7,8}{1800} * \sqrt[3]{50 * (22499,9)^2}$$

$$Q = 12,625 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q = 21,4 * t^{-1} * \sqrt{A * V}$$

$$Q = 12,610 \text{ m}^3/\text{min}$$

Donde:

A-Gasto de sustancia explosiva;

V-Volumen de la excavación;

t-Tiempo de ventilación.

**Distancia crítica de lanzamiento de la nube de gas y polvo**

$$L_{crit} = 450 * \frac{A}{S}$$

$$L_{crit} = 450 * \frac{50}{29,81} = 754,78 \text{ m}$$

Donde:

A-Cantidad de sustancia explosiva;

S-área de la sección transversal de la excavación.

$$V = 754,78 * 29,81 = 22\ 499,9 \text{ m}^3$$

**Volumen de la excavación**

$$V = L_{crit} * S$$

$$V = 754,78 * 29,81 = 22\ 499,9 \text{ m}^3$$

**Tiempo de ventilación**

$$Q = V = 100 * \frac{A*b}{t*c}$$

$$t = 100 * \frac{A*b}{V*c}$$

$$t = 100 * \frac{50*0,04}{22499,9*0,008} = 1,11 \text{ min}$$

Tabla 1. Asumiendo L<sub>cri</sub> con valores de 10 m; 20 m; 30 m; 40 m y 50 m para determinar tiempo sin ventilación necesario para la dilución, (min)

Valores de L <sub>crit</sub> (m)	10	20	30	40	50
V(m <sup>3</sup> /min)	298,1	596,2	894,3	1 192,4	1 490,5
<b>t(min)</b>	<b>84</b>	<b>42</b>	<b>28</b>	<b>21</b>	<b>17</b>

**Cantidad de aire según la fórmula para la dilución estática**

$$Q = 100 * A * b / t * c$$

$$Q = 100 * 50 * 0,04 / 1\ 800 * 0,008$$

$$Q = 13,88 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Donde:

t- Tiempo de ventilación;

b- Masa del anhídrido carbónico convencional, que se forma en la voladura de 1 kg de sustancia explosiva,  $0,04 \text{ kg/m}^3$ ;

c- Concentración máxima permisible de anhídrido carbónico, 0,008 %.

### **Limitantes que se tienen en el túnel:**

No tienen cómo energizar los ventiladores dentro del túnel.

Cada túnel tiene asignado un ventilador.

### **Alternativas**

Introducir el ventilador en el túnel para crear turbulencia próxima al frente.

En la zona de trabajo del ventilador crear una cortina de agua para captar los gases solubles en el tiempo de ventilación.

### **Conclusiones**

La demanda de aire para la ventilación, que garantiza la formación de una atmósfera saludable producto de la dilución de los contenidos de los gases tóxicos en el frente, es de  $13,88 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El ventilador con que está dotado el sistema de ventilación actual desarrolla el gasto ( $16 \text{ m}^3/\text{s}$ ) suficiente para satisfacer la demanda de aire fresco en el frente.

El ventilador se encuentra ubicado muy próximo a la entrada del túnel por lo que recircula el aire viciado al frente y es por ello que se analizó la posibilidad de añadir a la boca de aspiración un colector de 1 800 mm; esta se orientará según la dirección principal del viento. Además, se ofrecen alternativas para cuando el ventilador no esté funcionando.

## Referencias bibliográficas

ABRAMOV, F. 2007: *Manual para la ventilación de minas*. Niedra, Moscú.

ANDRADE, S. 2008: Guía metodológica de seguridad para ventilación de minas. Departamento de Seguridad Minera. Diseño Multimedia Dpto. de Informática. SERNAGEOMIN.

BITKOLOV, L. 2008: Estratificación del viento y la temperatura de la atmósfera en las canteras. *Problemas físico-técnicos de la explotación de los minerales útiles* 5: 66-73.

BULCHAKOV, A. C. 2011: *Aerología minera*. Niedra, Moscú.

CÓRDOBA, C. & MOLINA, J. 2011: Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 29(julio): 73-86.

Komarov, V. B. 2010: *Ventilación de minas*. Niedra, Moscú.

PAK, V.V. 2008: *Instalaciones mineras de ventilación local*. Niedra, Moscú.

SOLER & PALAU. 2015: Manual Práctico de Ventilación. [en línea]. Consulta: 10 nov 2015. Disponible en: [www.soler-palau.mx/manual-de-ventilacion.php](http://www.soler-palau.mx/manual-de-ventilacion.php)