



Perfeccionamiento del sistema de ventilación del tramo VI del túnel hidrotécnico Levisa-Mayarí del trasvase Este-Oeste*

Eliseidi Pileta Grecesqui

Especialidad: Ingeniería en Minas

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se propuso el perfeccionamiento del sistema de ventilación del tramo VI del túnel hidrotécnico Levisa-Mayarí para lograr condiciones higiénico-sanitarias adecuadas, el cual estará destinado a trasvasar el agua desde los ríos que nacen en el macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa hacia las llanuras del norte de Holguín, Las Tunas, noreste de Camagüey y el norte y centro del Valle del Cauto. La ventilación se realizó para una excavación de aproximadamente 481 m de longitud y un área de sección transversal de 32 m². Se definieron los factores que intervienen en la ventilación, se caracterizaron los equipos que trabajan dentro del túnel, se realizó el cálculo de los parámetros del sistema de ventilación, estableciéndose el caudal requerido por personas y equipos diésel en el túnel. Por último, se realiza el cálculo de la resistencia y cantidad de aire necesarios para ventilar, según la cantidad de sustancia explosiva que se utilice.

Palabras clave: trasvase; sistema de ventilación; ventilación de túneles; túnel hidrotécnico.

* Trabajo tutorado por el Dr. Roberto Watson Quesada.

Recibido: 18 febrero 2016 / Aceptado: 17 diciembre 2016.

Ventilation system improvement in section iv of the Levisa-Mayari hydro-technical tunnel in the East-West transfer line

Abstract: This work proposes improvements to the ventilation system on section 4 of the Levisa-Mayari hydro-technical tunnel to achieve proper hygienic-sanitary conditions. This tunnel is intended to transfer water to the rivers born in the mountainous massif Nipe-Sagua-Baracoa towards the prairies to the north of Holguin, Las Tunas, northeast of Camaguey and to the north and centre of the Cauto valley. The ventilation was installed in an excavation of approximately 481 m long and a cross section area of 32 m². The factors intervening in the ventilation were defined and the equipment operating in the tunnel was characterized. The ventilation system parameters were calculated to establish the volume required per person and the amount of air required for venting based on the amount of explosive substances to be used.

Key words: transfer; hydro-technical tunnel; ventilation system; tunnel ventilation.

Introducción

El trasvase Este-Oeste es una obra de ingeniería compuesta de canales, túneles y presas que permitirá trasvasar agua a regiones áridas (Diéguez, Otaño & Sargentón, 2013). El túnel Levisa Mayarí constituye una obra de impacto social por lo que ha generado estudios para su funcionamiento. Diéguez, Otaño y Sargentón (2014) realizaron el diseño de voladuras de contorno mientras que Rondón (2016) analizó el perfeccionamiento del sistema de ventilación del túnel Levisa-Mayarí. Otros estudios en el trasvase han sido realizados por algunos investigadores (Cuesta, Watson & Legrá, 2008; Cuesta, Almaguer, Otaño, 2009; Multan, 2011; Arias, 2013 y Lías, Leyva & Almaguer, 2016). Sin embargo, es necesario estudiar el sistema de ventilación a implementar ya que la ventilación en túneles asegura condiciones ambientales no peligrosas para la circulación (respiración y visibilidad) y garantiza las condiciones de evacuación y de intervención de los equipos de emergencia en caso de incendio (Bulchakov, 2011).

La correcta ventilación en los túneles es un factor que representa seguridad, salud y confort para los trabajadores, mientras propicia el correcto funcionamiento del equipo utilizado y disminuye el riesgo de accidentes graves, como incendios o explosiones.

Este proyecto estudia el túnel hidrotécnico Levisa-Mayarí, el cual ha sido dividido en seis tramos, dado su longitud de 17 km, correspondiendo este en específico al tramo VI. El proyecto se ejecuta a solicitud de la inversión de diseñar un túnel a partir del trazado ajustado, con el objetivo de permitir la conducción del gasto mínimo de 30,0 m³/s de agua desde las presas Levisa-Mayarí, en unión con los tramos que le anteceden: los tramos I, II, III y IV (construidos), tramo V (en construcción). Para el diseño de este túnel se consideró que la conducción se realizará a presión, aprovechando la carga de la presa Levisa, con cota de nivel de aguas normales de 96,00 m y cota de fondo del túnel a la salida de 65,00 m.

La construcción de este túnel consta de cinco frentes de trabajo, uno que inicia el tramo II, llamado El Loro, dos que subdividen el túnel de Conexión I, uno con dirección hacia el tramo II y el otro hacia el tramo III A. También se ejecuta el túnel de Conexión II, subdividido en una galería con dirección hacia La Ceiba y otra en dirección hacia el tramo IV; el tramo V está compuesto por cuatro objetos de obras fundamentales.

El tramo VI del túnel hidrotécnico Levisa-Mayarí se encuentra en una zona intrincada con difíciles accesos, formado por un relieve montañoso. En el trazado las alturas van desde cota 100,00 hasta 236,00. Todo el trazado puede verse en la hoja cartográfica a escala 1:50000 de Mayarí 5077-I; este tramo posee una longitud aproximada de 481 m y un área de sección transversal de 32 m².

Rondón (2016) propuso el perfeccionamiento del sistema de ventilación del túnel Levisa-Mayarí, de manera general. En este trabajo se propone perfeccionar el sistema de ventilación del tramo VI del túnel hidrotécnico Levisa-Mayarí para lograr condiciones higiénico-sanitarias adecuadas.

La ventilación en minas y túneles constituye una operación fundamental, cuya función es la de renovar el aire, diluir los gases contaminantes y polvo, además de controlar los humos en caso de incendio. Esta operación asegura 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.

La ventilación en los túneles hidrotécnicos del trasvase Levisa-Mayarí abastece un flujo de aire fresco que solo alcanza el 15 % de su caudal necesario. Además de la mala interconexión de los tramos de los conductos, existen roturas en la tubería de ventilación provocadas por las voladuras, ya que las mismas son de PVC (policloruro de vinilo) por lo que son muy vulnerables al impacto; situación que se va acumulando en la medida que se desplaza el frente de arranque y se van instalando nuevos tramos de tubos y estas son afectadas nuevamente (Rondón, 2016).

Determinación de los parámetros del sistema de ventilación del túnel hidrotécnico Levisa-Mayarí

La estimación de la cantidad necesaria de aire en una zona de trabajo todavía es un aspecto empírico en la planificación y diseño de un sistema de ventilación. Según la experiencia de otras minas se recomienda empezar a cuantificar las necesidades de caudal en los propios frentes de trabajo, en los fondos de saco.

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).

Caudal requerido por el número de personas

Cuando los túneles o minas se encuentren hasta 1,500 msnm, en los lugares de trabajo, la cantidad mínima de aire necesaria por hombre será de tres metros cúbicos por minuto. En otras altitudes la cantidad de aire será de acuerdo a la siguiente escala:

- De 1,500 m a 3,000 m aumentará en 40 %; será igual a 4 m³/min.
- De 3,000 m a 4,000 m aumentará en 70 %; será igual a 5 m³/min.
- Sobre los 4,000 m aumentará en 100 %; será igual a 6 m³/min.

El caudal de aire para el personal se calcula mediante la fórmula:

$$Q = k * N$$

$$Q = 6 * 11$$

$$Q = 66 \text{ m}^3/\text{min} = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Donde:

Q: Caudal total para n personas que trabajen en interior del túnel (m³/s).

K: Caudal mínimo por persona

N: Número de personas en el lugar (11).

Además de este caudal por el número de personas en el túnel, se debe tomar 1,5 m³/min de reserva.

Caudal requerido por temperatura

Como norma, para el cálculo del aire respecto a la temperatura, se dan los siguientes valores (Tabla 1).

Tabla 1. Velocidad necesaria para un ambiente ventilado

Humedad relativa	Temperatura seca	Velocidad mínima	Para una labor de 32 m ² (8x4 m)
< o = 85 %	24 C a 300 C	30 m/min	960 m ³ /min
> 85 %	300 C	120 m/min	3 584 m ³ /min

Caudal requerido por equipos diésel

Para el uso de equipo diésel, la cantidad de aire circulante no será menor de tres metros cúbicos por minuto por cada HP que desarrollen los equipos. Para el cálculo del caudal de equipos diésel se aplicará la siguiente formula:

$$Q = k * N$$

$$Q = 3 * 115$$

$$Q = 3\ 345\ \text{m}^3/\text{min} = 55,75\ \text{m}^3/\text{s}.$$

Donde:

N - Cantidad de HP de los equipos diésel (sumatoria de HP de los equipos que laboran dentro del túnel).

Para determinar el caudal de aire por maquinaria diésel se considera la simultaneidad de los equipos presentes en el interior de la mina, cuya asignación representa la flota operativa y, por tanto, el caudal de aire real requerido se estima entre 40 % y 60 %.

Caudal por requerimiento de consumo de explosivos

$$Q = n * V * A\ (\text{m}^3/\text{s})$$

$$Q = 800\ \text{m}/\text{min} = 13,33\ \text{m}^3/\text{s}$$

Donde:

Q - Caudal total para diluir contaminantes por explosivos (m^3/s)

n - Número de niveles del túnel.

V - Velocidad de aire según norma, indica que cuando se emplee explosivo ANFO u otros agentes de voladura, la velocidad del aire no será menor de 25 m/minuto.

A - Área de la sección de labores (m).

Caudal requerido por desprendimiento de gases de las rocas

Para determinar este caudal de aire se toma como criterio la fijación de velocidad en las labores, en ningún caso la velocidad del aire será menor de 20 m/minuto ni superior a 250 m/minuto en las labores de explotación, incluido el desarrollo, preparación y en todo lugar donde haya personal trabajando, con esta apreciación es suficiente para asegurar las áreas despejadas.

Pérdidas de carga de la instalación

Las pérdidas de carga de un circuito de ventilación auxiliar pueden dividirse en pérdidas por fricción, pérdidas singulares y pérdidas por presión dinámica.

Pérdidas por fricción

Cuando el aire fluye a través de un ducto o galería minera, la presión requerida para mover el aire a través de él depende no solo de la fricción interna, sino también del tamaño, longitud, forma del ducto, velocidad y densidad del aire.

$$P = \frac{KCLV^2}{A}$$

Donde:

P - Caída de presión (Pa)

K - Factor de fricción de la tubería

C - Perímetro de la tubería de ventilación (m)

L - Longitud del túnel (m)

V - Velocidad (m/s)

A - Área de la tubería de ventilación (m²).

Sabiendo que: $Q = V * A$

La fórmula anterior se puede expresar como: $P = \frac{KCLQ^2}{A}$

En un circuito de ventilación auxiliar, las pérdidas por fricción de mayor importancia de cara al diseño de la instalación son las de la tubería, siendo las de las galerías del túnel o mina despreciables frente a estas (suponen en general menos de un 1 % en relación a las de las tuberías).

Pérdidas singulares

Las pérdidas singulares son aquellas que se producen cuando el flujo de aire cambia de dirección o el conducto cambia de sección. Estas pérdidas se calculan como un porcentaje sobre la presión dinámica del fluido calculado en el punto singular.

$$\Delta P_{sin} = \zeta = \frac{\rho * U^2}{2}$$

Donde:

ΔP_{sin} - pérdida de carga del aire (Pa)

ζ (p) - coeficiente de pérdida del aire

ρ - densidad del aire (1,2 kg/m³)

u - velocidad del aire en el conducto (0,41 m/s).

Coeficiente de pérdida del aire

$$p = \frac{1}{3} k' * d_t * \frac{L_t}{m} \sqrt{(R_t + 1)^2}$$

Resistencia aerodinámica de la tubería

$$R_t = \frac{6,5 * \alpha_f * L_t}{d_t^5}$$

$$R_t = 7,71 \times 10^{-11} \text{ kilomiur}$$

Donde:

α_f - coeficiente de fricción aerodinámica (-)

Para uniones de alta calidad ($k' = 0,0005$)

$$p = \frac{1}{3} 0,0005 * 9000 * \frac{7000}{20} \sqrt{(7,71 \times 10^{-11} + 1)^2} \quad p = 52,5$$

Para uniones satisfactorias ($k' = 0,0001$)

$$p = \frac{1}{3} 0,0001 * \frac{7000}{20} \sqrt{(7,71 \times 10^{-11} + 1)^2} \quad p = 10,5$$

Para uniones malas ($k' = 0,002$)

$$p = \frac{1}{3} 0,002 * 900 * \frac{7000}{20} \sqrt{(7,71 \times 10^{-11} + 1)^2} \quad p = 210$$

Donde:

d_t - diámetro de la tubería (900 mm)

L_t - longitud de la tubería (7 000 m)

m - longitud del segmento de la tubería (20 m)

R_t - resistencia aerodinámica de la tubería sin tener en cuenta las pérdidas, se da en kilomiur.

k - coeficiente de permeabilidad específica en las juntas, depende del número de uniones L/m y de la calidad de estas.

Se toma:

- Para uniones de alta calidad $k' = 0,0001$ a $0,0005$
- Para uniones satisfactorias $k' = 0,0005$ a $0,0001$
- Para uniones malas $k' > 0,001$.

Pérdidas singulares de carga del aire para uniones de alta calidad

$$\Delta P_{sin} = 52,5 \frac{1,2 * (0,41)^2}{2} \quad \Delta P_{sin} = 52,9 P_a$$

Pérdidas singulares de carga del aire para uniones satisfactorias

$$\Delta P_{sin} = 10,5 \frac{1,2 * (0,41)^2}{2} \quad \Delta P_{sin} = 1,05 P_a$$

Pérdidas singulares de carga del aire para uniones malas

$$\Delta P_{sin} = 210 \frac{1,2 * (0,41)^2}{2} \quad \Delta P_{sin} = 521,16 P_a$$

En un circuito de ventilación auxiliar esto ocurre en elementos como codos, diámetro de la tubería, puntos de bifurcación de la tubería, rejillas de protección de tubería o ventilador.

La suma de estas dos pérdidas, la de fricción y las singulares nos da como resultado la presión estática.

Pérdidas por presión dinámica

Al final del circuito, usualmente a la salida de la tubería (sistemas soplantes) o a la salida del ventilador (sistemas aspirantes), se ha de tener en cuenta la presión dinámica con la que el aire sale, ya que esta es una pérdida más. Dichas pérdidas no tienen mayor complicación y se calculan por la fórmula general de la presión dinámica.

$$\Delta P_{din} = \frac{\rho * U^2}{2} \quad \Delta P_{din} = 0,10086 P_a$$

Factor de fugas de la tubería

Estas fugas, inicialmente, dependen de las propias características de la tubería, pero ha de tenerse en cuenta que estas tuberías están instaladas en un sistema dinámico, es decir, al mismo tiempo que se aporta aire están trabajando en el frente, por lo que es muy frecuente que las tuberías se vean deterioradas con el paso del tiempo.

Caudal final

$$Q_{\text{FINAL}} = Q \left(1 - \frac{F}{100} \right)^{-\left(\frac{L}{100} \right)} \quad Q_{\text{FINAL}} = 174,08 \text{ m}^3/\text{min} = 2,90 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde:

Q_{FINAL} - caudal final a la salida del ventilador (m^3/s)

Q - caudal requerido en el frente de trabajo, tomado a partir de la suma de caudales, (m^3/s)

L - longitud equivalente del túnel (m)

F - factor de fuga de la tubería otorgada por el fabricante (%).

Estas consideraciones se deben tener muy en cuenta tanto en el diseño como en las labores de mantenimiento y, por tanto, hacemos hincapié en que cada proyecto es diferente y debe ser estudiado en profundidad. No obstante, la experiencia dice que la fórmula anterior, si es usada considerando las particularidades del proyecto, es una buena aproximación a la realidad.

Potencia instalada

Las consideraciones que deben hacerse para calcular la potencia del motor son:

Q - Caudal de aire; m^3/s

H - Depresión del circuito; Pa (presión estática en Pascales)

η - Eficiencia del ventilador, la cual varía entre 70 % a 85 % (dependiendo de la fabricación, tamaño y punto de trabajo)

AHP - Potencia necesaria para mover el caudal Q de aire en un circuito cuya depresión es H ; Kw

BHP - Potencia del ventilador en Kw

DE - Eficiencia de la transmisión, la cual varía entre 90 % para transmisión por poleas y correas, y 100 % para transmisión directa.

Potencia necesaria para mover el caudal Q de aire en un circuito

$$AHP = \frac{QH}{6350} \quad AHP = 0,015 \text{ kW}$$

Potencia del ventilador

$$BHP = \frac{Q \cdot H \cdot DE}{6350 \cdot \eta} \quad BHP = 0,016 \text{ kW}$$

Cálculo del pozo de ventilación

Para el caso de pozos de ventilación la sección útil se determina a partir de la velocidad que deba tener la corriente de aire.

$$V_{\text{cál}} < V_{\text{perm}}$$

Donde:

V_{cál} – velocidad de cálculo del aire para la sección, m/s

V_{perm} – velocidad permisible del aire (no debe exceder los 15 m/s en pozos de ventilación), m/s.

$$V_{\text{cál}} = Q/60 * S_u * \theta$$

$$V_{\text{cál}} = 300/60 * 1 * 0,8$$

$$V_{\text{cál}} = 6,25 \text{ m/s}$$

Q – cantidad de aire que pasa por el pozo, m³/min

S_u – sección útil del pozo, m²

θ - coeficiente que tiene en cuenta la disminución de la sección útil del pozo debido a la fortificación (se toma 0,8 para pozos circulares).

Si para el valor calculado de S_u, la velocidad de cálculo del área es superior a la velocidad permisible, la sección útil del pozo debe ser aumentada hasta que se cumpla este requisito.

Limitantes que tiene el túnel

- No existen mecanismos para energizar los ventiladores dentro del túnel.
- Solo tiene asignado un ventilador, por lo que se dificulta la ventilación.

Alternativas

- Introducir un ventilador en el túnel para crear turbulencia próxima al frente de trabajo.
- En la zona de trabajo del ventilador crear una cortina de agua para captar los gases solubles en el tiempo de ventilación.
- Construir en el punto de intercepción de los tramos V, VI y túnel de conexión IV un pozo de ventilación para aumentar el flujo de aire limpio al túnel y de esta forma equilibrar la deficiencia de la ventilación.

Conclusiones

Se realizó el diseño para la construcción de un pozo de ventilación en el punto de intercepción de los tramos V, VI y túnel de conexión IV, de esta forma mejorar la ventilación dentro del túnel.

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 13,33 m³/s.

El ventilador del sistema de ventilación actual, para un área de 32 m², desarrolla un caudal de 16 m³/s, suficiente para satisfacer la demanda de aire fresco en el frente.

Referencias bibliográficas

- ARIAS, D. 2013: Parámetros para el diseño de la voladura de contorno en el laboreo de túneles. *Ciencia & Futuro* 3(1): 14-28.
- 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.
- CUESTA, A.; WATSON, R. & LEGRÁ, A. 2008: Procedimiento para el control de filtraciones en excavaciones subterráneas. Caso de estudio túnel Serones–Salida Guaro. *Minería y Geología* 24(3).

- CUESTA, A.; ALMAGUER, Y. & OTAÑO, J. 2009: Delimitación de zonas susceptibles a filtraciones en el túnel Serones-Salida Guaro del trasvase Este-Oeste. *Minería & Geología* 25(3).
- DIÉGUEZ, Y.; OTAÑO, J. & SARGENTÓN, G. 2013: Campo tenso-deformacional para voladuras con cordón detonante en el laboreo de túneles. *Minería & Geología* 29(3): 38-55.
- DIÉGUEZ, Y.; OTAÑO, J. & SARGENTÓN, G. 2014: Diseño de voladuras de contorno para el laboreo de túneles. *Minería & Geología* 30(3): 49-66.
- LÍAS, Y.; LEYVA, Y. & ALMAGUER, C. 2016: El impacto sociocultural del trasvase este-oeste: estudio de caso en la comunidad rural de Seboruco. *Revista de Innovación Social y Desarrollo* 1(1): 64-76.
- MULTAN, C. 2011: Propuesta de ciclograma y organización de los trabajos en el sector Toma Derecha del trasvase Este-Oeste, Mayarí. *Ciencia & Futuro* 1(3): 20-28.
- RAMÍREZ, H. J. 2005: Ventilación de Minas. Módulo de Capacitación Técnico Ambiental. Chaparra, Perú.
- RONDÓN, M. 2016: Perfeccionamiento del sistema de ventilación del túnel Levisa-Mayarí del trasvase Este-Oeste. *Ciencia & Futuro* 6(3): 20-31.