ANALISIS DE REDUCCIÓN DE COSTOS POR CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN DE OBRA SUBTERRÁNEA

Baltazar-Vera, Juan Carlos[1], Patlán-Valdez, Jesús Enrique[2], Rodríguez-Rodríguez, Carolina de Jésus[3], Ontiveros-Ibarra, Roberto[4], Valtierra-Olivares, Joel Everardo[5]*

[1]Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Sede San Matías, Ex-Hacienda San Matías S/N, Col San Matías, C.P 36020, Guanajuato, Guanajuato, México. jc.baltazarvera@ugto.mx

[2]Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Sede San Matías, Ex-Hacienda San Matías S/N, Col San Matías, C.P 36020, Guanajuato, Guanajuato, México. enrique_patlan1916@hotmail.com

[3]Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Sede San Matías, Ex-Hacienda San Matías S/N, Col San Matías, C.P 36020, Guanajuato, Guanajuato, México. carolina.rodriguez@ugto.mx

[4]Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Sede San Matías, Ex-Hacienda San Matías S/N, Col San Matías, C.P 36020, Guanajuato, Guanajuato, México. rontiver@ugto.mx

[5]Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Sede San Matías, Ex-Hacienda San Matías S/N, Col San Matías, C.P 36020, Guanajuato, Guanajuato, México. valtierra.je@ugto.mx*

Área de participación: **Ingeniería Industrial**

Resumen

En este trabajo se muestra el estudio comparativo de costos por consumo energético al implementar un variador de velocidad en el ventilador para regular el caudal proporcionado por el sistema de ventilación con respecto al sistema que trabaja al 100 % del caudal, en este sentido los resultados muestran que se tiene un ahorro anual de aproximadamente 42%, lo cual es atractivo ya que permite dilucidar que al realizar esta modificación se tiene un abatimiento considerable de los gastos por consumo energético propios de esta actividad.

Palabras clave: Sistema de ventilación, Ventilador, Consumo energético, Ahorro.

Abstract

This work shows the comparative study of energy consumption costs when implementing a variable speed drive in the fan to regulate the flow provided by the ventilation system with respect to the system that works at 100% of the flow. In this sense, the results show that there is an annual saving of approximately 42%, which is attractive since it allows us to elucidate that by making this modification, there is a considerable reduction in energy consumption costs typical of this activity.

Key words: *Ventilation system, Fan, Energy consumption, Savings*

Introducción

La minería es un conjunto de actividades que tiene que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales, esta se lleva a cabo para obtener los recursos acumulados en el suelo y subsuelo. La minería también se relaciona con los trabajos encaminados al arranque y al tratamiento de una mena [1, 2, 3]. En las obras de ejecución de túneles, así como en las labores mineras que no son ventiladas por la corriente principal, es necesario una ventilación específica para asegurar que tenemos en el frente de trabajo el aire necesario para remover los gases emitidos por los vehículos, la voladura u otros como el metano. Es también necesario controlar el polvo y la temperatura. Esta ventilación es comúnmente conocida como ventilación secundaria. [4, 5, 6]. En este sentido, toda mina subterránea deberá disponer de Circuitos de Ventilación, natural o forzado, para mantener un suministro permanente de aire fresco y retorno del aire viciado, en el cual el caudal de aire que circule por la mina dependerá del número de trabajadores, la extensión y sección de las labores, el tipo de maquinarias de combustión interna y las emanaciones de gases naturales de la mina [7, 8, 9].

En México la NORMA Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012, Minas subterráneas y Minas a cielo abierto indican los parámetros adecuados para implementar un sistema de ventilación entre los cuales destacan: Suministrar al interior de la mina un volumen de aire de 1.50 m^3/min por cada trabajador, 2.13 m^3/min por cada caballo de fuerza de la maquinaria accionada por motores de combustión diésel, localizados en el interior de la mina y mantener una velocidad mínima del aire de 15.24 m/min, cuando en cualquier frente, galería o tiro se opere maquinaria impulsada por motores de combustión diésel [10]. De acuerdo con esto, en este trabajo se presenta un análisis de consumo energético y costos al implementar un variador de frecuencia para optimizar el sistema de ventilación estudiado.

Metodología

Criterios para la definición del caudal

Para poder determinar el caudal necesario para el caso de estudio presentado se tomaron en cuenta las especificaciones dentro de la normatividad mexicana correspondiente, sin embargo, de manera complementaria se consideraron aspectos de normativas de otros países para abordar aspectos que la normativa nacional con considera. En este sentido, El Art. N° 204 del D.S. N° 055-2010-EM de Perú, indica que cuando los túneles o minas se encuentren hasta 1,500 metros sobre el nivel del mar, se debe aumentar un factor de altura como sigue: De 1,500 a 3,000 metros aumentará en 40%, de 3,000 a 4,000 metros aumentará en 70%, sobre los 4,000 metros aumentará en 100% [11].

El caudal de aire para personal se calcula mediante la siguiente formula:

$$QP = KN \quad (1)$$

Donde:

QP= caudal de aire requerido por persona

K= Caudal mínimo por persona

N= Número de personas.

De igual manera el caudal requerido por cada HP de equipo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$QE = LE \quad (2)$$

Donde:

QE= caudal de aire requerido por cada HP de los equipos diesel.

L= Caudal mínimo por HP de equipo

E= Número de HPs de equipos diesel.

De acuerdo con lo anterior se tiene que para calcular el caudal real necesario para la obra subterránea se tiene la siguiente fórmula:

$$Qfinal = Q\left(1 - \frac{F}{100}\right)^{-\frac{L}{100}} \quad (3)$$

Donde:

QF= Caudal real necesario para ventilar la obra.

Q= la suma de QP y QE

F= Factor de fuga de la tubería

L= Longitud equivalente de la tubéría.

Cálculo de las perdidas de carga de instalación y potencia instalada

Una vez calculado el caudal necesario para ventilar la obra del caso de estudio se determinará la presión necesaria de salida del ventilador para mover dicho caudal, para tal fin se calcularán las

pérdidas de carga de instalación y con estos datos la potencia instalada del motor a emplear para el funcionamiento del ventilador.

Cuando el aire fluye a través de un ducto u obra subterránea, la presión requerida para mover el aire a través de él depende no sólo de la fricción interna, sino también del tamaño, longitud, forma del ducto, velocidad y densidad del aire mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{MCLV^2}{A} \qquad 4$$

Dónde:

P: Caída de presión (Pa).

M: Factor de fricción de la tubería.

C: Perímetro del ducto (m).

L: Longitud del túnel (m).

V: Velocidad (m/s).

A: Área del ducto (m2).

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 calculada en el punto singular:

$$\Delta Psin = \frac{\varepsilon \rho v^2}{2} \qquad 5$$

Dónde:

ΔP_{sin}: Es la pérdida de carga del aire [Pa].

Ɛ: Es el coeficiente de pérdida del elemento.

ρ : Es la densidad del aire [kg/m3].

v: Es la velocidad del aire en el conducto [m/s].

Finalmente, para el cálculo de la potencia instalada propia del motor para el funcionamiento del ventilador se puede calcular de la siguiente manera:

$$BHP = \frac{QHDE}{6350\eta} \quad (6)$$

Donde:

Q = Caudal de aire en m^3/s.

H =Depresión del circuito en 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).

BHP = Potencia del ventilador en Kw.

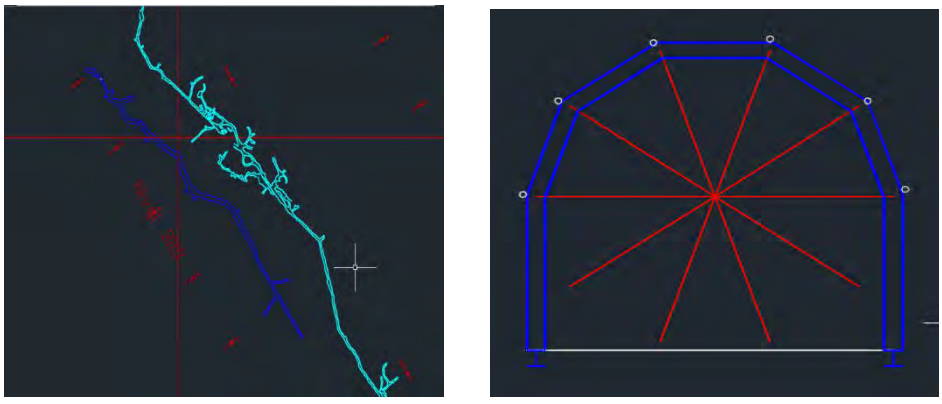
DE = Eficiencia de la transmisión, la cual varía entre 90% para transmisión por poleas y correas, y 100% para transmisión directa.

Resultados y discusión

Datos de la obra

En concordancia con lo mostrado en la sección de metodología se llevó a el cálculo y selección del sistema de ventilación en el nivel 320 en la mina San Vicente a continuación se presentan los datos correspondientes de la obra:

El nivel de la mina tiene una longitud aproximada de 500 m con una sección de 3.5 de ancho y 3.5 de alto (Figura 1).



a) b)

Figura 1. a) Plano del nivel. (Minera Villa Seca), b) Sección de la obra (Elaboración propia)

Se requiere:

- 1 cargador frontal de 3.7 yd^3 CAT modelo R1300 de 165 HP.
- 1 camión bajo perfil de 14 yd^3 CAT modelo AD30 de 377 HP.

- 1 perforista, 1 Ayudante de perforista, 1 Operador de R1300,1 Operador de AD30, 1 Supervisor, 1 persona de servicio, 1 Ayudante de servicios, dando un total de cuadrilla de 7.

Cálculo de los requerimientos del ventilador

Tomando como base los parámetros descritos en la metodología se calcularon los requerimientos necesarios para el sistema de ventilación (Tabla 1) en los cuales se puede observar que los requerimientos de caudal y presión se encuentran dentro de los rangos típicos para este tipo de sistemas manteniendo una velocidad de aire acorde a lo indicado en la norma dando un tiempo de renovación del aire de 8 min con 30 segundos lo cual es sumamente atractivo en términos de la optimización de tiempos de espera derivados del proceso de ventilación después de voladura.

Tabla 1. Requerimientos de ventilación para la obra subterránea

Obra	Longitud	Caudal-Ventilador	Presión Estática	Presión Dinámica	Presión total	Velocidad final en la obra	Diámetro de Mangas	Tiempo de limpieza
Nivel 320	500m	1162.51 m3/min	24.41713	0.896557	25.313686	26.086 m3/s	36"	0:8:30 min

Con los requerimientos de ventilación obtenidos para la obra a ventilar que corresponde al nivel 320 se pudo determinar el BHP necesario para el funcionamiento del ventilador y por lo tanto poder conocer la capacidad del motor que provea esta potencia, en este sentido el motor debe dar una potencia de 110 HP el cual se encuentra dentro del rango de los motores comerciales comúnmente utilizados para esta actividad.

A continuación, se hace un estudio de consumo energético comparando los datos del sistema de ventilación implementando un variador de velocidad para optimizar el gasto de energía (Figura 3) contra el sistema sin este dispositivo (Figura 2), lo anterior con la finalidad de dilucidar si esta modificación representa un ahorro considerable con respecto al sistema sin cambios.

Tabla 2. Costo de consumo energético del sistema de ventilación sin variador de velocidad.

Actividad	CICLO (Hrs.)	% de Caudal	Caudal (cfm)	% de consumida (Kw)	Potencia consumida (HP)	Potencia consumida (Kw)	Costo total tomando $ 1.8112 MXN por Kw
Perforación	2	100%	43413.119	100%	110	85	154
Cargado de barrenos	1	100%	43413.119	100%	110	85	154
Voladura/Ventilación	0.5	100%	43413.119	100%	110	85	154
Amacice	1.5	100%	43413.119	100%	110	85	154
Fortificación	2	100%	43413.119	100%	110	85	154
Lanzado de concreto	2	100%	43413.119	100%	110	85	154
Retiro de rezaga	2	100%	43413.119	100%	110	85	154
						Costo por turno ($MXN)	1070

Tabla 2. Costo de consumo energético del sistema de ventilación con variador de velocidad.

Actividad	CICLO (Hrs.)	% de Caudal	Caudal (cfm)	% de consumida (Kw)	Potencia consumida (HP)	Potencia consumida (Kw)	Costo total tomando $ 1.8112 MXN por Kw
Perforación	2	70%	30389.1833	34%	37.4	28.9	53
Cargado de barrenos	1	60%	26047.8714	22%	24.2	18.7	34
Voladura/Ventilación	0.5	100%	43413.119	100%	110	85	154
Amacice	1.5	70%	30389.1833	34%	37.4	28.9	53
Fortificación	2	70%	30389.1833	34%	37.4	28.9	53
Lanzado de concreto	2	90%	39071.8071	73%	80.3	62.05	154
Retiro de rezaga	2	100%	43413.119	100%	110	85	113
						Costo por turno ($MXN)	614

Estos resultados muestran que al hacer una reducción del caudal de acuerdo a las características propias de las actividades de la obra se logra tener un panorama de optimización del consumo de energía, el cual indica que al no implementar el variador de velocidad el costo anualizado del consumo energético es de $ 9,373,200 MXN, en este sentido el costo del consumo energético anualizado al implementar el variador de velocidad es de $ 5,378,640 MXN al cual hay que agregarle el costo anualizado del variador de velocidad lo que da un total de $ 5,446,640 MXN, lo que se traduce en un ahorro anual de $ 3,926,560 MXN representando una reducción aproximada del 42%.

Trabajo a futuro

Con este trabajo se puede dilucidar el impacto en los costos de energía que representa el implementar un variador de velocidad en el ventilador del sistema a suministrar aire, en este sentido este estudio es la fase inicial de un proyecto mas amplio el cual contempla analizar de manera integral todos los circuitos de ventilación implicados en el conjunto de obras subterráneas ya sea para minado o para desarrollo de otras actividades, para tal fin se desarrollarán metodologías que permitan analizar de manera conjunta las diversas obras mediante softwares de diseño y simulación de circuitos de ventilación, así como, técnicas de optimización apropiadas.

Conclusiones

En este trabajo se presentó un análisis en los costos de consumo energético al implementar un variador de velocidad en el ventilador con respecto al sistema sin implementarlo. Los resultados muestran que al realizar la modificación antes mencionada se logra tener un ahorro del 42% correspondiendo a $ 3,926,560 MXN anuales, estos resultados son alentadores ya que se debe tomar en cuenta que en las unidades mineras o de obras de desarrollo se tienen varios frentes de trabajo, lo que indica que se requieren varios sistemas de ventilación simultáneos, lo cual representa un aumento drástico de los costos generados por consumo energético y por lo tanto la modificación implementada para generar un ahorro en este parámetro aumenta su valor agregado.

Referencias

[1] C. Estrada, L. Villareal, E. Cruz, C.A Pérez, “La minería en México: formas de acumulación y efectos ambientales”, *Caminhos de Geografia”,* vol. 1, no. 1, pp. 308-337, 2017.http://dx.doi.org/10.14393/RCG186314

[2] S. Hu and T. Yu, "Study on overlying rock movement and mine pressure behavior in shallow-buried close coal multi-seam mining" *Alexandria Engineering Journal,* vol. 105, no. 1, pp. 578-587, 2004. https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.08.041

[3] A. Gholami, B. Tokac, Zhang Q. "Knowledge synthesis on the mine life cycle and the mining value chain to address climate change " *Resources Policy,* vol. 95, no. 1, pp. 105183, 2024. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105183

[4] E. Angeles, M. Balci, M. Kumral, L. Sushama. "Quantification of relationship between greenhouse gas emissions and equipment management in mineral industries" *Process Integration and Optimization for Sustainability*, vol. 6, no 3, pp. 669-679, 2022. https:// doi.org/10.1007/s41660-022-00239-1

[5] C. Baah, D. Opoku-Agyeman, I.S.K. Acquah, Y. Agyabeng-Mensah, E. Afum, D. Faibil, F.A.M. Abdoulaye, " Examining the correlations between stakeholder pressures, green production practices, firm reputation, environmental and financial performance: evidence from manufacturing SMEs" *Sustainable Production and Consumption,* vol. 27, no 1, pp. 100-114, 2021. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.015.

[6] C. Quevedo " Sistema de ventilación de diez kilometros del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Huanza " *Universidad Nacional Mayor de San Marcos,* vol. 1, no 1, pp. 25-29, 2014. https://es.scribd.com/document/416112260/Quevedo-Chaname-Carlos-Manuel-2013-converted-docx

[7] E.T. Asr, R. Kakaie, M. Ataei, M.R.T. Mohammadi, " A review of studies on sustainable development in mining life cycle" *Journal of Cleaner Production*, vol 229, no 1, pp. 213-321, 2019. https:// doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.029

[8] L. Cabernard, S. Pfister, S. Hellweg, " A new method for analyzing sustainability performance of global supply chains and its application to material resources" *Science of The Total Environment,* vol 681, no 1, pp. 164-177. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.434

[9] E. Vargas, “Ventilacion de Minas” *Servivio Nacional de Geología y Minería,* vol. 1, no 1, pp. 1-36. https://issuu.com/isemvirtual/docs/_16__ventilaci_n_en_minas_subterr_n/1

[10] NORMA Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012, "Minas subterráneas y minas a cielo abierto" 2012, https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5272056&fecha=11/10/2012

[11] Manual de minería, estudios mineros del Peru, “Mineria a cielo abierto” 2018. https://issuu.com/isemvirtual/docs/_3__manual_de_miner__a__estudios_mi