

Efecto del flujo variable del aire en la eficiente energética de un sistema centralizado de aire de combustión

Effect of variable air flow on the energy efficiency of a centralized combustion air system

Secundino Marrero-Ramírez¹, Orlando Vega-Areas², Iliana Antonia González-Palau³

Fecha de recepción: 4 de octubre, 2022
Fecha de aprobación: 4 de febrero, 2023

Marrero-Ramírez, S; Vega-Areas, O; González-Palau, I.A. Efecto del flujo variable del aire en la eficiente energética de un sistema centralizado de aire de combustión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 4. Octubre-Diciembre, 2023. Pág. 19-30.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6295>

- 1 Universidad Técnica de Cotopaxi. Carrera Electricidad, Ecuador. Correo electrónico: secundino.marrero@utc.edu.ec
 <https://orcid.org/0000-0001-5161-545X>
- 2 Empresa metalúrgica Ernesto Guevara. Departamento Mantenimiento, Cuba. Correo electrónico: ovarias@ecg.moa.minem.cu
 <https://orcid.org/0000-0001-7483-6335>
- 3 Universidad Tecnológica Indoamerica. Ambato. Ecuador. Correo electrónico: palau.iliana@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-2057-7472>

Palabras clave

Flujo, ventiladores, control, eficiencia energética, motores.

Resumen

En la investigación se analiza como el control manual en el sistema de aire de combustión en hornos de una planta metalúrgica puede generar sobreconsumo de energía, al utilizar la estrangulación de un dámper con el uso de válvulas manipuladas para regular de forma manual el flujo de aire, donde los ventiladores centrífugos del sistema trabajan todo el tiempo a plena capacidad y esto produce pérdidas de energía eléctrica, debido a la dinámica operativa del sistema. La demanda del sistema es variable y su programarla resulta difícil, por ello se evaluó una alternativa que consiste en controlar el accionamiento de los ventiladores a través de variadores de velocidad con un lazo de control proporcional integral que permite establecer el flujo de aire a través de la medición no directa del flujo de aire, utilizando la variable presión para lograr una reducción de la demanda de potencia del 30 % con el sistema de control.

Keywords

Flow, fans, control, energy efficiency, motors.

Abstract

The research analyzes how manual control in the combustion air system in furnaces of a metallurgical plant can generate energy overconsumption, by using the throttling of a damper with the use of manipulated valves to manually regulate the air flow. Where the system's centrifugal fans work all the time at full capacity and this produces electrical energy losses, due to the system's operating dynamics. The demand of the system is variable and its programming is difficult, for this reason an alternative was evaluated that consists of controlling the activation of the fans through variable speed drives with an integral proportional control loop that allows establishing the air flow through non-direct measurement of airflow, using variable pressure to achieve a 30% reduction in power demand with the control system.

Introducción

El proceso de reducción de mineral laterítico en hornos de solera múltiples, es una de las etapas que define la eficiencia metalúrgica en las plantas productora de níquel de tecnología carbonato amoniacal. Aquí la etapa de reducción, libera los óxidos presentes en el mineral alimentado antes de pasar al proceso de lixiviación, donde se precipita el níquel y el cobalto. La planta objeto de estudio presenta un total de 24 hornos, agrupados en tres losas (líneas) donde se requiere un perfil óptimo de temperatura, que puede variar en función de la composición química del mineral y se establece con 10 cámaras de combustión en cada horno, las que en su mayoría trabajan con aireación del 60% por el doble propósito que ellas tienen de establecer el régimen térmico y aportar los agentes reductores H_2 y el CO [1].

El oxígeno de combustión requerido para las cámaras es obtenido en cada losa por 3 ventiladores centrífugos, de los cuales uno siempre se encuentra de reserva, con vista a garantizar en las 24 horas de operación el aire de combustión que se transporta por medio de un ducto colector. El objetivo del estudio es la eficiencia energética del sistema de suministro de aire que realiza el control manual de flujo por medio de un dámper, lo que incide en el consumo de energía de los motores asincrónicos que están acoplados a los ventiladores centrífugos que presentan un caudal de 61200 m³/h, altura de presión 15 kPa y 1709 rev/min. El sistema por lo general

necesita un ventilador a toda capacidad y un segundo ventilador que, de tener el flujo variable, se podría adaptar a las necesidades variables del sistema, ya que todas las cámaras y hornos no se encuentran trabajando en todo momento. Ello nos pone de manifiesto que la demanda de aire al ser variable, requiere de una programación que resulta compleja por el hecho de que la disminución del oxígeno por debajo de lo requerido en las cámaras, podría apagar las mismas y afectar el régimen térmico del horno [1].

La figura 1 muestra la curva característica de un ventilador [2], donde se puede apreciar que no es suficiente conocer el caudal que es capaz de suministrar este a descarga libre (posición a) sin obstrucciones, sino que resulta necesario saber qué caudal se proporciona según sean las distintas pérdidas de carga que este debe vencer, entre las cuales se encuentra el sistema de regulación utilizado para manejar el flujo de aire requerido. Aquí se observa la relación que existe entre las presiones estática (p_e), dinámica (p_d) y total (p_t) de la ecuación (1).

$$P_t = P_e + P_d \quad (1)$$

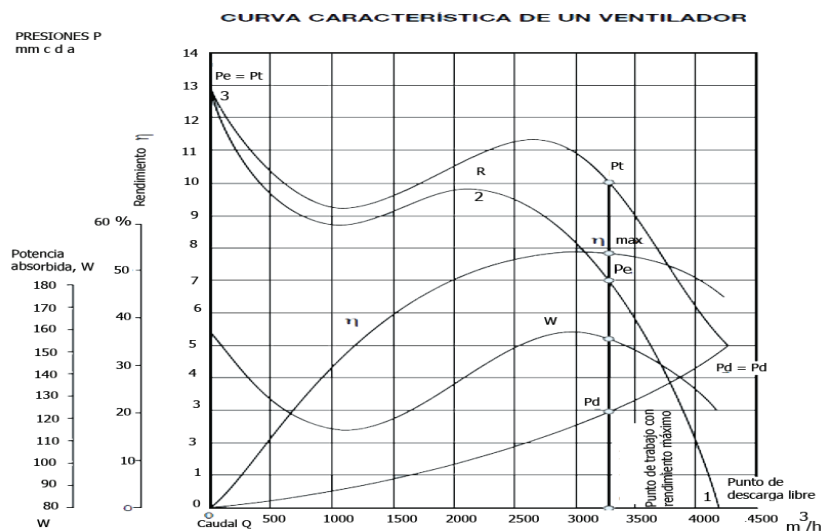


Figura 1. Curvas características de un ventilador. Fuente: [2].

La zona de trabajo idónea de un ventilador se muestra en el tramo 1-2 de la figura 1, mientras que en el intervalo 2-3 su funcionamiento es inestable, el rendimiento desciende de forma rápida y aumenta notablemente el ruido.

La regulación de los ventiladores, principalmente se efectúa mediante el uso de compuertas, By-pass, regulación de velocidad y variación del ángulo del alabe. Seleccionar uno u otro de estos sistemas depende de los criterios de ahorro energético, costo de la inversión, zona de regulación requerida y ruido, entre otros. La regulación con el dámper incide significativamente en la curva de eficiencia del sistema al incrementar la resistencia al flujo de aire y la curva de presión puede ser obtenida con la expresión (2):

$$P = K(FAD)^2 \quad (2)$$

Donde P es la presión requerida para producir un flujo dado en el sistema, K función del sistema que representa la resistencia al flujo de aire y FAD el flujo de aire deseado. En la figura 2 se ilustran las curvas del sistema para distintas posiciones de un dámper a la entrada [3], donde la presión requerida se reduce gradualmente conforme el flujo de aire disminuye y la diferencia que se observa en el gráfico, se puede asociar a la energía desperdiciada.

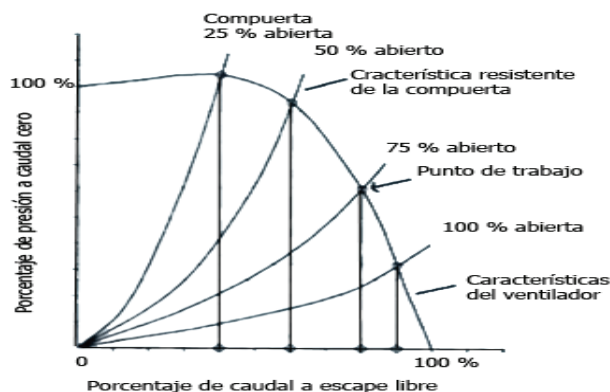


Figura 2. Curvas del sistema para diferentes posiciones de la compuerta. Fuente: [3].

En el análisis del consumo energético de un ventilador centrífugo atendiendo a los distintos métodos de control de flujo de aire, se pone de manifiesto que para el 80% del flujo de aire, se requiere el 97 % de la potencia cuando es utilizado un control de amortiguación y el 80% cuando se utilizan álabes; mientras que al utilizar variador de velocidad se consume alrededor de un 53% [3, 4]. Esta pérdida energética se manifiesta en forma de transferencia de energía mecánica del fluido o energía térmica y puede ser determinada con las expresiones de pérdidas de presión y potencia (3) y (4) respectivamente.

$$P_{CS} = Q_f \Delta_p \quad (3)$$

$$P_{ECS} = Q \Delta_{pCS} / \eta_v \quad (4)$$

En donde P_{CS} es la presión, P_{ECS} potencia de pérdidas, Q_f caudal de aire, η_v rendimiento y Δ_{pCS} la variación de presión. Al seleccionar uno u otro método de regulación también se debe considerar el coste de la dinámica de la demanda de aire que presenta el sistema. En [5] se analizan los diferentes tipos de regulación más usados y las zonas de trabajo recomendadas para cada uno de los sistemas mencionados. Aquí se observa que la regulación de velocidad, posee la ventaja de permitir una mayor zona de regulación, es por ello que en la actualidad el uso de variadores de velocidad, es una de las vías más utilizadas para reducir el consumo de energía eléctrica en el accionamiento de ventiladores en aplicaciones de flujo de aire variable. En [4] se analiza la potencia en un ventilador centrífugo con el uso del convertidor de frecuencia (figura 3), donde se reduce la demanda de potencia en un 30 % con la variación de velocidad de n_1 a n_2 , para disminuir el flujo de aire en un 10 %.

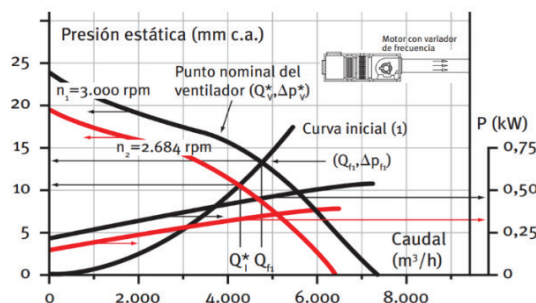


Figura 3. Variación de presión y demanda de potencia con el uso de variador. Fuente: [4].

En el trabajo realizado por [6] se muestra un sistema de monitoreo y control de combustión a través del análisis óptico de la llama en un horno industrial que logra importantes resultados experimentales desde la correlación entre la temperatura calculada a partir del espectro de la llama y la medida en el refractario, donde se aplica un algoritmo de optimización basado en el gradiente conjugado, utilizando la velocidad del ventilador como parámetro a controlar para el incremento de la temperatura en el 10% y la aplicación del variador de frecuencia para la reducción del consumo de energía eléctrica del motor del ventilador.

Materiales y métodos

Los sistemas de combustión en muchos de los procesos industriales representan un núcleo importante en donde el control convencional del comportamiento de la llama a través de la medición de la composición del residuo de gases liberados, presenta un retraso inevitable en el transporte debido a la distancia entre la llama y la muestra de medición [6], lo que adicionalmente presenta otra dificultad asociada al retardo intrínseco en el sensor y ello limita la acción de control con esta variable. En el estudio de un ventilador se considera el diámetro de la hélice, la velocidad de rotación, las presiones, el flujo volumétrico, densidad del gas, potencia absorbida, el rendimiento y el nivel sonoro. Las expresiones para determinar el flujo de aire, presión y potencia se dan a continuación [4, 5].

$$Q_v = Q_{v0} \frac{n}{n_0} \left(\frac{D}{D_0} \right)^3 \quad (5)$$

$$p_r = p_{ro} \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (6)$$

$$P_v = P_{v0} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \left(\frac{D}{D_0} \right)^5 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (7)$$

Dónde Q_v es el flujo volumétrico que mueve el ventilador, p_r presión en el ventilador, P_v potencia que demanda el ventilador, D diámetro de la hélice, ρ densidad del aire y n velocidad del ventilador. A partir de las ecuaciones anteriores es posible determinar la potencia y el flujo de aire a diferencias presiones [7], es así como podemos decir que una pequeña reducción en la velocidad producirá una reducción significativa en el uso de energía, ya que el consumo de energía de un ventilador sigue una "ley cúbica", lo que significa que, al disminuir la velocidad a un 80% del valor máximo, el consumo de energía se reduce aproximadamente en un 50%. El rendimiento (η) del ventilador se define como el cociente entre la potencia que entrega el ventilador al aire (P_{ota}) dividida por la potencia que el ventilador recibe en su eje (P_{otv}), ambas son expresadas a través de la presión total (P_{Total}), el flujo de aire (Q) y la potencia que se consume como se muestra en la ecuación (8):

$$\eta_v = \frac{P_{ota}}{P_{otv}} = \frac{P_{Total} * Q}{P_v} \quad (8)$$

La potencia entregada al aire (P_{ota}) por el ventilador depende del caudal que circula, la presión necesaria para vencer las pérdidas que establece el sistema de conductos y se determina a través de la ecuación (9)

$$P_{ota} = Q h_{TV} g \quad (9)$$

Donde Q es caudal de aire, h_{TV} altura de presión total a entregar por el ventilador y g aceleración de la gravedad. La modelación del sistema de transporte de aire en [8] emplea el método de los volúmenes finitos para evaluar el comportamiento del termofluido dinámico del aire en un sistema de distribución. Donde el sistema de ecuaciones obtenido es el resultado de la aplicación un modelo de turbulencia $k-\epsilon$, el modelo RNG $k-\epsilon$ (renormalización con la teoría de grupo) y el modelo de las tensiones de Reynolds. Esta modelo presenta resultados de interés a considerar durante la modelación de sistemas de transporte de aire. Mientras que en [9] un algoritmo de control para ventiladores auxiliares y extractores en un circuito de ventilación forzada, mejora la velocidad de licuado de los gases presentes en las explotaciones de la minería subterránea para reducir el riesgo generado por los gases, aquí son utilizados diferentes algoritmos de control para el ventilador; como es el caso del controlador de muerte súbita y el control por asignación de polos, utilizando un algoritmo de estimación de parámetros por el método de mínimos cuadrados. Se mejora la eficiencia energética de circuito de ventilación al implementar la estrategia VSD (variable speed drive).

Determinación de parámetros de explotación del sistema

Para evaluar el objeto de estudio a través de la simulación, se realizaron experimentos para identificar el comportamiento de las variables del sistema en diferentes regímenes de operación del sistema, utilizando la información del sistema Scada (CITEC) instalado en la planta, que registra los consumos de energía de los ventiladores. En el trabajo [10] se plantea la regulación de la velocidad en los ventiladores centrífugos con variadores de velocidad, utilizando la presión para controlar el flujo de aire que llega a la red sin establecer el intervalo de trabajo requerido de esta variable, ni los puntos donde se deben realizar las mediciones en la red para poder sintonizar el variador y establecer la relación presión/flujo. Esto limita la propuesta del control automático cuando la demanda de aire no permanece constante en la red que está compuesta por un conjunto de ramales y válvulas [11]. Entonces el análisis de mejoras al sistema, requiere una forma eficiente del control de flujo de aire para la flexibilidad en el manejo del sistema, facilidad de mantenimiento y ahorro en el consumo de energía, a pesar de la complejidad que esto representa en sistema centralizado y ello se consigue con la tecnología VSD. Para evaluar la factibilidad del control de velocidad y el algoritmo de regulación es factible el uso del software MATLAB.

Estudio de caso

En la regulación manual del sistema, las compuertas hacen que el aire tenga un movimiento en más de una dirección y esto genera remolinos que no siempre se desplazan en la misma dirección de los álabes del ventilador, afectando la eficiencia del sistema compuerta-ventilador. Para el abastecimiento del aire en las cámaras combustión de la planta, existen 9 motores asíncronos trifásicos de inducción con las características del cuadro 1 que forman tres grupos de turbo-máquinas para alimentar las tres líneas de producción.

Cuadro 1. Características de los motores.

Características de los motores del accionamiento						
Tipo de motor	Pn; [kW]	Un, V]	In [A]	Conexión	N; r.p.m	F.P
3AFP315M-4	220	440	359	Δ	1775	0.87

La curva característica del ventilador muestra gráficamente las presiones estáticas, que representan las pérdidas de carga totales, dinámicas y el rendimiento mecánico [5], donde esta característica indica la capacidad ventilador en función de la presión que se le exige. Para

definir el punto de trabajo del ventilador es necesario tener la característica de la red de tuberías y seleccionar el valor de la presión del flujo requerido para poder fijar el punto de trabajo del sistema. En la figura 4 se muestra la variabilidad promedio mensual en la operación de las cámaras de combustión durante un año en una línea, comportamiento que al ser analizado durante el día también muestra variaciones de demanda que no se pueden corregir de forma instantánea, ello pone de manifiesto que la demanda de aire a cubrir por los ventiladores es variable al existir un intervalo de 60 a 80 cámaras funcionando por lo general y la regulación manual requiere experticia y no exento del error humano.

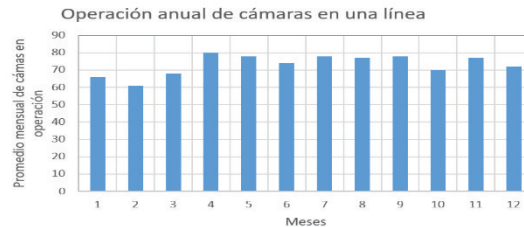


Figura 4. Comportamiento anual de las cámaras de combustión operando.

Análisis del uso de variador de velocidad para el control del flujo de aire.

En la elaboración de la característica resistente del sistema se consideran las pérdidas de carga originadas en el sistema, estas varían proporcionalmente al cuadrado del caudal de aire en los ductos. Por ello en la evaluación del punto de trabajo de un ventilador es necesario disponer de las curvas características del ventilador. [12, 13]. Para definir el flujo de aire del ventilador estudiado en relación al punto de trabajo teórico recomendado, se analizaron las mediciones realizadas por [14] en el colector principal de la planta para los casos en que trabajan 3 y 2 ventiladores en una losa, sin variar el estado de las válvulas de la red, comprobándose la curva experimental para un ventilador que se muestra en la figura 5, donde se considera el punto de operación recomendado de 8.5 m³/s con una presión de 15.8 kPa para obtener el comportamiento de la presión.

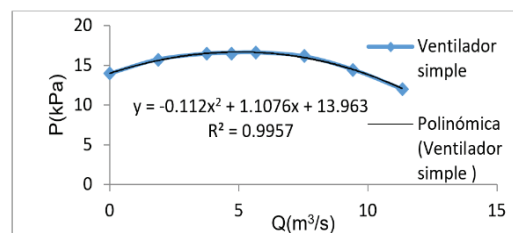


Figura 5. Curva característica de un ventilador del sistema.

Para establecer la relación entre presión, flujo de aire y potencia del sistema, se realizaron mediciones en diferentes puntos de la red y así determinar las presiones de trabajo que permiten el buen funcionamiento de las cámaras de combustión, acorde con el balance de oxígeno requerido en los quemadores de combustión. Se utilizó un medidor de presión SIEMENS, modelo SITRANS con lectura digital y rango de medición de 1 a 2.56 mbar para el registro de las caídas de presión que permitieron realizar el balance de energía de Bernoulli desde la salida, para la operación de uno y dos ventiladores, hasta la entrada de las cámaras de combustión de los hornos [14]. En el análisis del punto de operación se consideraron las

curvas del ventilador-red de la figura 6, que fueron verificadas en el sistema con diferentes pruebas en la operación de dos y tres ventiladores para realizar ajustes en el sistema y definir los parámetros de operación asociados con la presión de la red con el caudal de aire necesario.

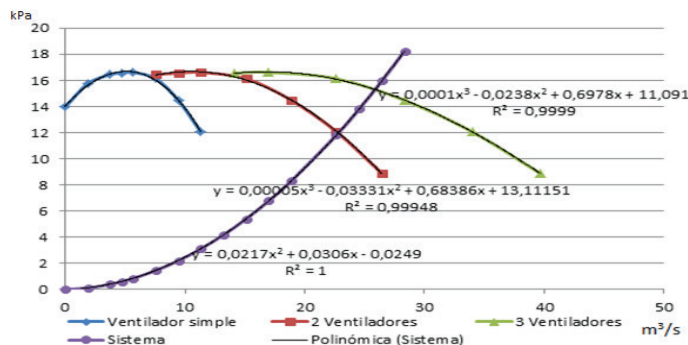


Figura 6. Curva característica de los ventiladores acoplados al sistema.

Entonces, si utilizamos unas de las curvas características del ventilador (PHE-1525/100-100s) instalado en la planta para definir el punto de trabajo en uno de los ventiladores del sistema, se observa que en el régimen nominal para un ventilador trabajando con la regulación del dámper, se entrega un flujo de aire que está en el orden de los 8.5 m³/s, lo que equivale a una demanda de potencia de entrada del ventilador de 180 kW. Si tenemos en cuenta que el balance del flujo teórico total de aire requerido cuando funcionan todas las cámaras en una losa [14], es de aproximadamente 50752,64 m³/h (14.1 m³/s) a una presión de 12.06 kPa y la capacidad máxima de dos ventiladores es de 81540 m³/h (22,65 m³/s), entonces podemos deducir, que el dámper debe regularse para entregar el 62.2% de la capacidad total, manteniendo la demanda de potencia cercana a la nominal, debido al tipo de regulación existente. Por ello se evaluó la regulación del ventilador por el método de la variación de velocidad para determinar las reservas de consumo de energía existente en función de la demanda de potencia requerida. También fue necesario evaluar la relación existente entre el flujo de aire y la potencia de consumo durante la operación de dos y tres ventiladores, donde se consideró el rango de trabajo actual del sistema y se pone de manifiesto una relación lineal entre estas variables que favorecen el uso del control planteado [11] al lograrse un estadístico R 0.9. En necesario señalar que los experimentos se realizaron en condiciones de producción de la planta y por ello no era admitido realizar cambios muy significativos alejados del punto de operación que afectarían la producción.

En las mediciones del consumo de energía de los ventiladores se aprecia que el valor promedio requerido de potencia de un ventilador está en el intervalo de 165 kW a 180 kW para su trabajo en régimen continuo, esto nos permite conocer la energía promedio desperdiciada en un día de funcionamiento que podría ser reducida considerablemente con el cambio en el sistema de control, si tenemos en cuenta que dos ventiladores se encuentran trabajando por 24 horas al día durante casi todo el año.

Se debe señalar que las reservas de energía en el sistema pueden ser superiores, si se optimiza el flujo requerido por el sistema a través de un algoritmo de pronóstico basado en minería de datos que permita establecer la demanda de aire con el resultado de la medición del flujo en tiempo real, usando la presión como variable de salida para establecer el flujo requerido [14].

Se utilizan los datos de [14] para poder establecer los modelos dinámicos del sistema y conocer la función de transferencia para relacionar potencia de consumo y la presión en el ducto. Se utilizó el Identi de software Matlab, donde se obtuvo la función de transferencia de primer orden que se muestra en la ecuación (10) para un ajuste (FIT) de 90 %.

$$G1 = \frac{0.04}{1 + 0.0015S} \quad (10)$$

De igual manera para poder establecer la viabilidad del control de flujo desde la medición de presión se graficaron ambas variables en la figura 7 (a) y a partir de estos datos se estableció la función de transferencia que relaciona el caudal y la presión en el ducto para la operación de los dos ventiladores. La función fue obtenida con un ajuste de 78.54 % que para fines de control es aceptable y se muestra en la en figura 7 (b), donde se realiza la comparación de la presión de salida con los datos y los valores obtenidos en el modelo de la función de transferencia de la ecuación 11.

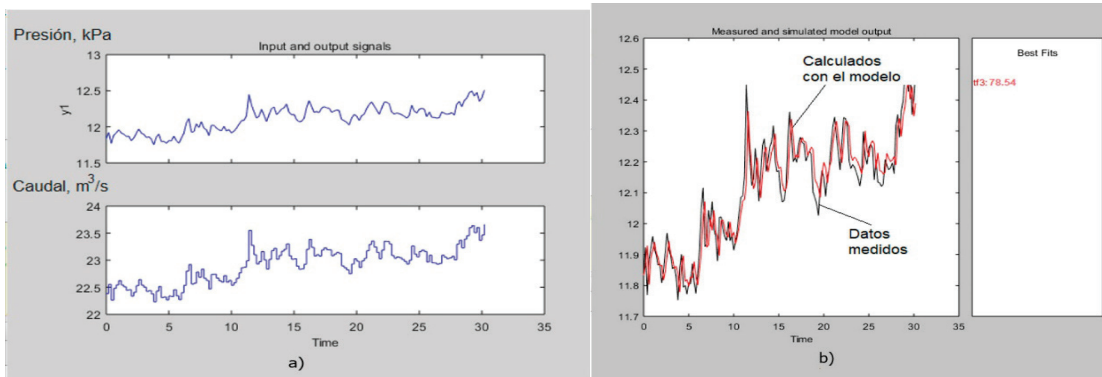


Figura 7. Mediciones de caudal y presión durante la operación de dos ventiladores (a) y comparación del ajuste del modelo con la data de medición de presión (b).

$$G2 = \frac{537.3S^2 + 434.1S + 165.3}{S^3 + 1292S^2 + 1061S + 312.1} \quad (11)$$

También se realizó una simulación para evaluar el lazo de control, utilizando el esquema mostrado en la figura 8, donde el ajuste de la velocidad requerida se realiza mediante un variador de control directo par - flujo (DTC) con un regulador proporcional integral derivativo (PID) para establecer las diferentes demandas de flujo de aire. En el sistema de control se consideran los estudios realizados por [12], donde se determinaron las características de la red para hallar el punto de trabajo de los ventiladores y se hace un análisis de la efectividad que tiene el uso de algoritmos de regulación para controlar un ventilador centrífugo con variador de velocidad, donde se muestra la viabilidad en la regulación con un controlador PID atendiendo a perturbaciones asociadas a variaciones en el torque.

Las variaciones en la densidad del aire, debidas a cambios de temperatura, presión atmosférica y humedad, son pequeñas y no se consideran en la simulación. Mientras que la relación presión/ flujo es utilizada en las diferentes velocidades para la tarea del controlador.

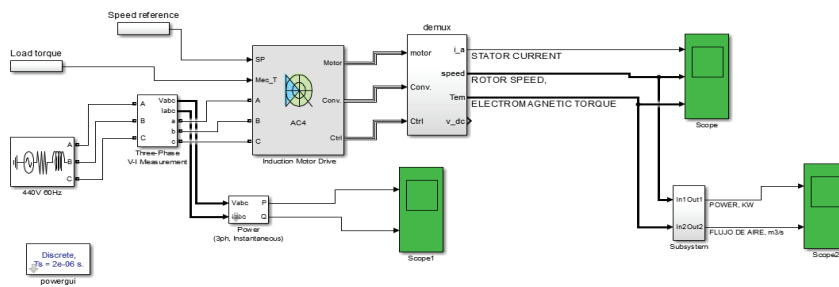


Figura 8. Simulación del accionamiento motor – ventilador con variador de velocidad.

Como se puede apreciar en la figura 9, durante la simulación se reduce la velocidad en 50%, 60% y 70 % y se obtienen reducciones de potencia en 55%, 46% y 37 % respectivamente. Se consideran dos valores de variación del torque de carga como perturbación para verificar el desempeño del controlador (figuras 9 y 10).

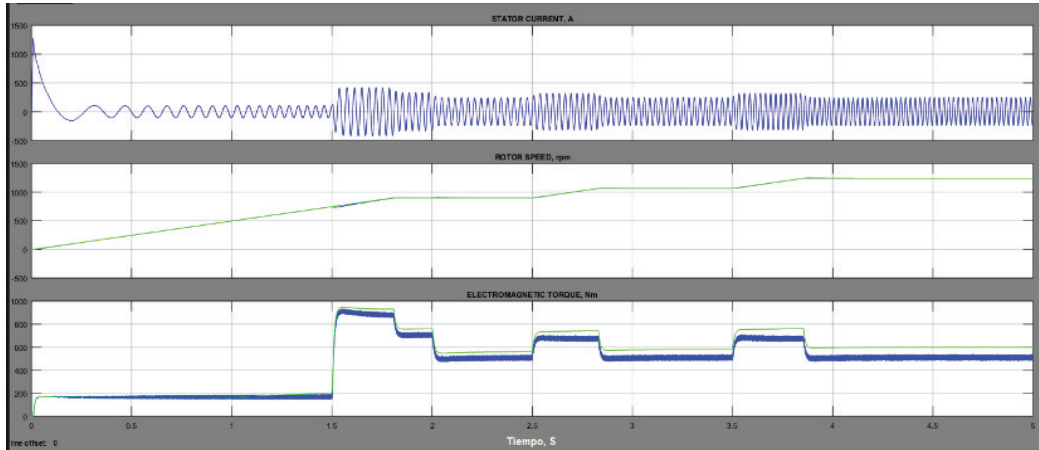


Figura 9. Variaciones de la velocidad y torque en el sistema.

Los resultados de la variación de flujo de aire son mostrados en la figura 10, donde se observa el comportamiento del sistema cuando la reducción del flujo de aire es del 53 %, lo que disminuye la potencia del sistema en un 46% con un tiempo de asentamiento y un error estacionario favorable. Para seleccionar los criterios de simulación se han considerado los resultados de [11, 16, 17].

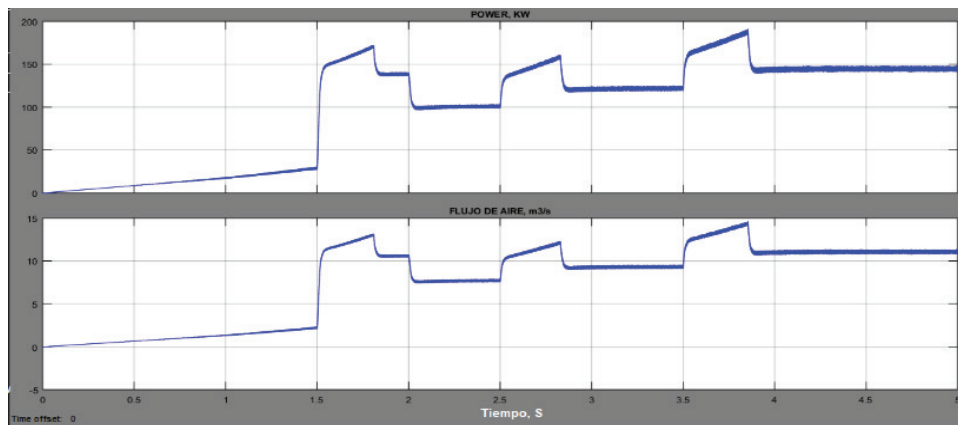


Figura 10. Variaciones de potencia y el flujo de aire con el uso de variador de velocidad.

Resultados

Al evaluar la reserva de energía se verifican los resultados ya obtenidos en un banco de prueba experimental por [10, 18, 19]. En la simulación del sistema de control con el controlador PID, se estabiliza el flujo de aire en función de la demanda, con valores despreciables de sobre impulso en presencia de variaciones del torque como perturbación del 10% de incremento. Como se quiere considerar la presión para la variable de control, aquí se han establecido variaciones a través del torque equivalente y esto es posible debido a la relación existente entre estos parámetros, siempre que no varí el estado de apertura de las válvulas y demás accesorios

de la red que podrían conllevar a variaciones en el sistema. La simulación nos muestra que podemos fijar los valores de velocidad del ventilador en función de la demanda de flujo del aire con vista a incrementar la eficiencia energética de este sistema para reducir las pérdidas de energía en valores superiores al 30 %, esto coincide con los resultados obtenidos en los trabajos [19, 20] en relación al control de flujo y el empleo del convertidor de frecuencia para el control en cargas cuadráticas, esto produce un importante ahorro de energía con valores máximos que pueden llegar al 60 % [21].

El lazo de control puede suplir las dificultades del control manual, al poder variar en línea la velocidad requerida del ventilador atendiendo a los hornos y cámaras que están operativos en cada momento, la productividad que se fija en estos y la operación del control de temperatura en las cámaras.

Conclusiones

Debido al régimen de trabajo de la planta con una dinámica variable en el funcionamiento de las cámaras de combustión y los hornos, se justifica el control automático para establecer la relación flujo de aire/presión requerida y lograr el uso racional de la energía en los ventiladores.

En el sistema actual de regulación del flujo de aire en la planta se presentan reservas de energía en valores superiores al 20% en relación al uso de un variador de velocidad para establecer el flujo de aire requerido. El uso del controlador PID para regular el flujo de aire con la relación flujo/presión existente a la salida en del ducto colector del sistema, puede ser utilizada para reducir el consumo de energía en el accionamiento de los ventiladores. El uso de técnicas heurística en el pronóstico de demanda podría representar una oportunidad más de mejora en el sistema

Referencias

- [1] A. Rojas, M. Magaña, A. Riverón. "Lixiviación carbonato amoniacal: estimación del níquel disuelto en el efluente de destilación". Revista de Metalurgia, vol. 55, no 3, pp. 149, 2019. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.149>
- [2] S & P. "Ventiladores". [En línea]. Disponible en: <https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/1259/6572/6641/79352.pdf>, [Último acceso 2022].
- [3] Rockwell Automation Chile. "Cómo lograr eficiencia de operación y energía con variadores de velocidad". [En línea]. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2305&ni=como-lograr-eficiencia-de-operacion-y-energia-con-variadores-de-velocidad>. [Último acceso 2022].
- [4] Guía técnica. "Selección de equipos de transporte de fluidos". Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid, España: IDEA, 2012
- [5] S. Escoda S.A. "Manual Práctico de Ventilación". (2010). España: S&P, [En línea]. Disponible en: <https://www.salvadorescoda.com/tecnico/VE/Manual-Ventilacion.pdf>
- [6] H. Garcés et al., "Modeling optical variables in combustion processes by Hammerstein-Wiener systems", in IEEE ICA/ACCA2021, Chile, pp. 1–6, March 2021.
- [7] "El ahorro de energía en bombas y ventiladores". InfoPLC. Net, 2012 [En línea]. Disponible en: <https://www.infoplcn.net/documentacion/21-motion-control-motores/1569-el-ahorro-de-energia-en-bombas-y-ventiladores>. [Último acceso: 2022].
- [8] C. Rodríguez et al., "Análisis numérico del comportamiento del aire en un sistema de distribución de aire acondicionado empleando los modelos de turbulencia k-f, rng k-f y el modelo de las tensiones de Reynolds". Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 16, no. 2, pp. 370-382, 2008.
- [9] M. Nova, R. Moreno. "Diseño y construcción de un prototipo para el estudio de estrategias de control aplicadas a la ventilación en la minería subterránea". Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, 2015.
- [10] M. Pilatásig et al., Evaluación Energética en Motores de Inducción en el Accionamiento de Ventiladores Centrífugos. Revista Técnica "Energía", vol. 11, no1, pp. 85-91, 2015.

- [11] E. Santana et al., Propuesta de control eficiente del aire de combustión en una planta de hornos de reducción. Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, vol. 1, no 15, pp. 43-52, 2016
- [12] Prior Industries Australia PTY LTD. "Energy solutions: Curves". (2008). Sydney, Australia. [En línea]. Disponible en: www.priorindustries.com. [Último acceso: 2022].
- [13] Nicotra Gebhardt S. A. (2020). "Ventiladores Centrífugos", Waldenburg, Alemania. Edición I. [En línea] Disponible en: <https://www.nicotra-gebhardt.com/de/>
- [14] O. Vega. "Evaluación de los parámetros operacionales del suministro de aire de combustión en los Hornos de Reducción". Trabajo de fin de Maestría. Dpto. Eléctrica, Universidad de Moa, Holguín, 2015.
- [15] L. Peñalba, J. Pardo. Gestión Energética de los motores eléctricos: Mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad," AEDIE, España, pp. 8, 2005. [En línea]. <http://aedie.org/9CHLIE-paper-send/237-mantilla.pdf>
- [16] L. Flórez. Simulación por software de las curvas generadas en ventilación mecánica por control de presión. Rev. Umbral Científico, no 9, pp. 85-96, 2006
- [17] González J. et al. "Modelo numérico para estudio del flujo en un ventilador centrífugo de pequeñas dimensiones", presentado en XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Dpto. Energía. Universidad de Oviedo, España, Nov. 3-5, 2010, pp. 5-10
- [18] A. Lencinas. "Control de velocidad V/HZ bidireccional de un motor de inducción monofásico utilizando MC68HC908MR32", en XXII Congreso Argentino de Control Automática, AADECA, Buenos Aires, Argentina, Sep. 1-2, 2010.
- [19] G. Bosch et al., "Programador Lógico para control de potencia. I Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa" (SIIO 2018), Universidad de Palermo, Argentina, 2018, pp. 175-187.
- [20] E. Santana et al. The Applied Artificial Intelligence to the Control Electronics Improving the Energy Efficiency of Ventilation Systems in the Industry. Journal BJSTR, vol. 25, no 5, pp. 19527- 19536, 2020.
- [21] D. Montero, O. Vega, E. Santana. "Modelación del sistema de ventilación en hornos de reducción para mejorar la eficiencia energética en la industria del níquel", en III Congreso MANTENERG. Habana, Cuba, Jun. 18-22, 2018.