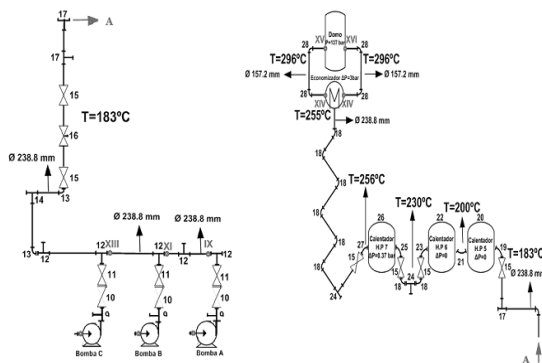


Uso de variadores de frecuencia reduce el 9% del consumo energético anual en los equipos de bombeo de una central termoeléctrica

YUNIEL DELGADO-SANTANA*
JOSÉ PEDRO MONTEAGUDO-YANES**
MARCOS CONSUEGRA-URQUIZA***
JULIO RAFAEL GÓMEZ SARDUY****

Resumen

Los equipos de bombeo que integran el sistema de agua alimentar de una central termoeléctrica consumen el 55 % del insumo eléctrico total de la planta. El presente estudio posibilitó obtener la característica hidráulica del sistema de tuberías y el efecto que la regulación de capacidad por estrangulamiento tiene sobre el consumo de potencia y la eficiencia energética. Se valoró el uso de variadores de frecuencia en la regulación de la capacidad del sistema de agua alimentar, lo cual puede reducir en un 9 % el consumo anual de energía eléctrica. Ello equivale a una reducción



(*) Calle Villuenda. N° 89, entre Colón y San Pedro. Palmira, Provincia Cienfuegos, Cuba. Correo electrónico: admenes@pa.cf.rimed.cu.

(**) Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez". Carretera a Rodas km. 3. Cuatro Caminos. Cienfuegos. CP 55469. Provincia Cienfuegos, Cuba. Correo electrónico: jpmnyanes@ucf.edu.cu.

(***) Central Termoeléctrica "Carlos M. de Céspedes". Carretera O' Bourke. N° 914. Cienfuegos. CP 55469. Provincia Cienfuegos, Cuba. Correo electrónico: mmcqrquiza@ucf.edu.cu.

(****) Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez". Carretera a Rodas km. 3. Cuatro Caminos. Cienfuegos. CP 55469. Provincia Cienfuegos, Cuba. Correo electrónico: jgomez@ucf.edu.cu.

Fecha de recepción: 26/11/2014 – Fecha de aceptación: 02/02/2015..

de 1 863 MWh/año. La inversión a realizar en tres variadores de frecuencia es de \$ USD 1 170 000, con un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de cinco años y un Valor Presente Neto (VPN) de \$ USD 1 613 142, considerando un período de vida útil de los equipos de 25 años.

Palabras clave: variadores de frecuencia, bombas centrífugas, ahorro de energía.

Abstract

The pumping equipment making up the water feeding system of a power plant consumes 55% of the total electric energy input of the plant. This study allowed obtaining the hydraulic characteristic of the piping system and the effect that capacity regulation supply system was evaluated. This can reduce 9% of annual electricity consumption. This means a reduction of 1863 MWh/year.

The investment to be made in three frequency converters is \$ 1 170 000 USD with a payback period of the investment (PRI) of five years, and Net Present Value (NPV) of USD \$ 1 613 142, considering a useful life period of equipment of 25 years.

Keywords: variable frequency drives, centrifugal pumps, energy saving

1. Introducción

El uso de variadores de frecuencia en los sectores industriales que requieren regular la capacidad en sus procesos productivos, constituye una tendencia actual. Esto se ve incentivado por la disminución del precio de los variadores de frecuencia en el mercado internacional, la reducción del consumo energético que traen consigo y el incremento de la eficiencia energética en las líneas de producción.

El empleo de variadores de frecuencia aumenta el período entre mantenimientos del sistema mecánico, producto de la suavidad de las cargas de arranque y el cambio de velocidad con que trabaja el sistema.

La gran diversidad de variadores de frecuencia propicia que los métodos tradicionales

de regulación empleados hasta el presente cedan lugar, dado que los rangos de capacidades de estos equipos hoy cubren niveles de potencia que van desde decenas de kW hasta valores superiores a los 100 MW.

En la central termoeléctrica estudiada, se emplea la regulación por estrangulamiento para variar la capacidad de los equipos de bombeo del sistema de agua alimentar. Estos equipos consumen el 55 % del insumo eléctrico de la unidad generadora y se considera que una de las vías para reducir el insumo eléctrico, es sustituir el método de regulación de la capacidad por estrangulamiento por el empleo de variadores de frecuencia.

2. Desarrollo

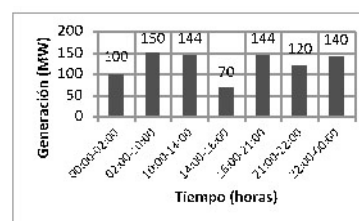
2.1 Variaciones de la generación de energía y niveles del insumo eléctrico de la central termoeléctrica

La central termoeléctrica objeto de estudio es una de las encargadas de llevar la frecuencia del Sistema Electroenergético Nacional (SEN). Cuando la demanda del sistema empieza a disminuir, las centrales termoeléctricas más ineficientes salen del sistema y se presentan cargas variables según la demanda de los consumidores.

Con el objetivo de obtener la variación de la característica hidráulica del sistema de tuberías, ante las variaciones del régimen de operación de la central termoeléctrica, se hizo necesario determinar las variaciones medias de las cargas a lo largo del año.

En la Figura 1 se muestran las cargas promedio de generación para un día típico del año en estudio.

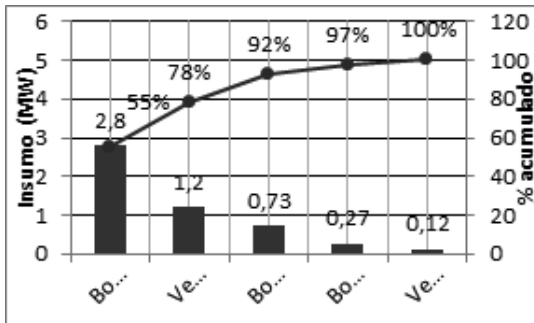
Figura 1. Potencia de generación para un día típico del año en estudio



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento del insumo por equipos en el año 2013. Como se aprecia en dicho esquema, las bombas de agua de alimentar representan el 55 % del insumo total de la unidad de generación. Es necesaria una reducción de la energía eléctrica utilizada por estos equipos, con el propósito de disminuir el insumo de la planta.

Figura 2. Insumo eléctrico en equipos con mayor consumo de la unidad de generación. Año 2013

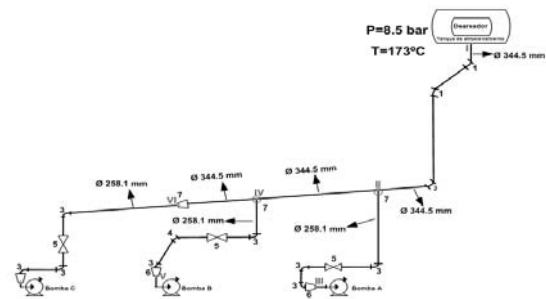


Fuente: elaboración propia.

2.2 Esquema técnico del sistema de tubería de las bombas de agua de alimentar

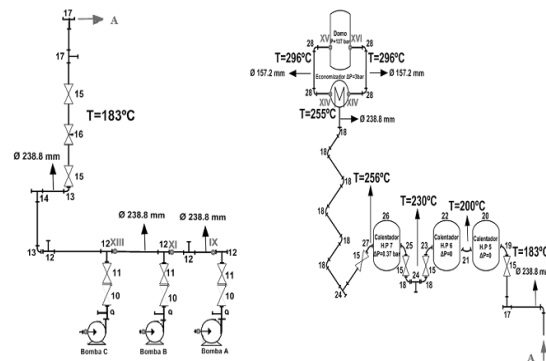
El sistema de agua alimentar de la unidad de generación está compuesto por tres bombas centrífugas conectadas en paralelo, de 1 850 kW de potencia cada una. En operaciones normales, dos están en funcionamiento y una se encuentra de reserva. Estas bombas se surten desde el deareador y, además, en el sistema de tubería se encuentran válvulas de compuerta, codos, calentadores de alta presión, *tees*, válvula de aguja reguladora de flujo, economizador, reducidos y válvulas de retención. En las Figuras 3 y 4 se muestran los esquemas de las tuberías de succión y descarga, respectivamente; ellos serán utilizados para obtener la característica hidráulica del sistema de tuberías.

Figura 3. Esquema de la tubería en la succión de la bomba



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Esquema de la tubería en la descarga de la bomba



Fuente: elaboración propia.

2.3 Característica hidráulica del sistema de tuberías

Para determinar la característica hidráulica del sistema de tuberías, se emplea la ecuación 1:

$$\frac{P_1}{\rho H_2O * g} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} + H_b = \frac{P_2}{\rho H_2O * g} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2 * g} + \sum_i^2 h_f \tag{1}$$

Donde:

P.- Presión manométrica en los depósitos de succión y descarga, respectivamente (Pa).

P.- Densidad del fluido (kg/m3).

Z.- Altura geométrica del nivel del líquido de los depósitos de succión y descarga, con respecto al nivel cero de referencia (m).

g.- Aceleración gravitacional (m/s2).

∑hf.- Sumatoria de las pérdidas de energía por fricción en los accesorios y tuberías (m).

v.- Velocidades del fluido en las regiones de succión y descarga (m/s).

2.4 Obtención de la característica hidráulica del sistema de tuberías

En la Tabla 1, se muestran los parámetros del sistema de tubería en la succión y en la descarga. En la tubería de descarga se trabaja con valores de pérdidas en el economizador y en el calentador de alta presión n.º 7. En los calentadores n.º 5 y 6, la caída de presión es despreciable por sus bajos valores, comparados con la alta carga estática que produce la presión de operación del generador de vapor. Para obtener las curvas del sistema a diferentes capacidades, fueron utilizadas las condiciones establecidas en las Figuras 3 y 4.

Las bombas de alimentación de agua, que van al generador de vapor, tienen la función de succionar el agua almacenada en el tanque del deareador y proporcionar la presión suficiente para que circule, a través de los calentadores de alta presión n.º 5, 6 y 7, el economizador, y, finalmente, penetrar al domo de la caldera. En las Tablas 2 y 3 se muestran las especificaciones técnicas de la bomba y el motor, respectivamente.

Con los datos de las cargas obtenidos por las diferentes regulaciones realizadas al sistema, se alcanza la característica hidráulica del sistema de tuberías, como se expone en la Figura 5. En ella se observa, además, la variación de las características hidráulicas del sistema de tuberías, al regular la capacidad por estrangulamiento, y la variación de las características de cargas hidráulicas de la bomba, al regular por variación de frecuencia (ver Figura 5).

Tabla 1. Parámetros de operación del sistema de agua alimenta

Succión	Descarga
$Q_{\max} = 718 \text{ m}^3/\text{h} (0.1994 \text{ m}^3/\text{s})$	
$P = 8,5 \text{ bar} (8,5 * 10^5 \text{ Pa})$	$P = 137 \text{ bar} (137 * 10^5 \text{ Pa})$
$T_{\text{agua}} = 173 \text{ }^\circ\text{C} (446 \text{ K})$	$T_{\text{agua promedio}} = 237 \text{ }^\circ\text{C} (510 \text{ K})$
$Z_1 = 24,60 \text{ m}$	$Z_2 = 36,30 \text{ m}$
$\rho: 890,5 \text{ kg/m}^3$ (Incropera & Dewitt, 1996)	$\rho: 818,3 \text{ kg/m}^3$ (Incropera & Dewitt, 1996)
$\mu: 1,52 * 10^{-4} \text{ N*s/m}^2$ (Incropera & Dewitt, 1996)	$\mu: 1,13 * 10^{-4} \text{ N*s/m}^2$ (Incropera & Dewitt, 1996)
	$\Delta P_{\text{Calentador } \gamma}: 0,37 \text{ bar} (4,60 \text{ m})$
	$\Delta P_{\text{Economizador}}: 3 \text{ bar} (37,40 \text{ m})$
Caudal de operación a 150 MW	$Q = 653 \text{ m}^3/\text{h}$
Caudal de operación a 144 MW	$Q = 627 \text{ m}^3/\text{h}$
Caudal de operación a 140 MW	$Q = 610 \text{ m}^3/\text{h}$
Caudal de operación a 120 MW	$Q = 520 \text{ m}^3/\text{h}$
Caudal de operación a 100 MW	$Q = 451 \text{ m}^3/\text{h}$
Caudal de operación a 70 MW	$Q = 300 \text{ m}^3/\text{h}$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Especificaciones de la bomba de alimentación (Domech, 1978)

Parámetros	Magnitud y unidades
Tipo	Barril horizontal de etapas múltiples
Número de etapas	9
Capacidad	290 ton/h
Flujo mínimo	100 ton/h
Presión de descarga	160 kg/cm ²
Presión de succión	10 kg/cm ²
Temperatura del agua de alimentar	177,9 °C
Flujo de calentamiento	2,5 m ³ /h
Velocidad	3 570 rpm

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Especificaciones del motor de accionamiento de la bomba de alimentación (Domech, 1978)

Parámetros	Magnitud y unidades
Potencia	1 850 kW
Velocidad de rotación	3 570 rpm
Voltaje	6 000 V
Corriente	220 A
Frecuencia	60 Hz
N.º de polos	2

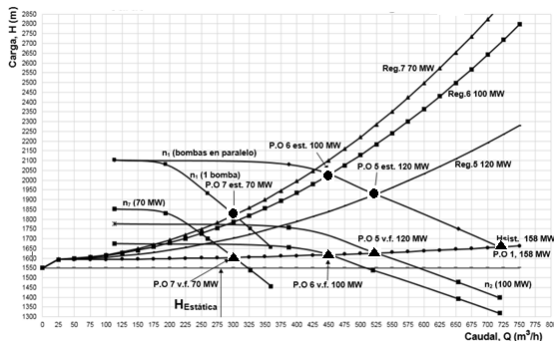
Fuente: elaboración propia.

Los puntos de operación para los diferentes métodos de regulación de caudal, están dados por:

Triángulos negros (▲) con las siglas (v.f) para la regulación por variación de frecuencia.

Círculos negros (●) con las siglas (est.) para la regulación por estrangulamiento.

Figura 5. Características hidráulicas del equipo de bombeo - sistema de tubería con regulación por estrangulamiento y variación de frecuencia



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 4 recoge los parámetros de operación obtenidos a partir de la característica hidráulica del sistema de tuberías, en el cual se muestra el ahorro de potencia que se origina utilizando la regulación por variación de frecuencia ante la regulación por estrangulamiento.

Tabla 4. Reducción del consumo de potencia (N_u), producto de la regulación por variación de frecuencia ante la regulación por estrangulamiento

Parámetros de operación (PO) (carga MW y caudal m³/h)	Parámetros	Regulación por estrangulamiento	Regulación por variación de frecuencia
P. O 1 (158 MW, 719 m³/h)	H (m)	1 656	1 656
	N_u (kW)	2 772	2 772
P. O 2 (150 MW, 653 m³/h)	H (m)	1 749	1 642
	N_u (kW)	2 659	2 496
P. O 3 (144 MW, 627 m³/h)	H (m)	1 780	1 639
	N_u (kW)	2 598	2 392
P. O 4 (140 MW, 610 m³/h)	H (m)	1 820	1 644
	N_u (kW)	2 585	2 335
P. O 5 (120 MW, 520 m³/h)	H (m)	1 927	1 631
	N_u (kW)	2 333	1 974
P. O 6 (100 MW, 451 m³/h)	H (m)	2 027	1 618
	N_u (kW)	2 128	1 699
P. O 7 (70 MW, 300 m³/h)	H (m)	1 819	1 603
	N_u (kW)	1 270	1 119
ΔN_u (150 MW estrangulamiento vs. v. frecuencia)		163 kW	
ΔN_u (144 MW estrangulamiento vs. v. frecuencia)		206 kW	
ΔN_u (140 MW estrangulamiento vs. v. frecuencia)		250 kW	
ΔN_u (120 MW estrangulamiento vs. v. frecuencia)		359 kW	
ΔN_u (100 MW estrangulamiento vs. v. frecuencia)		429 kW	
ΔN_u (70 MW estrangulamiento vs. v. frecuencia)		151 kW	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Energía útil entregada por las bombas al fluido

Parámetros de operación (PO) (carga MW y tiempo horas)	Regulación por estrangulamiento (Energía kWh)	Regulación por variación de frecuencia (Energía kWh)
P. O 2 (150 MW, 8 horas)	21 272	19 968
P. O 3 (144 MW, 9 horas)	23 382	21 528
P. O 4 (140 MW, 2 horas)	5 170	4 670
P. O 5 (120 MW, 1 hora)	2 333	1 974
P. O 6 (100 MW, 2 horas)	4 256	3 398
P. O 7 (70 MW, 2 horas)	2 540	2 238
Total (día)	58 953 kWh/día	53 776 kWh/día
Δ Energía/día (ahorro)	5 177 kWh/día	
Total (año)	21 093 480 kWh/año	19 359 360 kWh/año
Δ Energía/año (ahorro)	1 863 720 kWh/año	

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 5 se muestra la energía entregada por la bomba al fluido al emplear los dos métodos de regulación. Se aprecia un ahorro de energía anual de 1 863 MWh/año.

El porcentaje de ahorro de energía en un año, que se obtiene al emplear la regulación por variación de frecuencia, se determina según la Ecuación 2.

$$\% \text{ Ahorro(año)} = \frac{\text{Energía}_{\text{estrang}} - \text{Energía}_{\text{v.frecuencia}}}{\text{Energía}_{\text{estrang}}} * 100 \quad (2)$$

Sustituyendo valores en la ecuación (2).

$$\% \text{ Ahorro(año)} = \frac{1\,863\,720 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{21\,093\,480 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}} * 100 = 9\% \quad (3)$$

Se aprecia que el empleo de variadores de frecuencia logra una disminución anual de un 9 % del consumo de energía que realizan las bombas de agua alimentar.

2.5 Análisis de factibilidad económica del empleo de variadores de frecuencia

En la Tabla 6 se muestra el precio de los variadores de frecuencia a utilizar, así como sus costos de mantenimiento, operación y vida útil.

Tabla 6. Precio de variador de frecuencia a utilizar (1850 kW)

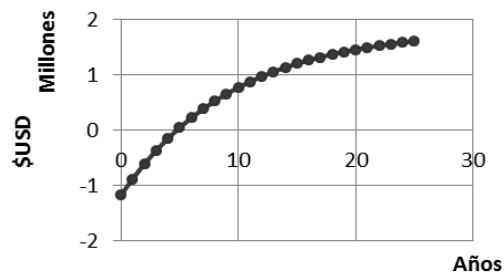
Equipo	Variador de frecuencia
Cantidad	3
Precio unitario	390 000
Precio total	1 170 000
Vida útil (años)	25

Fuente: Óscar Vidal (2014).

En la Figura 6 se muestran los parámetros económicos del uso de los variadores de frecuencia.

Se pone de manifiesto un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de cinco años, con un Valor Presente Neto (VPN) de \$ USD 1 613 142, en una vida útil de los equipos de 25 años. Hay que enfatizar que este es un equipo auxiliar de regulación de la capacidad y no constituye en sí un equipo imprescindible del proceso.

Figura 6. Comportamiento del VPN durante la vida útil de la inversión



Fuente: elaboración propia.

3. Conclusiones

- Es factible económicamente la implementación de variadores de frecuencia para regular la capacidad del sistema de agua alimentar que posee la unidad de generación de la central termoeléctrica.

- Se obtiene la característica hidráulica del sistema de tuberías de agua alimentar que no existe en la planta y que permitió determinar los ahorros originados al comparar la regulación de la capacidad por estrangulamiento y la regulación por variación de frecuencia.

- La inversión a realizar para la implementación de tres variadores de frecuencia –encargados de regular la capacidad del sistema de las bombas de agua alimentar– es de \$ USD 1 170 000, con

un período de recuperación de la inversión de cinco años y un Valor Presente Neto (VPN) de \$ USD 1 613 142, en una vida útil de los equipos de 25 años.

- La regulación de la capacidad por variación de frecuencia genera una reducción del consumo de energía eléctrica anual de 1 863 MWh, lo que significa la reducción de un 9 % del consumo energético. Se estima una reducción de 1,3 toneladas de CO₂ emitido a la atmósfera.

Referencias

Domech, F. (1978). *Unidad japonesa 169 MW, turbina y equipos auxiliares*. La Habana.

Incropera, F. & Dewitt, D. (1996). *Introduction to heat transfer*. 3ra ed. Nueva York: Jhon Wiley & Sons.

Vidal, Ó. (2014). *Costo de adquisición y mantenimiento de variadores de frecuencia de 1.8 MW* [Entrevista personal al Jefe Energético de la Empresa Cemento Cienfuegos].

Visitas Técnicas. (2008). *Bombas centrífugas*. [2008, Septiembre 21]. Recuperado de <http://visitastecnicas2008instrumentacion.blogspot.com>