

Reducción del ruido en puntos de desfogue en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Carlos A. Miranda Herrera

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto, Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26.5, Mexicali, B.C. México. Correo: carlos.miranda02@cfe.gob.mx

Resumen

En el campo geotérmico de Cerro Prieto sólo existen silenciadores de vapor en el sistema de regulación de las plantas generadoras, pero no en los sitios de desfogue de vapor a alta presión en los vaporductos (discos de ruptura). Además, los silenciadores de las plantas son muy robustos y su capacidad de reducción del ruido depende de un factor externo no controlable, como es el tamaño del poro de la roca volcánica con el que están contruidos. Por lo tanto, se diseñó un silenciador metálico compacto, económico y relativamente fácil de fabricar, para utilizarse en diversos puntos de descarga de vapor seco a fin de minimizar el ruido. El diseño se realizó con base en las ecuaciones de la placa de orificio. Se construyó un prototipo cuyas pruebas demostraron que es capaz de reducir el ruido hasta en 30 decibeles, al descargar desde la presión de operación de vapor primario hacia la presión atmosférica. Las dimensiones del silenciador pueden ajustarse a las necesidades particulares de cada caso de desfogue.

Palabras clave: Desfogues, discos de ruptura, placas de orificio, ruido, silenciadores, vapor geotérmico.

Noise reduction in steam-vent points at the Cerro Prieto geothermal field, BC

Abstract

Steam silencers have been placed on the power units regulation system of the Cerro Prieto geothermal field, but not where the steam-pipes vent high-pressure steam (rupture disks). Moreover, the power-unit silencers are large and their abilities to reduce noise depend on an external, uncontrollable factor: pores sizes in the volcanic rocks they are made of. Thus a compact, economic and relatively easy to construct metallic silencer was designed to be used at several points of dry-steam venting to minimize the noise. The design was based on orifice-plate equations and a prototype was constructed and tested. It proved capable of reducing noise by 30 decibels for atmospheric discharges of primary steam at operating pressures. The size of the silencer can be adjusted to the particular needs of each vent case.

Keywords: Noise, geothermal steam, rupture-disks, silencers, steam-vents.

1. Introducción

El sonido se propaga en ondas planas progresivas que se mueven a través de un medio elástico, como lo es el aire. La causa física que lo determina es la vibración de este medio, lo cual explica por qué el sonido no se puede propagar en el vacío al no haber un medio continuo por el cual desplazarse (Cuenca y Gómez, 1996; Knapp *et al.*, 2001; Hubner and Wittstock, 2001).

La velocidad de la onda sónica depende de la temperatura y de la densidad del medio, siendo mayor a medida

que estas aumentan. La amplitud indica el nivel del sonido y es directamente proporcional a la frecuencia. Las ondas del sonido, al ir chocando con otras moléculas, van perdiendo energía y se van debilitando hasta desaparecer (Cuenca y Gómez, 1996).

Si el sonido es muy fuerte y no resulta agradable al oído humano se le considera ruido. El oído humano escucha frecuencias de 1000 a 2000 Hertz (Hz) y niveles entre 0 y 120 decibeles (db), siendo 0 el umbral de la audición y 100 el umbral de dolor. Las altas frecuencias están generadas en el rango audible. Los ruidos graves van de 20 a 300 Hz, los medios de 300 a 2000Hz y los agudos de 2000 a 20 000Hz. Con el aumento de la frecuencia disminuye la vibración, pero las pulsaciones de baja frecuencia suelen ser destructivas (Lazalde and Cabtree, 1985; Robert, 1975; Welty *et al.*, 1984).

En el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, existen dispositivos amortiguadores del ruido, llamados genéricamente silenciadores. Hay diversos tipos de silenciadores en funcionamiento, principalmente en el sistema de regulación de las plantas generadoras. Pero no hay silenciadores que amortigüen el ruido que se genera cuando operan los sistemas de seguridad conocidos como discos de ruptura a lo largo de las tuberías conductoras de vapor. Cuando ocurre un exceso de presión en estas tuberías, la presión se libera mediante el rompimiento del disco de alto o bajo rango, generándose también una emisión de ruido, la cual no ha sido debidamente tratada para reducirla hasta niveles inofensivos. Estas zonas de desfogue de vapor a alta presión han estado poco atendidas en lo que a la emisión de ruido se refiere, debiendo tenerse en cuenta que el ruido que provocan los desfogues de vapor seco es más intenso que el provocado con vapor de baja calidad, es decir vapor con humedad.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es presentar el procedimiento para construir un silenciador de vapor de alta calidad basado en las ecuaciones de placa de orificio, pero adaptado a una placa de orificios múltiples. Este silenciador funciona bajo el principio de reducción de presión para disminuir el ruido provocado por la descarga.

El proyecto incluye el diseño de un sistema para reducir el ruido que ocasiona la liberación de vapor a la atmósfera, por medio de un silenciador de vapor que cumpla con la meta de proteger el oído del trabajador, pero que además satisfaga los requisitos siguientes:

- Capaz de trabajar en condiciones rudas.
- Larga vida útil.
- Alta resistencia a las incrustaciones, al óxido y a las altas presiones y temperaturas.
- Construido con materiales básicos comunes y económicos

Incluye también la construcción de un prototipo y la realización de pruebas iniciales en pozos con diferentes presiones en el campo geotérmico de Cerro Prieto, a fin de instalar eventualmente un silenciador estándar

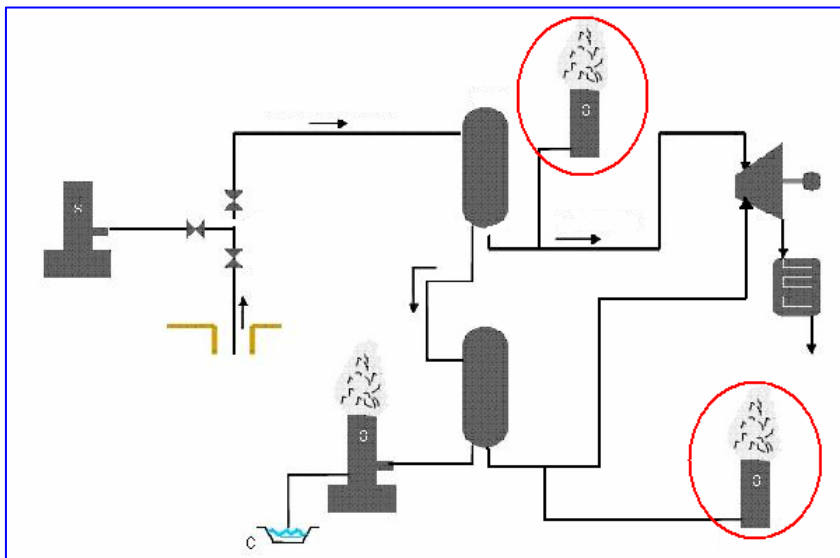


Fig. 1. Instalaciones superficiales en Cerro Prieto

para desfogue de vapor en cada una de las zonas del campo.

En principio, los sitios donde se propone utilizar el silenciador son los discos de ruptura de alto y bajo rango ubicados en los equipos superficiales de las plataformas de los pozos productores y de las islas del campo de Cerro Prieto (Fig. 1).

3. Placas de orificio

Las placas de orificio son más que un pedazo de acero con un agujero en el centro. Son dispositivos de precisión de grado industrial capaces de producir medidas precisas y repetibles.

El diseño propuesto para el silenciador está basado en las ecuaciones de la placa de orificio. La placa de orificio es una placa delgada que puede ser unida entre dos tuberías. Como su geometría es simple, resulta ser de bajo costo y fácil de instalar o reemplazar, además de que el borde filoso del orificio no se incrustará.

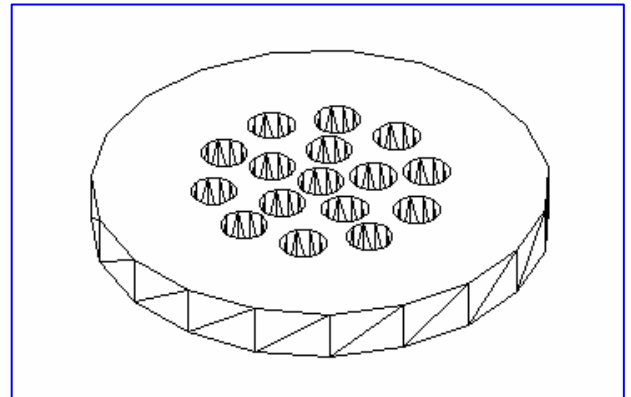


Fig. 2. Placa de orificios múltiples

Ya que el ruido es producido por el choque del vapor a alta presión con la atmósfera, el principio del silenciador es ir reduciendo paulatinamente la presión a lo largo del cuerpo hasta descargar a la presión atmosférica utilizando placas de multiorificio (Fig. 2) para dividir un flujo grande y difícil de manejar en varios flujos pequeños.

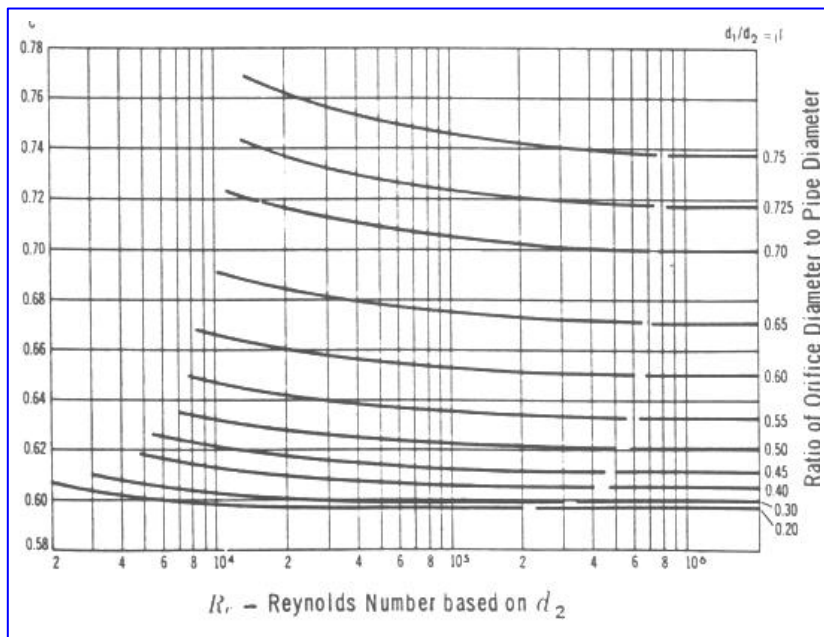


Fig. 3. Obtención del coeficiente de flujo "C" a partir de la relación de orificios β y el número de Reynolds (Tomado de Crane, 1981)

Para el diseño de placas de orificio se requiere conocer la presión que se tiene aguas arriba y el diámetro de la tubería, principalmente para poder definir la relación de orificios β , que es la relación entre el orificio de la placa y el diámetro de la tubería (Crane, 1981).

Con esos datos se puede obtener el coeficiente de flujo C por medios gráficos, a partir de la relación de orificios β y el Número de Reynolds (Fig. 3), lo cual evita la necesidad de calcular la velocidad.

Con base en ello, se obtiene la diferencia de presión en la placa por medio de la ecuación:

$$\Delta P = \left(\frac{q}{YCA} \right)^2 \frac{\rho}{2g * 144} \quad (1)$$

En esa ecuación, Y es el Factor de Expansión Neta, el cual es función de la relación de calor específico k , la relación de orificios β y la relación entre la presión absoluta aguas abajo y la presión absoluta aguas arriba, como se puede apreciar en la Figura 4. Por su parte, A es el área del orificio, g es la gravedad y Q es el flujo

volumétrico (Crane, 1981).

Sin embargo, para la primera iteración se deberán buscar las pérdidas por cabeza h_L en la tubería para encontrar un valor cercano de β y de C por medio de un Valor Constante Mínimo Requerido, $k_{Requerido}$. Al tener este valor, se tratará de acercarse a un valor de β por medio de la ecuación de la Constante del Orificio ($k_{Orificio}$):

$$k_{Requerido} = \frac{2gh_L}{v^2} \quad (2)$$

$$k_{Orificio} = \frac{(1 - \beta^2)}{(C^2 * \beta^4)} \quad (3)$$

Donde v es la velocidad del fluido en la tubería aguas arriba.

El orificio restringe el flujo y entrega un diferencial de presión proporcional al cuadrado del flujo. La placa de orificio universal es de diseño circular, su diámetro exterior es uniforme para la apreciación de presión en cualquier tamaño de tubo.

Al reducir el diámetro se incrementa ΔP . Para condiciones dadas de presión, temperatura, caudal y densidad, se requiere una caída de presión determinada pero se desconoce el diámetro del orificio de la placa. Para ello:

- a) Se selecciona el diámetro de tubo.
- b) Se supone un diámetro de orificio para la placa.
- c) Se calcula el área del orificio.
- d) Con el diámetro del tubo y del orificio se calcula β .
- e) Se obtiene el coeficiente C por medios gráficos (Fig. 3).
- f) Se selecciona Y a partir de C , β y la relación de la presión, para una $k=1.3$ para vapor de agua (Fig. 4).
- g) Se calcula la relación de presiones y la relación crítica de presiones:

$$r_p = \frac{(P_2 - P_1)}{P_1'}$$

$$r_c = \frac{P_2'}{P_1'}$$

(4)

h) Con la fórmula corregida de Darcy para placas se calcula ΔP , que debe ser igual a la deseada.

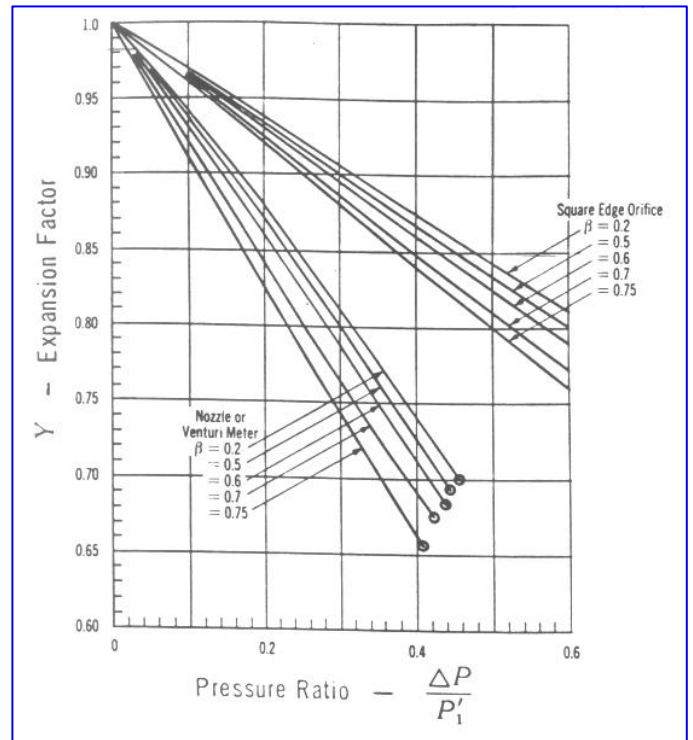


Fig. 4. Obtención del factor de expansión “Y” a partir de la relación de orificios β y la relación de presión, para una $k=1.3$ (Tomado de Crane, 1981)

i) Se calcula la velocidad en el orificio para asegurarse de que esta no llega a la velocidad sónica:

$$v = \frac{q}{A} \quad (5)$$

donde:

v = Velocidad del fluido en el conducto.

A = Área de un conducto.

q = Caudal.

j) Se calcula la velocidad máxima permisible en el tubo, la cual es la velocidad sónica:

$$v_s = \sqrt{kgRT} \quad (6)$$

Una vez que se ha disminuido la presión se tiene que proceder a disminuir la velocidad. La única forma de frenar el fluido es dividiéndolo a través de diferentes conductos que tengan una misma área transversal o haciéndolo pasar por ampliaciones de área.

Cabe hacer notar que la presión no se divide al dividir el flujo. La única forma de disminuir la presión es por medio de restricciones, además de que la presión ya ha sido llevada a los parámetros necesarios por medio del agujero concéntrico en la placa de orificio. El caudal se dividirá proporcionalmente al número de conductos, pero la velocidad no lo hará ya que la velocidad varía de acuerdo a la ecuación 5.

Aunque se reduzca el caudal entre los diferentes conductos, también es necesario disminuir el área de circulación de flujo al restringirlo a los conductos, lo que provocará una nueva aceleración. La velocidad será igual para cada conducto.

La masa se divide equitativamente entre el número de orificios.

k) Una vez realizada la primera iteración se debe verificar que la diferencia de presión en la placa sea la que se desea. Si no lo es, se deberá realizar una corrección de la relación de orificios β hasta llegar a la presión deseada. Todo esto se hará asegurándose de que la velocidad nunca llegue a ser sónica, ya que a mayor velocidad más crítica se vuelve la zona de mezcla en función del choque de los dos medios diferentes (vapor y aire). Si se trabaja cerca del flujo sónico la frecuencia tiende a volverse aguda (Crane, 1981; Streeter y Wylie, 2000; Mataix, 1982).

De esta forma, la placa de orificio debe cumplir con tres condiciones:

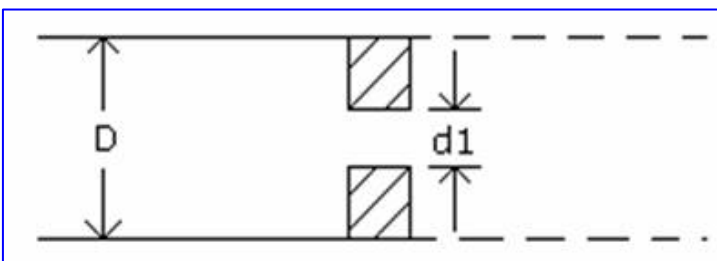


Fig. 5. Bordes de los orificios de la placa

- el fluido nunca debe acelerarse hasta el flujo sónico,
- la caída de presión deseada debe estar dentro de los límites de la relación de orificios β contra coeficientes de flujo C ,
- y la relación de presiones en las caras de las placas nunca debe ser mayor a la seleccionada antes de la primera iteración, ya que al identificar las presiones de entrada y de salida deseadas automáticamente se asignan

propiedades termodinámicas al fluido, propiedades que cambiarán si la diferencia de presión en las caras es mayor.

Para tener un diferencial de presión mayor en la placa, los orificios deben tener bordes afilados a ambos lados de la placa (Fig. 5), a fin de evitar que la presión se recupere.

Con base en la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía no se crea ni se destruye sino sólo se transforma, se puede deducir que la energía potencial (presión del vapor) se transforma en energía cinética (velocidad del vapor) debido a la reducción de área. Esto provoca un campo de distorsión a mayor altura cambiando el ruido de una frecuencia aguda a una grave (menos destructiva).

Además, es importante tener en cuenta los siguientes efectos en la placa:

- La obstrucción o el bloqueo pueden causar errores.
- Los bordes mellados o desafilados introducen un error del 1 al 10%.
- Los dobleces o deformaciones usualmente son resultado de condiciones de flujo que rebasan las condiciones de diseño. Cuando el placa se deforma (Fig. 6) el orificio se agranda (cambia la relación β) y puede producir hasta un 6% de error en el flujo.
- La placa también puede sufrir dobleces o flexiones si se opera justo arriba del punto de diseño, lo que cambia la relación β . El error puede ser hasta del 20%.
- La presencia de desechos y lubricantes en la cara del placa aguas arriba puede producir errores de hasta un 15%, llegando a incrustar la superficie de la placa aguas abajo, lo que contribuye con un 5% de error.

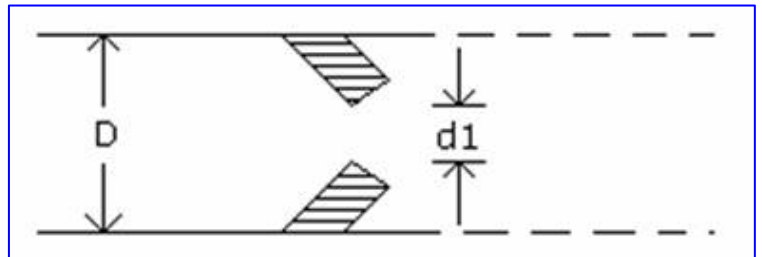


Fig. 6. Deformación de la placa

4. Diseño del silenciador y construcción del prototipo

Los aspectos que se consideraron para el diseño del silenciador son los siguientes:

- El flujo se distribuye uniformemente a través de las placas de orificio.
- Los orificios se consideran independientes uno del otro.
- El sistema se considera isotérmico.
- La densidad del fluido aumenta a la salida de cada placa por la disminución de presión y temperatura del vapor.
- La relación de orificios nunca debe ser tan pequeña que se alcance el flujo sónico.
- Los bordes en ambos lados de las placas deben estar afilados.
- Por la tubería fluirá sólo vapor seco.
- A mayor número de orificios por placa, mayor será la reducción de ruido.
- La distancia entre placas es la que impone la vena contracta (uniformidad del flujo).
- No perforar orificios concéntricos dentro de la placa de orificios múltiples.
- La entrada del vapor al cuerpo del silenciador deberá ser tangencial (Miranda, 2002).

A la salida de cada orificio se creará una especie de vórtice que chocará en forma plástica con los otros vórtices generados por los orificios adyacentes. La fuerza de colisión es proporcional a la aceleración del fluido la cual a su vez está dada por el tamaño de los orificios, de acuerdo a las igualdades siguientes, en las que F es la fuerza, P la presión, A el área, m la masa y a la aceleración:

$$F = P * A$$

$$F = m * a$$

Por lo tanto: $P = ma / A$

Sin embargo, se decidió no tomar en cuenta para los cálculos de diseño esa reducción de presión a la salida de la placa debida al choque elástico del vapor, porque es un valor pequeño comparado con las presiones que se manejan aguas arriba y aguas abajo de la placa.



Fig. 7. Prototipo del silenciador propuesto.

Otro factor que se dejó de lado es la reducción de ruido debido a la humedad y el viento, por no ser factores constantes. Se prefirió utilizar los valores críticos de diseño sin corrección por factores externos, como podría ser una estructura cercana a la ubicación del silenciador que pudiera funcionar como amortiguador.

Adicionalmente, las dimensiones y características críticas son las siguientes:

- El calibre del orificio.
- El espesor del filo del orificio.
- El filo a la entrada del orificio.
- El carácter plano y liso de ambas caras de la placa y de sus superficies (Miranda, 2004).

Bajo esas bases se construyó un prototipo del silenciador en el área de Ingeniería y Diseño de la Residencia General de Cerro Prieto (Fig. 7).

Para su fabricación se utilizaron tubos sobrantes y placas excedentes, sin que fuese necesario adquirir materiales específicos para el efecto. El mismo personal de mantenimiento del campo geotérmico practicó los orificios y realizó las soldaduras, por lo que la inversión total es mínima. Carece de partes móviles y puede augurársele una larga vida útil.

El prototipo se sometió a diversas pruebas, observándose que es capaz de reducir el ruido hasta en 30 decibeles.

Además, se comparó la presión de diseño y la presión real de operación del silenciador, obteniéndose un error de $\pm 0.46662\%$. Esto valida la efectividad de utilizar las ecuaciones de la placa de orificio para el diseño del equipo. La tendencia indica que a mayor número de orificos se estandariza el error lo que permite colocar un factor de ajuste a los cálculos y tener valores más acertados (Fig. 8).

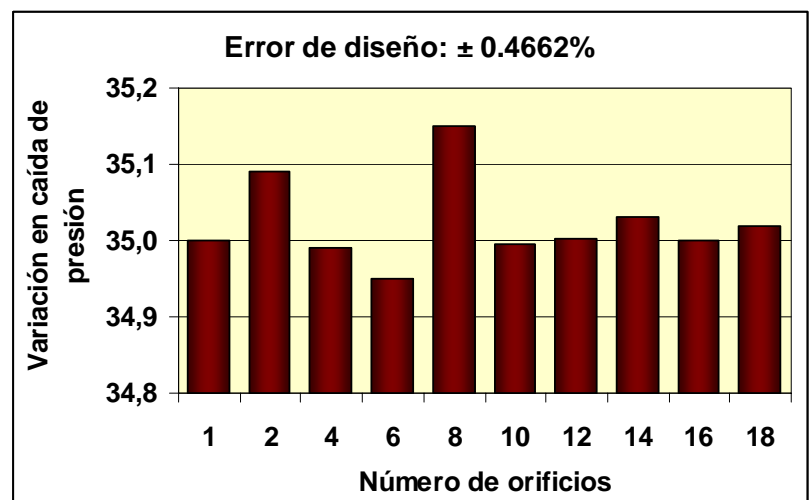


Fig. 8. Comparación entre número de orificios y variación en la caída de presión en la placa

Las condiciones de presión y temperatura varían sustancialmente en las diversas zonas del campo geotérmico, lo que afecta el módulo de elasticidad del acero y el factor de compresibilidad del

vapor, que son factores muy importantes para el desempeño del silenciador. Por ello se propone construir un modelo estándar para cada zona del campo, que responda a sus condiciones particulares.

El silenciador puede fabricarse con las dimensiones adecuadas al espacio disponible en los sitios donde planea instalarse. No hay problemas de diseño para hacerlo. La única limitación de diseño es no poder acercarse a grandes velocidades del vapor, es decir, no tener grandes caídas de presión, lo que limita el número de orificios.

5. Conclusiones y recomendaciones

Se diseñó un silenciador para desfuegos de vapor en vaporductos, con base en las ecuaciones de la placa de orificio. Es un silenciador con placa multiorificio cuyo prototipo se fabricó con materiales excedentes disponibles en el campo geotérmico de Cerro Prieto, y cuyas dimensiones pueden ajustarse al espacio disponible en el sitio donde se instalará. En pruebas realizadas en el campo, el silenciador fue capaz de reducir el ruido hasta en 30 decibeles.

La instalación y uso de este equipo proporcionará mayor seguridad a los trabajadores en el momento de realizar maniobras cerca de los discos de ruptura en vaporductos, lo que a mediano y largo plazo se reflejará en una menor cantidad y gravedad de accidentes de trabajo, así como menos enfermedades e incapacidades por problemas auditivos. Además, reducirá en general la emisión de ruido en el campo geotérmico.

El silenciador también puede utilizarse en sitios de desfogue de las centrales generadoras o en otros campos geotérmicos. Adicionalmente, podría ser sometido a un proceso para obtener su patente y ser eventualmente comercializado por la CFE.

Referencias

- Crane, 1981. *Flow of fluids through valves, fittings, and pipe*. Technical paper No. 410. 20th Printing, Engineering Division of the Crane Company, 122 pp.
- Cuenca, David I., y Juan E. Gómez, 1996. *Tecnología básica del sonido*. Ed. Paraninfo, Madrid, 115 pp.
- Hubner, G. and V. Wittstock, 2001. Investigations of the sound power of aerodynamic sources as a function of static pressure. *Internoise 2001*, Paper Number 685, Session A9-3.
- Knapp, Y., E. Bertrand and A. Buffel du Vaure, 2001. Experimental determination of wave equation source terms for aeroacoustic theories. *Internoise 2001*, Paper Number 444, Session A9-3.
- Lazalde, H. and Crabtree, 1985. Design of steam silencers for geothermal applications. *Geothermics*, V. 14, No. 2/3, p. 335-341.
- Mataix, Claudio, 1982. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ed. Harla, México, 660 pp.
- Miranda Herrera, C.A., 2002. Análisis y diseño de un silenciador de vapor. Tesis de Licenciatura, UABC, Facultad de Ingeniería. Inédito.
- Miranda Herrera, C.A., 2004. Diseño y manufactura de un silenciador de vapor. Tesis de Maestría, UABC, Facultad de Ingeniería. Inédito.

Robert, Josse, 1975. *La acústica en la construcción*. Ed. Gustavo Gili, SA, Barcelona, 291 pp

Streeter, Victor L., y E. Benjamin Wylie 2000. *Mecánica de fluidos*. Ed. McGraw-Hill, México, 9a. edición, 740 pp.

Welty, James R., Charles E. Wicks y Robert E. Wilson, 1984. *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. Ed. Limusa, México, 832 pp.