

VIBRACIÓN Y RUIDO EN VACÍO DE SIERRAS CIRCULARES COMERCIALES. Víctor Poblete, Jorge P. Arenas, E. Millar. Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile. Casilla 567, Valdivia, Chile. R. Ríos. I.M.P.T., Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile.

INTRODUCCIÓN

Los estudios relacionados a sierras circulares han venido publicándose continuamente hasta hoy desde hace casi cinco décadas (Foyster, 1947). De estos estudios ha surgido una base de información que permite esperar mejores condiciones de operación y trabajo, en aserraderos e industrias en los que se utilizan estas herramientas.

Hoy existen respuestas para aquellos problemas de vibraciones en una sierra circular en rotación. Se pueden prevenir por medio de una apropiada fabricación de alta calidad, un buen mantenimiento y montaje, en que se eviten velocidades críticas de rotación y se empleen collarines grandes y bien construidos.

En materia de ruido en vacío producido por una sierra circular se han descrito explícitamente dos mecanismos de radiación. Uno debido a una respuesta forzada o resonante de la sierra, y otro causado por la interacción del aire turbulento y el área periférica de la sierra. Se habla muchas veces de ruido aerodinámico para referirse exclusivamente al ruido asociado a una sierra en vacío, esto es, rotando libremente en su plano, excluyendo la respuesta resonante.

El sonido de tono puro radiado por una sierra resonante se ha vinculado directamente a los modos naturales de vibrar de la sierra. Esta relación se puede ilustrar al comparar un espectro de vibración y un espectro de ruido para una sierra resonante en vacío.

El ruido aerodinámico se caracteriza en su espectro de frecuencia por un "peak" relativamente ancho con una frecuencia central que crece al subir la velocidad de rotación.

En la literatura existente sobre este tema, se ha llegado a establecer que el modelo de fuente de ruido aerodinámico es dependiente de un exponente de la velocidad periférica de la sierra. El Nivel de Presión Sonora debiera aumentar teóricamente 18 dB por cada duplicación de la velocidad de rotación. El modelo idealizado de fuente de ruido depende del diseño de la sierra, incluyendo la geometría de los dientes. La desviación de la ley teórica de 18 dB por cada duplicación, es atribuida a la especificación de la fuente de sonido y del receptor. Esto es, si el tamaño de la fuente es grande o pequeño, comparado con la longitud de onda del sonido en cuestión.



Si es pequeño, tiene sentido imaginar que el sonido viene desde una fuente y considerar las características de la fuente. Pero, si la región de fuentes no es pequeña comparada con la longitud de onda, existe la probabilidad que efectos de difracción, los cuales determinan que el acoplamiento de la fuente al sonido radiado, sea tan importante que ellos dominen el problema. Es probable que este sea el caso, en aspectos fundamentales del ruido de sierras circulares. Los exponentes de la velocidad periférica reportados en la literatura se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1
VARIACIÓN DEL EXPONENTE N DE LA VELOCIDAD PERIFÉRICA

Referencia	Exponente n
Bies, 1992	5,25
Cho & Mote, Jr., 1979	4,9 - 6,0
Stewart, 1978	5,6
Martin & Bies, 1992	4,9 - 5,5
Mote, Jr. & Zhu, 1984	5,37
D'Angelo III et al., 1985	4,9 - 5,6
Leu & Mote, Jr., 1984	4,65 - 6,0
Reiter & Keltie, 1976	5,0 - 5,6

En el presente trabajo, la dificultad lógica asociada a realizar comparaciones experimentales con más de un parámetro en sierras circulares disponibles comercialmente, condujo a seleccionar un grupo de trece diferentes sierras circulares, típicas de uso comercial. A tres de éstas se les modificó su geometría en taller, en orden a poder obtener un conjunto más amplio de sierras y de esta manera evaluar experimentalmente mayores alternativas de diseño. La sierra en operación normal, por supuesto, vibrará y aquella vibración es importante al momento de establecer el nivel y carácter del sonido. Por esta razón no se amortiguó ninguna de las sierra de prueba utilizadas.

El estudio de las vibraciones se realizó con el propósito de medir las frecuencias naturales en sierras estacionarias y las frecuencias resonantes en sierras rotatorias. Con ellas se intentó poder establecer relaciones entre los parámetros geométricos y de operación. Finalmente, algo importante que observar en casi la gran mayoría de estos estudios, es que sus hipótesis han sido puestas a prueba en discos circulares con cortes en la periferia, sierras artificiales con contorno en forma de espiral y empleando variados modelos de dientes y grandes espesores de las sierras. Sin embargo, estos resultados obtenidos pueden no llegar a ser aplicables a cualquier sierra real. Además, en Chile no se fabrican sierras circulares, todas son importadas, cualquier posibilidad de modificar aspectos de las sierras es descartado inicialmente. Como usuarios y no como fabricantes, se realizó una investigación con el objetivo de estudiar las fuentes de ruido que producen contaminación acústica en sierras circulares comerciales disponibles en el comercio

local. Se desarrollaron experimentos de vibración y de ruido, en una cámara anecoica diseñada y construida exclusivamente para este trabajo, sobre un conjunto de sierras clasificadas en grupos de acuerdo a su diámetro, espesor, número de dientes, altura de dientes y área de dientes.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es analizar los mecanismos generadores de ruido en sierras circulares en vacío. Para clarificar las fuentes fundamentales de ruido, se desarrollaron experimentos de vibración y de ruido en una cámara anecoica que permite suponer condiciones de campo libre, es decir, un medio en el cual todas las paredes absorben la energía sonora incidente, no permitiendo al sonido reflejado interferir en el campo acústico directo emitido por la sierra circular en vacío. Esta condición fue válida en todo el rango de frecuencias a medir.

MATERIAL Y MÉTODO

Para desarrollar las mediciones de vibraciones y de ruido emitidos por una sierra circular en vacío, fue necesario contar con dos condiciones mínimas que les dieran validez:

- 1) Condiciones de campo libre. Esto es un medio libre de reflexiones, de tal manera que todas las mediciones correspondan al sonido directo emitido por la fuente de ruido, y no a una superposición del sonido directo y el reflejado por las superficies adyacentes.
- 2) Condición de bajo nivel de ruido de fondo. Esto se refiere a un medio donde el ruido medido no sea afectado por otras fuentes secundarias produciendo interferencia en las mediciones.

Con estos requerimientos se diseñó un laboratorio para llevar a cabo las mediciones. Éste consistió en una cámara anecoica, un motor de velocidad variable, un convertidor de frecuencia que conectado a un motor eléctrico permite variar la velocidad del motor en un rango determinado, transductores para recepcionar las señales acústicas y vibratorias, un sistema de adquisición de datos por medio de una tarjeta conectada a un computador personal y un programa de análisis.

Las dimensiones de la cámara anecoica fueron 2,5 m x 3,0 m x 2,2 m. El material absorbente interno de la cámara anecoica, compuesto de cuñas de espuma flexible de poliuretano, eliminó el sonido reverberante por encima de una frecuencia de corte de 160 Hz, aproximadamente. Fuera de esta cámara se ubicó el motor eléctrico para minimizar su contribución al ruido interior de la sala. Un eje portasierras se introdujo a la cámara

anecoica por medio de un filtro cilíndrico plástico, concéntrico al eje. Este eje permitió unir el motor eléctrico al extremo donde se ubicó cada sierra circular. Las sierras se fijaron en el eje mediante dos anillos rígidos llamados habitualmente, collarines. Las mediciones acústicas se desarrollaron por medio de un micrófono de condensador de diámetro 12,7 mm (Brüel & Kjaer). Las posiciones en las cuales se ubicó el micrófono de medición se muestran en la figura 1. La vibración de las sierras se midió con un transductor de desplazamiento de no contacto fijo al piso de la sala. Este transductor permaneció cercano a la superficie de la sierra a una distancia constante de 1,5 mm, aproximadamente. Las señales de vibración y ruido fueron digitalizadas por una tarjeta conversora A/D y procesadas por una tarjeta DSP instalada en el computador personal. La señal captada por el micrófono fue ingresada a un sonómetro (Brüel & Kjaer) y luego de la salida AC de éste, la señal se envió a la tarjeta A/D, para su posterior proceso de análisis.

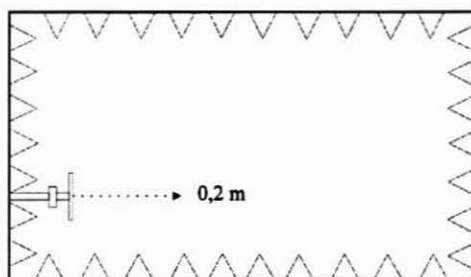
En los Cuadros 2 y 3, son resumidas las características geométricas de cada una de las sierras y los grupos de estudio. Las velocidades a las cuales fueron probadas estas sierras variaron entre 1.000 rpm hasta 3.000 rpm, aproximadamente. Esto corresponde a un rango de velocidad periférica del orden de 10-52 m/s, dependiendo del radio de las sierras. Así, las sierras fueron evaluadas en un rango de velocidades de operación encontradas en la práctica.

Cuadro 2
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS SIERRAS CIRCULARES

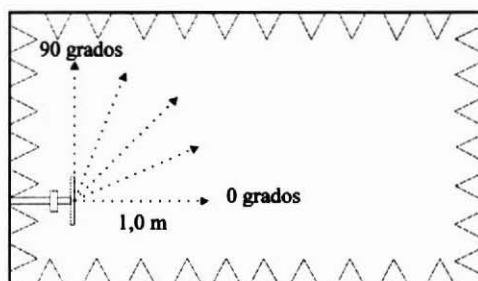
Sierra	Diámetro mm	Espesor mm	No de dientes	Altura dientes mm	Área dientes $\times 10^{-5} \text{ mm}^2$
A	350	1,80	80	8,4	4,5
B	200	1,75	72	7,3	2,8
C	307	2,75	80	6,8	3,4
D	184	1,35	200	1,9	0,2
E	184	1,35	150	2,2	0,3
F	184	1,35	150	1,8	0,3
G	184	1,35	40	8,5	6,1
H	229	2,00	28	7,0	8,4
I	229	2,75	28	5,2	9,6
J	229	2,0	28	12,0	15,8
K	235	2,75	16	4,8	16,8
L	235	2,75	30	4,8	10,0
M	235	1,25	100	4,8	1,5

Cuadro 3
CLASIFICACIÓN POR GRUPO DE SIERRAS

Grupo	Sierras	Característica en común
1	A, B, C	Geometría de dientes
2	D, E, F, G	Diámetro
3	H, I, J	Número de dientes
4	K, L, M	Altura de dientes



(a)



(b)

Figura 1. POSICIONES EN LAS CUALES SE UBICÓ EL MICRÓFONO DE MEDICIÓN. (a) MEDICIÓN DE NIVEL DE PRESIÓN SONORA, (b) MEDICIÓN DE DIRECCIONALIDAD A INTERVALOS DE 10 GRADOS.

RESULTADOS

Los resultados experimentales de los valores de frecuencias naturales muestran que los parámetros geométricos, diámetros, espesores, altura de dientes y área de los dientes, condicionan los modos de vibrar y sus frecuencias naturales. Las sierras con mayores diámetros se excitaron hasta el vigésimo modo, aproximadamente (sierras A y M). En las sierras más pequeñas, la excitación no sobrepasó del undécimo modo (sierras B, D, E, F, G). Las frecuencias naturales se relacionaron fuertemente con el diámetro correspondiente. Se pudo notar una dependencia inversa entre las frecuencias naturales

de las sierras y los diámetros, es decir, a medida que aumentó el diámetro disminuyeron los valores de las frecuencias naturales. En las sierras D, E, F, y G, los valores de las frecuencias naturales aumentaron con la altura de los dientes. En las sierras K, L y M los valores de las frecuencias naturales mostraron un aumento proporcional al espesor. Comparadas sólo las sierras K y L los valores de las frecuencias naturales resultaron ser independientes del número de dientes, hasta los tres primeros modos.

De los espectros obtenidos durante los ensayos de sierras giratorias, pudo apreciarse pares de frecuencias resonantes, es decir, dos frecuencias "peaks" muy próximas una de la otra, correspondientes a los distintos modos de vibrar. Interesante fue observar el distanciamiento entre los pares de frecuencias resonantes producto de la velocidad de giro. Comparadas estas frecuencias en pares, con los valores de las frecuencias naturales correspondientes, se encontró que ellas en un determinado modo de vibrar, se distanciaban uniformemente, aumentando y disminuyendo en frecuencia, respecto de su valor de la frecuencia natural. Estos pares de frecuencias resonantes mostraron un comportamiento lineal con la velocidad de rotación. Una de las componentes del par, aumentó proporcionalmente con la velocidad, mientras que la otra lo hizo en forma inversa. De acuerdo a estos resultados y conforme a la literatura existente, estas frecuencias corresponderían a las frecuencias de dos ondas generadas por la rotación, las cuales se trasladarían en sentidos a favor de la rotación y en el sentido opuesto. La figura 2 muestra estos resultados para la sierra Y.

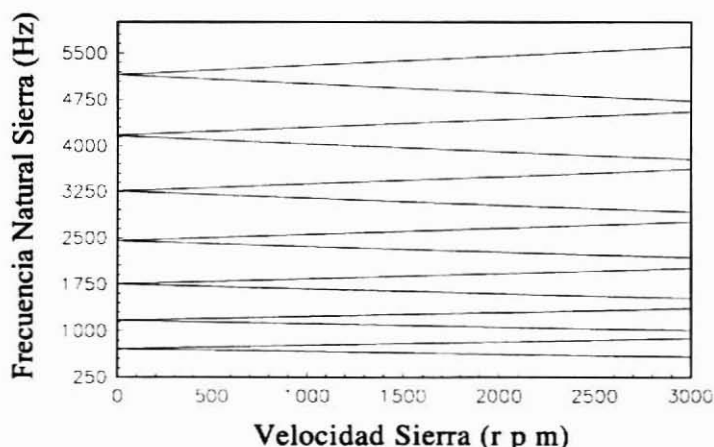


Figura 2. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN (rpm) SOBRE LA FRECUENCIA NATURAL DE VIBRACIÓN (ESTACIONARIA) CORRESPONDIENTE A LA SIERRA I.

A partir de las mediciones de ruido se pudo establecer que la velocidad de rotación es el parámetro más importante que afecta la radiación de sonido. Los parámetros de diseño de la sierra como número de dientes, altura del diente, diámetro y área del diente están relacionados directamente con los valores de presión sonora fluctuantes.

Sin embargo, su contribución al ruido total no resultó ser tan significativo como el aumento en Nivel de Presión Sonora por duplicación de la velocidad de rotación (rpm). Se pudo confirmar la variación del Nivel de Presión Sonora (dB), de acuerdo a un exponente de la velocidad periférica de borde (m/s). Estos exponentes de la velocidad periférica fluctuaron entre 4,04 y 5,52, aproximadamente. Esto produjo aumentos de 12,2 dB a 16,6 dB en los Niveles de Presión Sonora, por duplicación de la velocidad periférica. La figura 3 muestra estos resultados para las diferentes sierras por grupo.

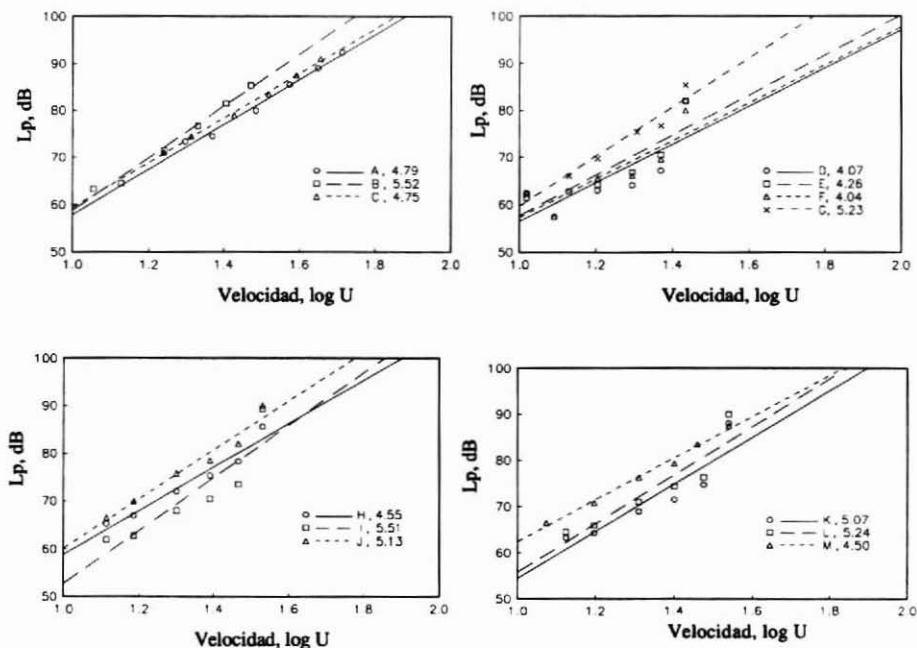


Figura 3. NIVEL DE PRESIÓN SONORA, L_p , dB - VELOCIDAD PERIFÉRICA, U , $\log U$, PARA LAS DIFERENTES SIERRAS POR GRUPOS.

En la figura 4 (a), se observa que para sierras con igual geometría de dientes, pero diferentes diámetros, el Nivel de Presión Sonora, L_p , crece a medida que aumenta el diámetro. En la figura 4 (b), se puede ver el efecto del aumento del área de los dientes

sobre L_p . Este grupo de sierras con igual diámetro, donde las sierras D, E, F tuvieron dientes con áreas muy pequeñas comparadas con el área de la sierra G, muestra un claro aumento de Nivel de la sierra G por sobre las demás.

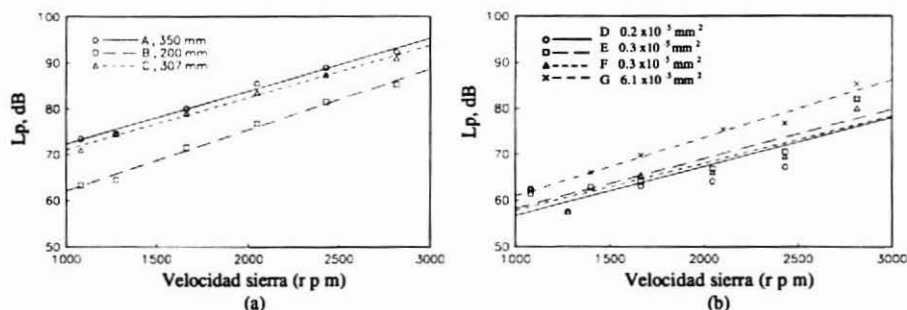


Figura 4. (a) EFECTO DEL DIÁMETRO SOBRE L_p . (b) EFECTO DEL ÁREA DE LOS DIENTES SOBRE L_p .

En la figura 5 (a), es posible notar la influencia de la altura de los dientes sobre el Nivel de Presión Sonora L_p . Para las sierras H, I, J con igual diámetro e igual número de dientes, se observa que a medida que crece la altura va aumentando también L_p . El efecto del aumento del número de dientes sobre el Nivel de Presión Sonora, L_p , es claramente visto en la figura 5 (b). En ella se aprecia un crecimiento del Nivel a medida que aumenta el número de dientes. Las sierras K, L, M tuvieron igual diámetro e igual altura de dientes. El espectro del sonido radiado por las sierras en vacío, tendió a ser angosto sobre una frecuencia "peak" característica. La figura 6 ejemplifica esto para la sierra I. Experimentalmente se pudo comprobar que la frecuencia "peak" resultó ser numéricamente igual a una constante por la velocidad rotacional de la sierra en revoluciones por minuto (rpm). Para las sierras B, C, G, I, J, K y L, estas constantes resultaron ser: B= 0,72; C= 0,7; G= 0,85; I= 0,34; J= 0,95; K= 0,8; y L = 0,58. Esta constante es directamente proporcional al diámetro e inversamente proporcional al espesor. Para las sierras B y K, la Figura 7 muestra que las frecuencias acústicas características resultaron ser proporcionales a la velocidad periférica e inversamente proporcional al espesor.

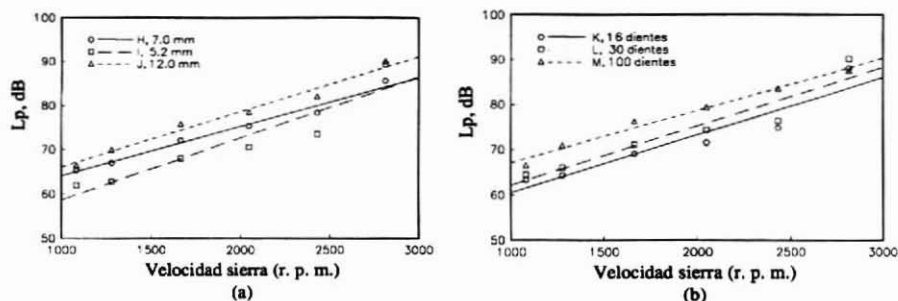


Figura 5. (a) EFECTO DE LA ALTIMA DE LOS DIENTES SOBRE L_p . (b) EFECTO DEL NÚMERO DE DIENTES SOBRE L_p .

La distribución direccional del campo acústico se midió a diferentes velocidades para todas las sierras. Se pudo observar mínimos de Nivel de Presión sonora L_p , en el plano de rotación de la sierra, y máximos de L_p , en la dirección del eje de la sierra. No se apreciaron diferencias importantes entre las diferentes sierras, lo que demuestra que la distribución direccional del campo acústico no es dependiente del tamaño de la sierra, del número de dientes, del área de los dientes, y tampoco de la altura.

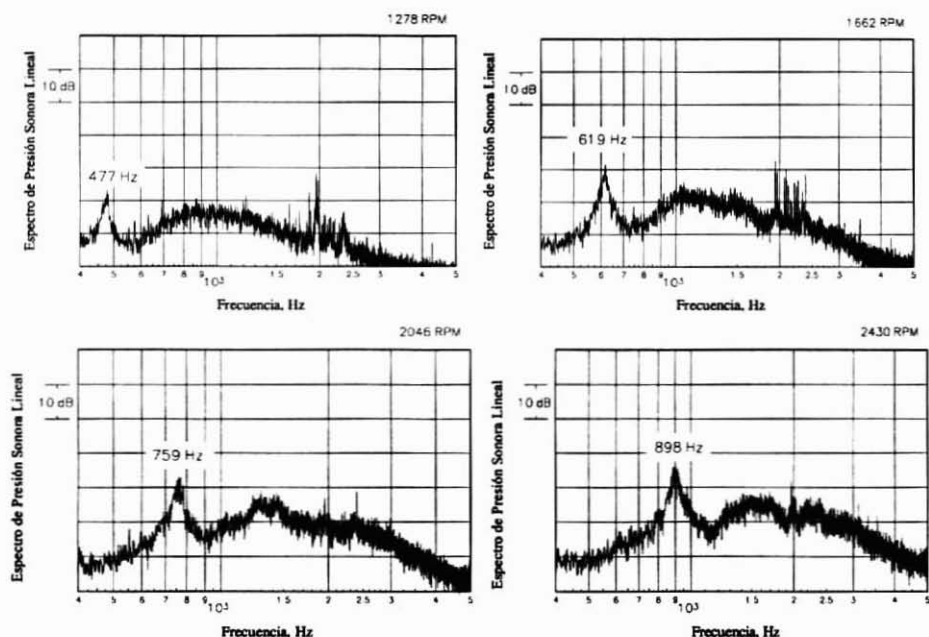


Figura 6. CONTENIDO ESPECTRAL DEL CAMPO SONORO RADIADO POR LA SIERRA I.

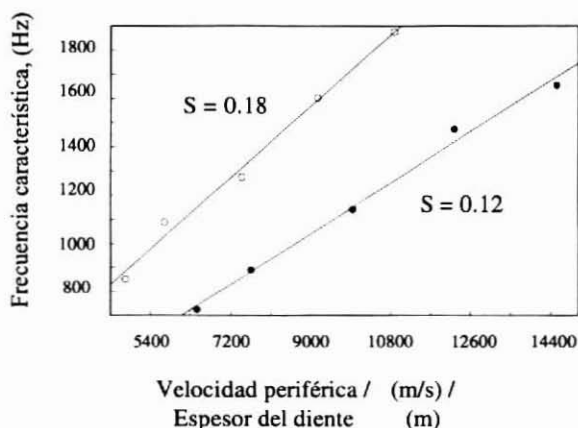


Figura 7. FRECUENCIAS ACÚSTICAS CARACTERÍSTICAS DEL ESPECTRO SONORO RADIADO POR LAS SIERRAS B Y K. PARA SIERRA B, $S = 0,12$, Y PARA SIERRA K, $S = 0,18$. S ES LA CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD, COMÚNMENTE REFERIDA COMO NÚMERO DE STROUHAL.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los principales resultados de este trabajo demuestran que la velocidad de rotación de la sierra es el parámetro que afecta fundamentalmente la radiación de sonido. Durante la rotación las frecuencias naturales comenzaron a dividirse en dos frecuencias de resonancia, las que fueron aumentando linealmente con la velocidad de rotación. Se pudo observar que la presión sonora fluctuante depende de la geometría de los dientes, de su, y de la altura y área de ellos. Estos resultados experimentales están corroborando el tipo de modelo de fuente teórica que describe la literatura. El campo sonoro está siendo generado por fuentes acústicas de presión puntuales dipolares. Los patrones de direccionalidad, la dependencia de la velocidad y los espectros lineales, están sugiriendo radiación sonora dipolar. La ley de proporcionalidad característica de exponente 6 (seis) para la velocidad periférica de borde, varió entre los valores 4,04 a 5,52. La dependencia angular de la distribución del campo acústico con mínimo sobre el plano de la sierra y máximo en la dirección del eje confirma una característica dipolar de radiación sonora. La supuesta relación lineal entre la frecuencia "peak" característica del contenido espectral del campo sonoro y la velocidad de la sierra, pudo apreciarse con claridad. Los valores de estas frecuencias dipolares fluctuaron entre 0,08 y 0,18 (valores de número de Strouhal para todas las sierras), veces la razón entre la velocidad periférica de borde y el espesor.

Finalmente, de este trabajo puede plantearse que al disminuir la velocidad de operación (rpm) a la mitad, se obtendría una reducción del orden de 16 dB en el Nivel de

Presión Sonora Lp. Entre otras posibles alternativas para reducir los niveles de ruido se pueden considerar, en el momento de seleccionar una sierra circular, disminuir las alturas de los dientes, disminuir el área de los dientes, disminuir el número de dientes y el diámetro de las sierras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Fondo de Desarrollo de Ciencia y Tecnología, FONDECYT, 1951155 y a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile, DID - UACH, F - 95 -15 y DID UACH, F - 96 - 09. Agradecemos además, a Víctor Cumián y Claudia Ugalde por su ayuda en el trabajo de laboratorio.

REFERENCIAS

- Foyster, J. R. 1947.** Modern Mechanical Saw Practice. Crosby Lockwood & Son, Ltd., London.
- Bies, D. A. 1992.** Journal of Sound and Vibration **154**(3), 495-513. Circular saw Aerodynamic Noise.
- Cho, H. S. & C. D. Mote, Jr. 1979.** Journal of the Acoustical Society of America **65** (3) 662-671. On the aerodynamic noise source in circular saws.
- Stewart, J. S. 1978.** Noise Control Engineering **11** (1), 5-11. An investigation of the aerodynamic noise generation mechanism of circular saw blades.
- Martin, B. T. & D. A. Bies. 1992.** Journal of Sound and Vibration **155** (2) 317-324. On aerodynamic noise generation from vortex shedding in rotating blades.
- Mote, Jr., C D. & Wen Hua Zhu 1984.** Journal of Vibration, Stress, and Reliability in Design **106** 441-446. Aerodynamic far field noise in idling circular sawblades.
- D'Angelo III, C., N. T. Alvarado, K. W. Wang & C. D. Mote, Jr. 1985.** The Shock and Vibration Digest **17** (5) 11-23. Current research on circular saw and band saw vibration and stability.
- Leu, M. C. & C. D. Mote, Jr. 1984.** Wood Science Technology **18**, 33-49. Origin of idling noise in circular saws and its suppression.
- Reiter Jr., W. F. & R. F. Keltie. 1976.** Journal of Sound and Vibration **44** (4) 531-543. On the nature of idling noise of circular saw blades.