

Modelado y cálculo de radiación sonora procedente de conducciones de gas en instalaciones industriales



Notario Tévar, Antonio

Datakustik GmbH

antonio.notario@datakustik.com

PACS: 43.50.Gf

«Dedicado a la memoria de Andrés Lara, admirable profesor y experto acústico»

Resumen

El análisis de la emisión provocada por instalaciones industriales tales como plantas químicas, refinerías o cualquier otra área de producción es el primer y más importante paso a la hora de calcular la inmisión acústica en el medio ambiente. Las instalaciones de conducción de gas u otro tipo de fluido son a menudo relevantes en la emisión sonora global de la industria. Esta radiación puede ser determinada aplicando los métodos descritos en documentos técnicos tales como la norma VDI 3733 y la ISO 15664.

En aquellos casos en los que la realización de mediciones de ruido no es posible, o durante el proceso de planificación u optimización de la instalación, una técnica práctica para obtener la emisión es derivar el nivel de potencia sonora a partir de parámetros relevantes del sistema, que tienen influencia en la emisión acústica. Después de la definición y modelado del sistema emisor, todos los parámetros del sistema que influyen la emisión podrán ser modificados de acuerdo con los diferentes escenarios de operación. Como resultado, el espectro de la emisión sonora de una tubería puede calcularse para las condiciones reales de funcionamiento.

Abstract

Analysis of the emission caused by industrial facilities like chemical plants, refineries or other production areas is the first and most important step while calculating the noise pollution of the environment. Pipework with gas or fluid flows are often contributing relevant to the sound radiation of a complete facility. This radiation can be determined applying the methods described in technical papers like VDI 3733 and ISO 15664.

In all cases where measurements are not possible or during a planning and optimization process, a practical technique is to derive the sound power level from significant parameters which do have influence on the noise emission. After the definition and modeling of an emitting system, all contributing system parameters influencing the emission can be altered according to different operating scenarios. As a result the spectrum of the noise emission of a gas pipe can be calculated for the real conditions.

1. Aspectos acústicos de las tuberías conductoras de gas

Las tuberías se emplean para transportar materia sólida, líquida y gaseosa. Las siguientes consideraciones acústicas son aplicables solamente a tuberías circulares conductoras de gas sin contenido sólido, como pueden ser granulados, etc., y hasta un diámetro de 800 mm.

Para conducciones de sección rectangular y aquellas que conducen líquidos, deberían tomarse consideraciones distintas. Desde el punto de vista acústico, las conducciones con un diámetro superior al indicado anteriormente, se consideran planas.

El efecto más relevante en la emisión de una tubería es la contribución de la emisión acústica a través de sus



Imagen 1. Tuberías de gas en una instalación industrial.

paredes externas, y procedente de otras fuentes externas tales como ventiladores, compresores, etc. Como norma general, esta emisión externa es significativamente mayor que el ruido generado por el flujo interno en la tubería.

1.1. Absorción Acústica en tuberías de gas de sección circular

En comparación a las tuberías planas, la absorción acústica presenta valores significativamente superiores por debajo de la llamada *Ring expansión frequency*, valor que relaciona la velocidad del flujo en las paredes de la tubería con el diámetro interior de esta (ver /1/). La absorción se reduce en el rango de la frecuencia crítica que es dependiente de cada modo (ver /1/, /5/). Por encima de la *Ring expansión frequency*, las características acústicas de las tuberías son equivalentes a las tuberías planas con una caída característica en el valor de absorción en el rango de la frecuencia de coincidencia (ver también /3/).

Partiendo de la ecuación /1/, la absorción se determina a partir de las siguientes fórmulas. Adicionalmente, la influencia de la coincidencia se tiene en cuenta de acuerdo con /3/ y /4/.

La expresión de la absorción es:

$$D_E = R_R - 10\text{Log}\left(4 \cdot \frac{1}{(10 \cdot d^{-3})}\right) - 10\text{Log}\left(\frac{\sinh(B)}{B}\right) + \Delta L \quad (1)$$

Donde:

$$R_R = 10 + 10\text{Log}\left[\left(\frac{c_w \cdot \rho_w \cdot s}{c_F \cdot \rho_F \cdot d}\right)\right] + 10\text{Log}\left[\left(\frac{f_r/5}{f}\right) \cdot 3 + 5 \cdot \frac{f}{f_r}\right] + R_k \quad (2)$$

$$c_F = \left(\sqrt{\frac{1.4 \cdot p \cdot 10^5}{\rho_F}}\right) \quad (3)$$

$$f_r = \frac{c_w}{\pi \cdot d \cdot 10^{-3}} \quad (4)$$

$$R_k = -35 \cdot 10\text{Log}\left\{1 + \frac{2}{\left[\left(\frac{f}{f_g} - 1.5 \cdot \frac{f_g}{f}\right)^2 + 1\right]}\right\} \quad (5)$$

$$R_k = 0 \text{ for } f_g < f_r$$

$$f_g = 6.4 \cdot \frac{10^4}{(c_w \cdot (s \cdot 10^{-3}))} \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{(d \cdot 10^{-3})} \cdot \left[\frac{2 \cdot 10^{-0.1 \cdot R_R} + \alpha(d \cdot 10^{-3})}{8.69}\right] \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{4.9 \cdot 10^{-4}}{(d \cdot 10^{-3})} \cdot \sqrt{\frac{f}{p}} \cdot \left[\frac{273+t}{293}\right]^{0.25} \cdot (1 + 11 \cdot M_A) \quad (8)$$

$$M_A = v/c_F$$

$$\Delta L = 0.5 \cdot \left(17.37 \cdot \frac{1}{(d \cdot 10^{-3})}\right) \cdot 10^{-0.1 \cdot R_R} + \alpha \quad (9)$$

Los parámetros del sistema considerados son:

Lm	[m]	longitud de la sección
d	[mm]	diámetro de la tubería
v	[m/s]	velocidad del flujo en el interior de la tubería
p	[bar(abs)]	presión absoluta del gas en el interior de la tubería
ρ_F	[kg/m ³]	densidad del gas en la tubería
t	[grd C]	temperatura del gas en la tubería
s	[mm]	grosor de las paredes de la tubería
ρ_w	[kg/m ³]	densidad de las paredes de la tubería
c_w	[m/s]	velocidad de expansión de onda del material de construcción de la tubería

1.2. Generación de Ruido de Flujo

El ruido de flujo es provocado en flujos que circulan a través de conducciones por la capa límite del flujo turbulento. De acuerdo a /1/, sólo una pequeña proporción (10^{-3}) de la energía del flujo es convertida en energía acústica. En instalaciones industriales por tanto, el ruido de flujo no es relevante, pero puede ser una fuente dominante en uniones de conductos con una alta pérdida de presión (p.e. válvulas) y en el escape de silenciadores. Para determinar el ruido de flujo, se emplean diferentes expresiones procedentes de la literatura. El ruido de flujo es por otra parte, independiente de la longitud de la tubería, aunque depende de la pérdida de carga.

$$L_{WA} = 39.2 + s - 0.16 \cdot w + 60\text{Log}(w) + 10\text{Log}(S) + 10\text{Log}(p) - 25\text{log}(N \cdot T) - 15\text{Log}(k) \text{ dB} \quad (10)$$

Donde $T = t + 273$

Los parámetros considerados en este caso son:

w	[m/s]	velocidad de flujo
S	[m ²]	área de sección transversal
p	[bar]	presión en el conducto o tubería
N	[kJ/kg/K]	constante específica del gas
T	[°C]	temperatura
K	[---]	coeficiente adiabático

2. Cálculo de los niveles de potencia sonora de sistemas de conducción de gas a partir de parámetros técnicos mediante software de simulación

Los Niveles de Potencia Sonora en este tipo de emisores acústicos dependen de parámetros intrínsecos del emisor. Pueden ser –dependiendo del tipo de emisor– por ejemplo la potencia nominal, la longitud, diámetro, etc. El software de simulación CadnaA /6/ implementa un módulo (SET) basado en la idea de que los niveles de potencia sonora de las distintas partes de un sistema pueden ser calculados a partir de los valores de dichos parámetros. Esta característica puede ser empleada para calcular automáticamente niveles de potencia sonora de los emisores, así como las transmisiones entre distintos componentes del sistema, siendo dependientes de las atenuaciones en frecuencia pertinentes, según el caso; de esta forma, los emisores individuales pueden combinarse para ensamblar sistemas de emisión de ruido complejos.

Una vez definidos dichos sistemas, pueden realizarse sobre ellos cualquier actualización –por ejemplo, la inser-

ción de nuevos elementos o el cambio de cualquiera de ellos por otro con distintas características acústicas– que conducirá a un cambio global de comportamiento de todo el sistema; de esta forma, los efectos de un silenciador pueden ser evaluados rápidamente, o bien pueden reproducirse distintas condiciones de operación en el sistema sin ningún esfuerzo.

Los parámetros técnicos de los emisores son definidos en el software de acuerdo a la Imagen 2, y pueden ser empleados posteriormente en el modelo. Hasta 10 parámetros distintos pueden tener influencia en el cálculo de los niveles de potencia Sonora o las atenuaciones.

Asimismo, pueden considerarse las transmisiones entre elementos de un sistema a través de 9 entradas y salidas.

En el siguiente ejemplo, un ventilador inyecta presión en un sistema de conducción compuesto de 4 elementos, y terminando en una chimenea de acero. Aparte del ventilador radial, los emisores considerados son las tuberías, la propia chimenea y un elemento específico para considerar la reflexión a la salida de esta.

La transmisión entre los diferentes elementos es también considerada. De esta forma los componentes se ensamblan linealmente uno detrás del anterior, lo cual permite una estructura relativamente simple (como puede observarse en la Imagen 3). En cada elemento, se emplea solamente una entrada y una salida.

2.1. Definición del sistema

Cada bloque o elemento es representado por una línea en la tabla SET-T (tabla del sistema), mostrada en la Imagen 4.

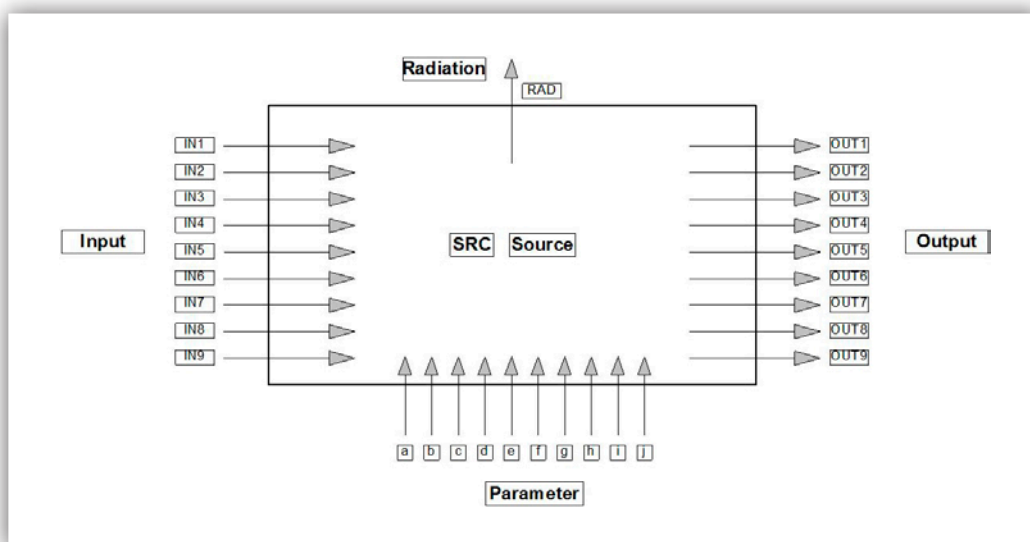


Imagen 2. Modelo teórico de un elemento SET-S.

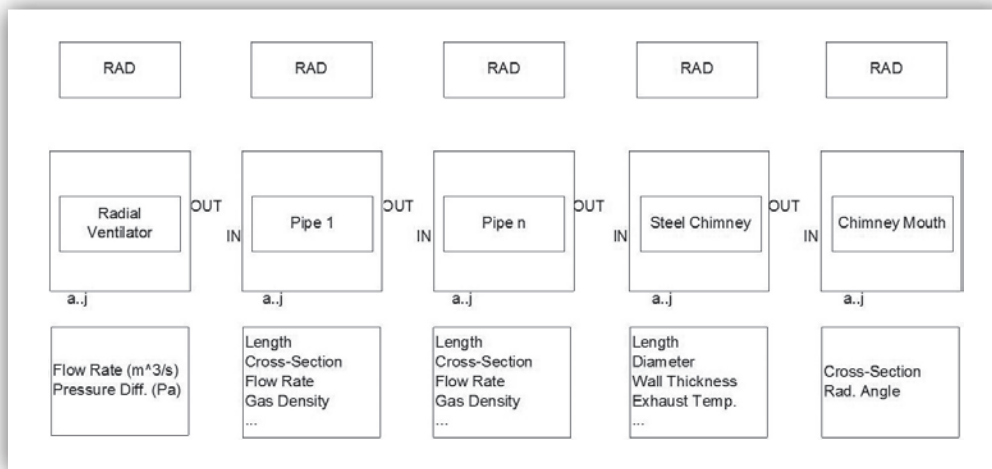


Imagen 3. Estructura lógica de un sistema de conducción (de izquierda a derecha).

Los módulos individuales necesitan la entrada de los valores paramétricos que definirán su emisión. La Imagen 5 muestra dichos valores en el caso de una sección de tubería.

Adicionalmente, las uniones entre elementos del sistema son también relevantes. En este ejemplo, el punto de partida es el ventilador, donde la salida de presión (output 2) se conecta a la tubería 1. Para el resto de elementos, el valor por defecto «next» puede emplearse como salida 1. De este modo, los elementos se conectarán directamente al anterior en la tabla SET-T (Imagen 4).

2.2. Modelado y Cálculo

El modelado en el software es realizado mediante emisores industriales normales para todos los elementos. El ventilador en este caso es un emisor puntual, mientras que las tuberías son emisores lineales. La chimenea también se basa en un emisor lineal vertical situado en el centro de un cilindro que representa el cuerpo. Finalmente la salida de la chimenea es un emisor puntual con una directividad específica. El modelo descrito se muestra en la Imagen 6.

Una vez el modelo está representado, puede realizarse un cálculo para obtener los niveles de presión sonora en cualquier punto receptor.

3. Modificación y actualización en modelos de sistemas de conducción

Una vez que un sistema completo de conducción se ha creado, puede ser fácilmente actualizado o modificado. Por ejemplo, los elementos pueden ser desplazados simplemente arrastrando y soltando en la tabla del sistema. Así mismo, pueden insertarse nuevos elementos (como silenciadores u otras medidas de optimización acústica). En ambos casos todos los espectros de emisión, así como el sonido transmitido pueden ser recalculados mediante un clic.

3.1. Modelado de fenómenos y efectos especiales

En algunos casos, es necesario insertar elementos adicionales para representar ciertos efectos en el sistema, aun cuando no se incluyan elementos «físicos» en el modelo (como otros emisores adicionales). Esto puede y

SET-T																	
Close Edit... Sync. Graphic Copy... Print... Font... Help																	
Name	ID	Spectrum (dBA)										Sound Power Levels (dBA)					
		31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	IN1	IN2	IN3	OUT1	OUT2	OUT3
Radial fan (forward)	V1	86.4	102.4	107.4	108.4	107.4	104.4	99.4	93.4	84.4	113.7				117.2	118.2	
Pipe1 Pressure Side	VR1	45.7	72.2	85.9	91.0	90.7	87.0	82.0	78.8	77.1	95.6	118.2			118.0		
Pipe2 Pressure Side	VR2	44.7	70.1	82.8	85.9	82.6	76.9	72.9	70.5	69.7	89.3	111.4			111.2		
Pipe3 Pressure Side	VR3	44.7	70.1	82.7	85.8	82.5	76.7	72.7	70.3	69.3	89.2	111.2			111.1		
Pipe4 Pressure Side	VR4	44.7	70.1	82.7	85.7	82.4	76.6	72.5	70.0	68.8	89.1	111.1			111.0		
Steel Chimney	VK	49.3	75.7	86.6	86.9	83.3	76.9	70.5	61.2	46.4	91.0	111.0			108.7		
Chimney Opening	VM	73.8	94.0	101.3	103.8	103.3	99.5	95.0	86.6	71.7	108.7	108.7					

Imagen 4. Sistema compuesto por un ventilador, 4 tuberías y una chimenea de acero incluyendo su abertura.

Ventilator		
Volumenstrom	56	m ³ /s
Gesamt-Druckdifferenz	7000	Pa
Rohrleitung		
Teilstücklänge	10	m ³ /s
Rohrdurchmesser	2000	mm
Strömungsgeschw.	17.8	m/s
Gasdruck	1	bar
Gastemperatur	20	°C
Rohrwanddicke	2	mm
Rohrmaterialdichte	7850	kg/m ³
Dehnwellengeschw.	5100	m/s
Kamin		
Teilstücklänge	20	m
Kamindurchmesser	3000	mm
Kaminwanddicke	2	mm
Abgastemperatur	20	°C
Verschmutzungsgrad	2	
Kaminmündung		
Querschnitt	7.2	m ²

Imagen 5(a). Ejemplo de valores requeridos en el módulo SET-T.

Imagen 5(b). Entrada de parámetros en una sección de tubería.

debe ser considerado cuando se trabaja con la implementación SET, tal y como se muestra en el siguiente ejemplo relativo a un cambio de sección.

La sección transversal de una tubería tiene influencia tanto en la emisión como en la transmisión, que como se ha explicado puede ser considerada. Por otro lado, el salto súbito entre dos secciones diferentes también tiene una importante influencia; aunque este efecto no puede

ser considerado mediante objetos estándar. Así pues, aparte del ajuste de los parámetros de la tubería (diámetro, velocidad del flujo, etc.) puede emplearse un elemento adicional en el sistema global que considere el salto de sección transversal (Imagen 7).

Este nuevo elemento, definido por el bloque «Cross Section Jump» puede ser empleado y su posición en la tabla del sistema definirá la nueva relación entre las dos tuberías.

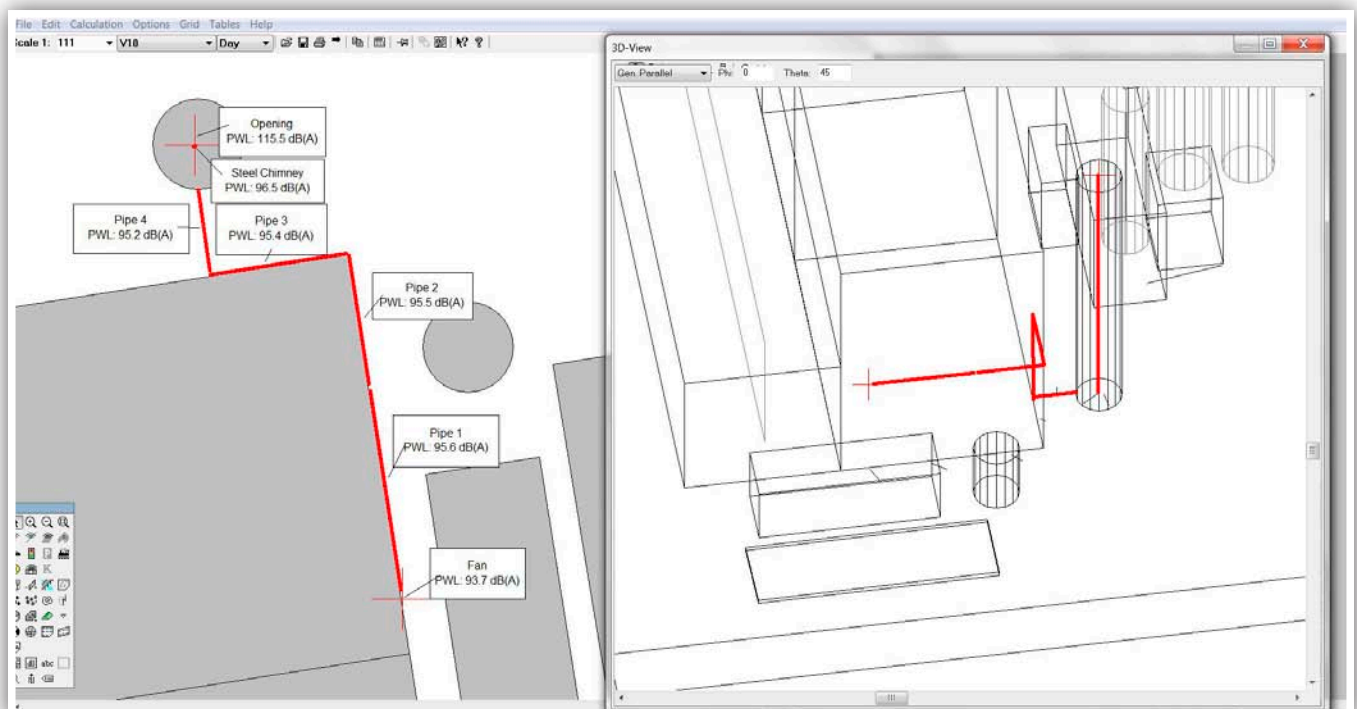


Imagen 6. Conducción con ventilador, 4 tuberías y chimenea de acero. Los valores mostrados son los niveles de potencia Sonora calculados a partir de parámetros específicos de los emisores.

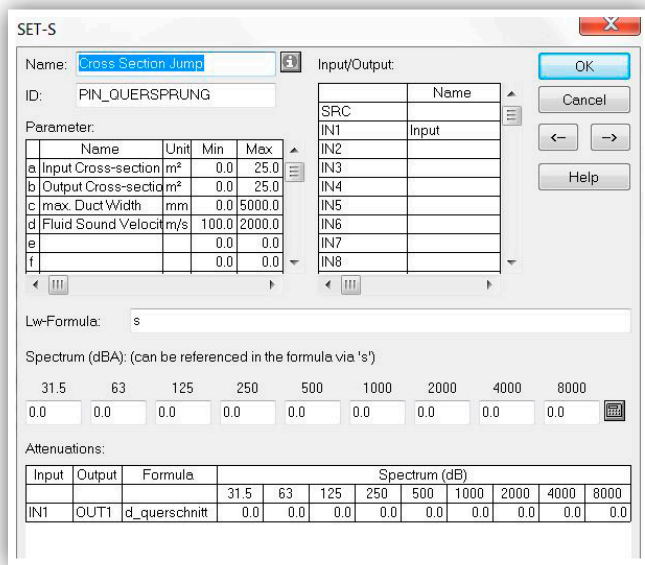


Imagen 7. Diálogo de entrada de valores en parámetros que definen un Salto de Sección Transversal.

El salto de sección transversal es solamente un ejemplo entre otros muchos. Especialmente en sistemas de conducción, existen multitud de elementos documentados que pueden ser utilizados.

3.2. Modificación de sistemas existentes

En el caso de sistemas de conducción previamente definidos, es posible introducir nuevos elementos con el fin de evaluar diferentes escenarios. En este ejemplo, se evalúa la posibilidad de incluir un silenciador situado entre la última sección de tubería y la chimenea. El silenciador en este caso es considerado como una atenuación dependiente de la frecuencia.

Una vez el nuevo elemento es introducido en el sistema, las transmisiones entre los elementos afectados y por tanto las emisiones son recalculadas completamente. Las imágenes 8(a) y 8(b) muestran la tabla del sistema antes y después de la entrada del silenciador. Como puede observarse, el silenciador no emite ningún ruido por sí mismo, aunque podría haberse definido una salida del sistema como radiación en caso de querer haber tenido en cuenta este efecto.

Esta sencilla herramienta también es sensible a la posición de los elementos y a la acción de arrastrar – soltar. Esto permite un análisis rápido de todas las alternativas posibles. En la imagen siguiente, el silenciador, que estaba situado entre la tubería 4 y la chimenea, ahora será desplazado a una nueva posición entre las tuberías 1 y 2.

The SET-T window displays a table with the following data:

Name	ID	Spectrum (dBA)									Sound Power Levels (dBA)						
		31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	IN1	IN2	IN3	OUT1	OUT2	OUT3
Radial fan (forward)	V1	86.4	102.4	107.4	108.4	107.4	104.4	99.4	93.4	84.4	113.7				117.2	118.2	
Pipe1 Pressure Side	VR1	45.7	72.2	85.9	91.0	90.7	87.0	82.0	78.8	77.1	95.6	118.2			118.0		
Pipe2 Pressure Side	VR2	45.7	72.1	85.8	90.9	90.6	86.9	81.9	78.5	76.7	95.5	118.0			117.9		
Pipe3 Pressure Side	VR3	45.7	72.1	85.7	90.8	90.5	86.7	81.7	78.3	76.3	95.4	117.9			117.8		
Pipe4 Pressure Side	VR4	45.7	72.1	85.7	90.7	90.4	86.6	81.5	78.0	75.8	95.2	117.8			117.7		
Steel Chimney	VK	50.3	77.7	89.6	91.9	91.3	86.9	79.5	69.2	53.4	96.5	117.7			115.6		
Chimney Opening	VM	74.8	96.0	104.3	108.8	111.3	109.5	104.0	94.6	78.7	115.5	115.6					

Imagen 8(a). Sistema sin ningún dispositivo silenciador.

The SET-T window displays a table with the following data:

Name	ID	Spectrum (dBA)									Sound Power Levels (dBA)						
		31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	IN1	IN2	IN3	OUT1	OUT2	OUT3
Radial fan (forward)	V1	86.4	102.4	107.4	108.4	107.4	104.4	99.4	93.4	84.4	113.7				117.2	118.2	
Pipe1 Pressure Side	VR1	45.7	72.2	85.9	91.0	90.7	87.0	82.0	78.8	77.1	95.6	118.2			118.0		
Pipe2 Pressure Side	VR2	45.7	72.1	85.8	90.9	90.6	86.9	81.9	78.5	76.7	95.5	118.0			117.9		
Pipe3 Pressure Side	VR3	45.7	72.1	85.7	90.8	90.5	86.7	81.7	78.3	76.3	95.4	117.9			117.8		
Pipe4 Pressure Side	VR4	45.7	72.1	85.7	90.7	90.4	86.6	81.5	78.0	75.8	95.2	117.8			117.7		
Silencer												117.7			105.9		
Steel Chimney	VK	48.3	73.7	83.6	81.9	75.3	66.9	61.5	53.2	39.4	86.5	105.9			103.2		
Chimney Opening	VM	72.8	92.0	98.3	98.8	95.3	89.5	86.0	78.6	64.7	103.1	103.2					

Imagen 8(B). Inserción de un silenciador entre la tubería 4 y la chimenea de acero.

SET-T																	
Close Edit... Sync. Graphic Copy... Print... Font... Help																	
Name	ID	Spectrum (dBA)										Sound Power Levels (dBA)					
		31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	IN1	IN2	IN3	OUT1	OUT2	OUT3
Radial fan (forward)	V1	86.4	102.4	107.4	108.4	107.4	104.4	99.4	93.4	84.4	113.7				117.2	118.2	
Pipe1 Pressure Side	VR1	45.7	72.2	85.9	91.0	90.7	87.0	82.0	78.8	77.1	95.6	118.2			118.0		
Silencer												118.0					
Pipe2 Pressure Side	VR2	43.7	68.1	79.8	80.9	74.6	66.9	63.9	62.5	62.7	84.2	106.2			106.1		
Pipe3 Pressure Side	VR3	43.7	68.1	79.7	80.8	74.5	66.7	63.7	62.3	62.3	84.1	106.1			106.0		
Pipe4 Pressure Side	VR4	43.7	68.1	79.7	80.7	74.4	66.6	63.5	62.0	61.8	84.0	106.0			105.9		
Steel Chimney	VK	48.3	73.7	83.6	81.9	75.3	66.9	61.5	53.2	39.4	86.5	105.9			103.2		
Chimney Opening	VM	72.8	92.0	98.3	98.8	95.3	89.5	86.0	78.6	64.7	103.1	103.2					

Imagen 9. Inserción de un silenciador entre las tuberías 1 y 2.

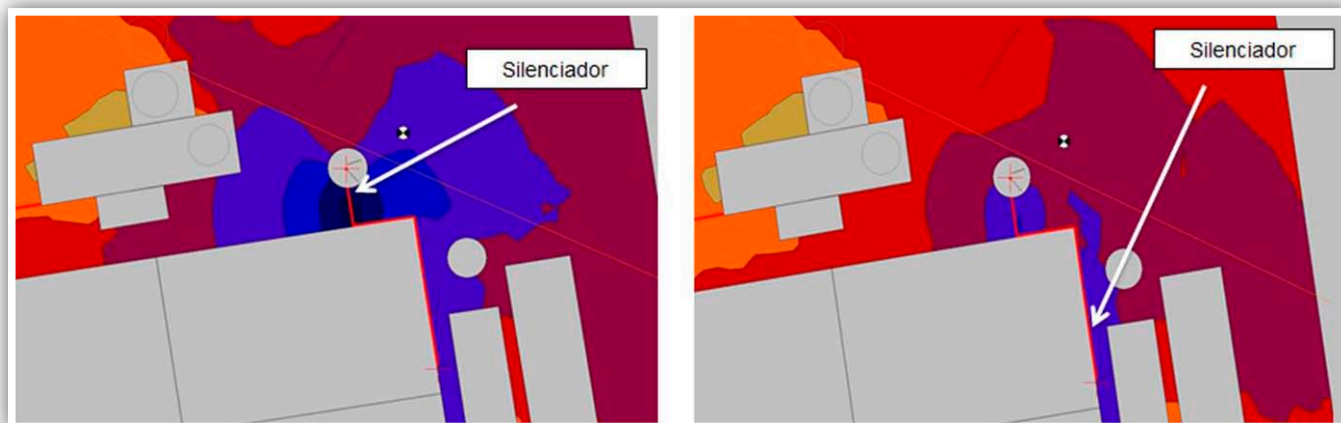


Imagen 10. Mapas de ruido resultantes con distintas posiciones del elemento silenciador (Izquierda: silenciador entre tubería 4 y chimenea) (Derecha: silenciador entre tubería 1 y tubería 2).

Obsérvese el cambio de valores una vez actualizado el cálculo, mostrando el efecto de las distintas posibilidades en tiempo real (Imagen 9).

La posibilidad de añadir cualquier elemento que influya en las características acústicas del sistema mediante arrastrar y soltar permite el estudio de cualquier solución sin esfuerzo. El silenciador o la estructura de datos que subyace en la línea de tabla correspondiente puede copiarse y pegarse en cualquier posición.

Mientras en el caso de la programación convencional, todas las superficies radiantes situadas por detrás del silenciador han de ser modificadas manualmente con el fin de reducir su emisión sonora, esto ahora puede realizarse con solo una operación. El mismo proceso se aplica al calcular la inmisión en cualquier punto. Si por ejemplo, el cálculo es realizado después de cambiar el grosor de una tubería en un sistema industrial, las consecuencias se tienen en cuenta tanto para las nuevas emisiones

como para cualquier nivel calculado, ya sea puntual o un mapa de ruido completo (Imagen 10).

4. Referencias

1. VDI 3733 «Noise in pipes», July 1996
2. DIN 2458, «Welded steel pipes», February 1981
3. Schmidt, H.: Handbook of acoustics, VDI publications, Düsseldorf, 1996
4. Measurements and calculations within the framework of project work at Bayer AG
5. W. Straßen: Noise creation through inserts in pipes and solids in the fluid, lecture 'House of Technology', 1998
6. CadnaA: «Computer Aided Noise Abatement», software developed by DataKustik GmbH, www.datakustik.com

Acreditada por:



Certificada por:

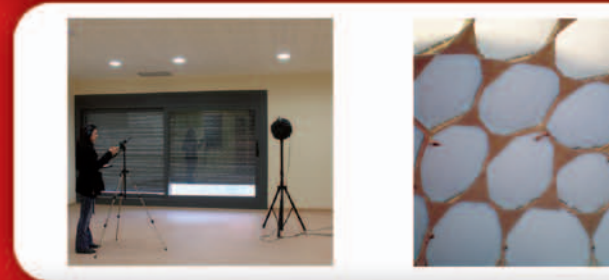


Centro Tecnológico de Acústica

ESTUDIOS ACÚSTICOS, MAPAS DE RUIDO Y PLANES DE ACCIÓN



AISLAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO
ENSAYOS Y MEDICIONES IN SITU CERTIFICADAS



ENSAYOS EN CÁMARAS NORMALIZADAS
CERTIFICACIÓN DE PRODUCTOS



PROYECTOS ACÚSTICOS Y EJECUCIÓN DE SOLUCIONES
EN INDUSTRIA, EDIFICACIÓN Y MEDIOAMBIENTE



Madrid, Barcelona, Valladolid, Valencia, Bilbao, Sevilla, Cantabria, La Rioja y Zaragoza

902 37 37 99



empresa
familiarmente
responsable

www.audiotec.es

info@audiotec.es
www.audiotec.es