

## CARACTERIZACIÓN DE EMISORES ACÚSTICOS INDUSTRIALES Y ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN EN EMPLAZAMIENTOS INDUSTRIALES

PACS: 43.50.jh

Notario Tévar, Antonio  
Datakustik GmbH  
C/ Calera 3, Loft 49  
28760 Tres Cantos  
España  
+34 91 219 08 78  
[antonio.notario@datakustik.com](mailto:antonio.notario@datakustik.com)

### ABSTRACT

There is a number of calculation methods widely used to predict the noise from industrial sources such as ISO 9613-2 or the recent CNOSSOS-EU calculation method. In either case, the general problem is to decide about the input data of the relevant industry noise sources, such as emission values or directivities. This paper addresses solutions for common challenges such as the unavailability of source's data, strategies applied to improve existing methods and the arrangement of the acoustical model with an efficient structure, allowing the fast comparison of different scenarios.

### RESUMEN

Existe un gran número de métodos de cálculo empleados para predecir el ruido procedente de emisores industriales, tales como la ISO 9613-2 o el más reciente CNOSSOS-EU. En cualquier caso, el problema común es la caracterización de dichos emisores en el caso de desconocer parámetros primordiales como sus valores de emisión o la directividad. Este trabajo muestra posibles alternativas a situaciones comunes como la no disponibilidad de datos de fuentes acústicas, estrategias para mejorar métodos existentes y la estructuración eficiente del modelo acústico con el fin de permitir la comparación de escenarios.

### INTRODUCCION

En la gestión del impacto acústico producido por instalaciones industriales se aplican métodos de cálculo ampliamente usados como el ISO9613-2 o el más reciente CNOSSOS-EU, desarrollado por la Comisión Europea. Sea como fuere, uno de los principales problemas en todo caso es decidir los parámetros de entrada correctos a fin de definir la emisión sonora de las fuentes de ruido.

El procedimiento más razonable de obtener espectros de emisión sonora es efectuar mediciones en fuente, aunque se espera disponer de una base de datos predefinida en caso de que no sea posible la medida in situ. Por otro lado, existen situaciones especiales en las que la recolección de datos es extremadamente compleja, como por ejemplo la emisión de ruido a través de ventanas o superficies cuyo origen es el interior de naves industriales, o sistemas complejos donde no es posible la medición directa.

Por último, después de que las emisiones hayan sido determinadas e introducidas en el modelo, el escenario actual es calculado y los niveles de presión sonora resultantes evaluados. En este punto, la planificación de nuevos escenarios debe incluir las futuras medidas de reducción de ruido, que pueden ser aplicadas tanto en el receptor como directamente en fuente (por ejemplo, la modificación de las condiciones de operación de las máquinas). El presente trabajo enumera algunos de los métodos disponibles para la determinación de las emisiones industriales así como sugiere herramientas adicionales de aplicación en la planificación de emplazamientos industriales.

### DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE LAS FUENTES DE RUIDO

En la mayoría de los métodos de cálculo, la emisión acústica de las fuentes se define como el nivel de potencia sonora direccional emitido por banda de frecuencia. Los emisores industriales pueden definirse como fuentes puntuales, lineales o superficiales. En cualquier caso, la emisión debe incluir las superficies reflectantes cercanas a la fuente real tal y como se define en la ISO 96143 (en ruido industrial, las superficies reflectantes más relevantes son el terreno debajo de la fuente y cualquier superficie vertical cercana y situada en dirección opuesta a la trayectoria entre fuente y receptor).

En caso de que los niveles de potencia sonora no estén disponibles, deben realizarse mediciones. Por ejemplo, CNOSSOS-EU aconseja hacer uso de los siguientes métodos de medición para obtener espectros de potencia sonora apropiados para su uso en el cálculo del ruido industrial:

- Sound pressure enveloping surface method (ISO 3744 and 3746)
- Reverberation room method (ISO 3741)
- Reference sound source method (ISO 3747)
- Intensity method (ISO 9614 1-3)
- Multi-source industrial plants (ISO 8297)
- Transmission outdoors (EN 12354-4)

### DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE FUENTES PUNTUALES BASADA EN MEDICIONES

Una fuente puntual es una representación elemental de una fuente de ruido ideal situada en el espacio, y está caracterizada por el nivel de potencia sonora  $L_W$ . En caso de que dicho  $L_W$  no esté disponible, puede calcularse a partir del nivel de presión sonora  $L_p$ . En esta situación, pueden darse diversos casos. Por ejemplo, si la distancia de medida es mayor en comparación con las dimensiones de la fuente, y su radiación no es direccional, el nivel de potencia sonora puede calcularse de acuerdo a la fórmula (1):

$$L_W = L_p + 10 \lg \left( \frac{4\pi r^2}{m^2} \right) + 10 \lg \left( \frac{n\%}{100\%} \right) \quad (1)$$

$L_W$ : nivel de potencia sonora en la frecuencia  $f$  en dB  
 $L_p$  = nivel de presión sonora a la distancia  $r$  y en la frecuencia  $f$  en dB  
 $r$ : distancia de medida en m  
 $n\%$ : proporción de la esfera completa en %

En caso de que la radiación sea direccional, deben medirse varios puntos a la misma distancia de la Fuente, obteniendo el espectro medio energético de los espectros obtenidos. En caso de que las medidas se hayan realizado sobre una superficie envolvente el nivel de potencia Sonora puede calcularse con la Ecuación (2):

$$L_W = L_p + 10 \lg \left( \frac{S}{m^2} \right) + K \quad (2)$$

$L_w$ : nivel de potencia sonora en la frecuencia  $f$  en dB  
 $L_p$ : nivel de presión Sonora promedio en la superficie  $S$  y en la frecuencia  $f$  en dB  
 $S$ : superficie  $S$  envolvente in  $m^2$   
 $K$ : corrección de campo cercano

La corrección de campo cercano ha de especificarse en caso de que los vectores de intensidad Sonora no atraviesen la envolvente perpendicularmente, o cuando el nivel de presión sonora haya sido obtenido cerca de la superficie (por tanto, la distancia  $r <$  longitud de onda), provocando un error de campo cercano. Los estándares ISO 3744/3745/3746 proporcionan información acerca de la magnitud de ambos errores y cómo reducirlos. En caso de haber medido la intensidad sonora en lugar del nivel de presión sonora (e.g. ISO 9614), se evitan dichos errores.

#### Determinación de la emisión de fuentes lineales

Las fuentes lineales se emplean en caso de que su dimensión mayor sea más de  $\frac{1}{2}$  de la distancia emisor - receptor. Pueden emplearse para representar fuentes tales como cintas de transporte, tuberías, etc. Por tanto, se emplea el nivel de potencia sonora por unidad de longitud  $L_w'$ . También pueden emplearse para modelar maquinaria móvil la cual ha de estar relacionada con su nivel de potencia sonora  $L_w$ . La potencia por unidad de longitud se deriva de la velocidad y el número de eventos que suceden (tráfico):

$$L_w' = L_{w_{pt}} + 10 \cdot \lg\left(\frac{Q}{h^{-1}}\right) - 10 \cdot \lg\left(\frac{v}{km/h}\right) - 30dB \quad (3)$$

#### Emisión de emplazamientos industriales multi - fuente

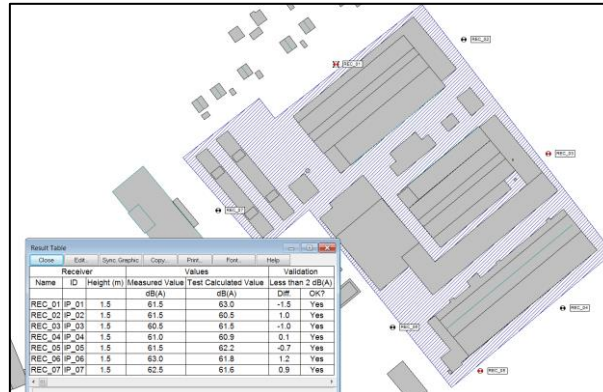
Los emisores superficiales se emplean para determinar el nivel de potencia sonora en una gran variedad de situaciones. Una de las aplicaciones es la determinación de la potencia de plantas industriales que generalmente incluyen multitud de emisiones. Este caso particular es relevante cuando dichas plantas industriales son parte de modelos más extensos (e.g. una ciudad), y por tanto el tráfico rodado suele ser el emisor más importante. Por otro lado, estas áreas industriales no se modelan teniendo en cuenta todas y cada una de las fuentes en el interior, y las mediciones no son posibles en muchos casos. Por tanto, la única posibilidad es realizar mediciones en el límite de la parcela que contiene la industria.

En este caso, se puede estimar el nivel de potencia Sonora por unidad de área mediante el cálculo de valores en los receptores situados en la misma posición que las medidas reales. Para ello se emplea una potencia arbitraria o "test". Después del cálculo, han de promediarse tanto los resultados calculados como los valores de medición y obtener el nivel de potencia sonora estimado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$L_{w,unknown}'' = L_{w,test} + \bar{L}_{p,measured} - \bar{L}_{p,calculated}dB \quad (4)$$

$L_{w,test}$ : nivel de potencia sonora arbitrario en dB  
 $L_{p,measured}$ : nivel de presión sonora promedio en los puntos de medición  
 $L_{p,calculated}$ : nivel de presión sonora promedio en los puntos de cálculo

En la Fig. 1, se muestra el resultado de la estimación de un emplazamiento industrial de acuerdo a esta técnica. Tras aplicar la Ecuación (4) los niveles de presión sonora se recalculan a partir del nivel de potencia corregido.

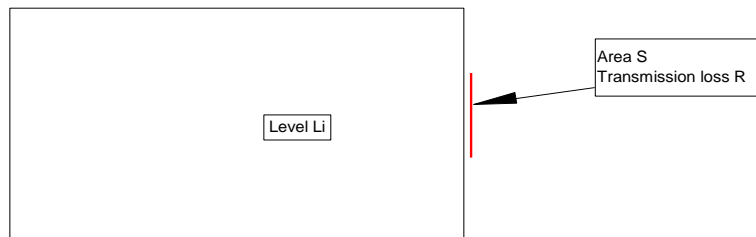


**Fig. 1:** Emplazamiento industrial multi-fuente simulado con un emisor superficial. La emisión resulta de la estimación a partir de mediciones en los límites de la industria

En el ejemplo mostrado en la Fig.1, el nivel de potencia sonora ha sido calculado mediante la Ecuación (4). La tabla muestra la diferencia entre los valores medidos y los calculados.

### Calculo de niveles de potencia sonora basados en el nivel interior de salas industriales

Los emisores superficiales verticales se emplean comúnmente para calcular la radiación de edificios industriales a partir de los niveles de presión sonora que han sido medidos o calculados en su interior.



**Fig.2 –** Parámetros de entrada para el cálculo del nivel de potencia sonora de una superficie radiante basado en el nivel interior de una sala industrial y la pérdida de transmisión

Si no hay disponibilidad de mediciones en el interior, puede calcularse el nivel interior en campo difuso de acuerdo a la teoría estadística de la reverberación acústica en salas:

$$L_i = PWL - 10 \lg \left( \frac{\alpha * S}{m^2} \right) + 6dB \quad (5)$$

- $L_i$ : nivel interior de la sala por frecuencia en dB
- $PWL$ : nivel de presión sonora de todas las fuentes presentes en la sala, en dB
- $A$ : área de absorción media por banda de frecuencia en  $m^2$
- $\alpha$ : coeficiente de absorción media de las superficies de la sala
- $S$ : área de las superficies de la sala en  $m^2$

El nivel de potencia Sonora radiado por el elemento superficial  $S$  ( $m^2$ ), por banda de frecuencia es:

$$L_w = L_i - R - 6 + 10 \cdot \lg(S) \quad (6)$$

Lw: nivel de potencia sonora por unidad de superficie  
R: pérdida de transmisión de la pared por banda de frecuencia

### CORRECCIÓN POR TIEMPO DE OPERACIÓN

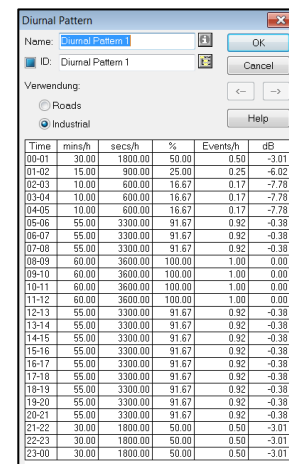
Independientemente de la potencia sonora, métodos como CNOSSOS-EU<sup>2</sup> incluye un número de parámetros de entrada considerados como esenciales. Esto significa que el rango de valores que el parámetro puede tomar puede hacer variar los valores de Lden o Lnight en más de ±2 dB(A) para un intervalo de confianza del 95%. Estos parámetros incluye el tiempo de operación (annual para los periodos día, tarde y noche), posición (x, y, z), dimensiones y orientación, directividad y condiciones de operación. La corrección por tiempo de operación puede calcularse mediante la fórmula (7)

$$C_w = 10 \lg \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (7)$$

T: periodo de actividad anual de la fuente por periodo , en horas  
T0: periodo de referencia expresado en horas (día: 12 horas, tarde: 4 horas, noche: 8 horas)

La corrección por tiempo de operación se implementa en el software CadnaA<sup>6</sup> por medio del uso de patrones diarios:

El patrón diario puede ser introducido como los minutos (o segundos) de operación, el porcentaje de tiempo en el cual la máquina está funcionando, el número de eventos/hora o la corrección final en dB. Una vez el patrón diario ha sido asignado a una Fuente, el parámetro adicional L1hMax (hora más ruidosa por periodo D, E, N) puede ser seleccionado y calculado.



Time	min/h	sec/h	%	Events/h	dB
00-01	30.00	1800.00	50.00	0.50	-3.01
01-02	15.00	900.00	25.00	0.25	-6.02
02-03	10.00	600.00	16.67	0.17	-7.78
03-04	10.00	600.00	16.67	0.17	-7.78
04-05	10.00	600.00	16.67	0.17	-7.78
05-06	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
06-07	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
07-08	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
08-09	60.00	3600.00	100.00	1.00	0.00
09-10	60.00	3600.00	100.00	1.00	0.00
10-11	60.00	3600.00	100.00	1.00	0.00
11-12	60.00	3600.00	100.00	1.00	0.00
12-13	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
13-14	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
14-15	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
15-16	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
16-17	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
17-18	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
18-19	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
19-20	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
20-21	55.00	3300.00	91.67	0.92	-0.38
21-22	30.00	1800.00	50.00	0.50	-3.01
22-23	30.00	1800.00	50.00	0.50	-3.01
23-00	30.00	1800.00	50.00	0.50	-3.01

### TÉCNICAS ADICIONALES DE CÁLCULO DE EMISIONES INDUSTRIALES

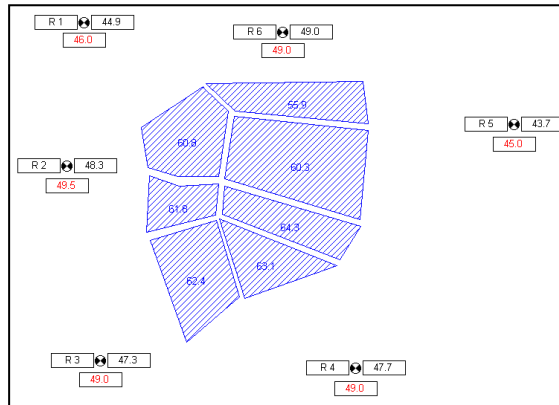
Como se ha podido ver en los párrafos anteriores, existe un número considerable de metodologías de medición aplicables al ruido industrial. Dichos estándares son considerados como las mejores prácticas para la determinación de niveles de potencia sonora, para diferentes tipos de fuentes industriales. Desafortunadamente, en ocasiones dichos métodos no están pensados para la obtención de datos aplicables al cálculo de mapas de ruido. Por otro lado, los métodos descritos pueden mejorarse gracias al uso de soluciones basadas en software con el fin de obtener los datos de entrada precisos y por tanto, obtener un modelo más realista.

### Cálculo de potencia sonora a partir de parámetros técnicos de fuentes

Uno de estos ejemplos es el cálculo de la emisión de fuentes a partir de parámetros técnicos. El software CadnaA<sup>6</sup> incorpora un módulo (SET) gracias al cual la potencia sonora puede ser calculada en función de los valores de parámetros tales como la capacidad nominal (en el caso de un motor). Esta característica puede ser empleada para calcular automáticamente niveles de potencia Sonora de fuentes, así como para estimar la transmisión entre elementos de un sistema.

### Optimización de emisores en emplazamientos multi-fuente

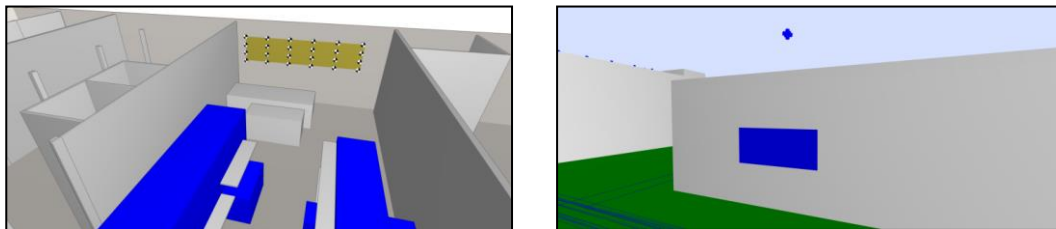
Otro ejemplo es el de la optimización automática de niveles de potencia sonora en emplazamientos industriales multi-fuente. Cuando la emisión de un emplazamiento industrial es desconocida, los valores de emisión de las diferentes áreas pueden ajustarse para permitir el nivel de potencia sonora máximo sin exceder un valor límite, que puede ser un límite establecido en la normativa o una medición real.



**Fig.5** – Optimización automática de emisores superficiales; los resultados de las mediciones se muestran en color rojo, mientras que los valores en color negro son calculados basándose en niveles de potencia sonora optimizados para siete emisores superficiales con emisión desconocida.

### Cálculos ruido interior – ruido exterior

Anteriormente se ha explicado un procedimiento para estimar niveles de potencia sonora emitida al exterior a partir de niveles en el interior de una sala industrial. No obstante, el cálculo de niveles interiores mediante la teoría estadística no considera la geometría de la sala así como otros efectos producidos por los obstáculos (difracción, absorción local, transmisión y dispersión), los cuales son relevantes para la obtención de resultados precisos. Una solución podría pasar por obtener un modelo interior detallado y generado en un software de predicción de ruido interior<sup>7</sup> que esté conectado al modelo de cálculo de ruido exterior. La siguiente ilustración muestra un modelo acústico detallado de una sala industrial, donde sus elementos (paredes, fuentes de ruido, obstáculos, etc.) han sido modelados con precisión. La superficie radiante ha sido cubierta por un array de receptores distribuidos homogéneamente por la superficie. Dicha superficie es asimismo modelada en CadnaA.



**Fig.6** – (Izda.) Modelo interior de una sala industrial en CadnaR<sup>7</sup> (Dcha.) Superficie radiante vertical modelada en el software de predicción CadnaA<sup>6</sup>

Después del cálculo de niveles en los receptores interiores, se determina y se exporta el valor medio a CadnaA.



Tabla 1 – Resultados en el array de receptores

Receptor	Niveles de Presión Sonora (dB)					
	125	250	500	1000	2000	4000
RP_01	70,30	70,3	70,3	70,3	70,2	69,8
RP_02	69,40	69,4	69,3	69,3	69,2	68,9
RP_03	69,80	69,8	69,8	69,7	69,6	69,3
RP_04	69,90	69,9	69,9	69,8	69,7	69,4
RP_05	69,90	69,9	69,9	69,8	69,7	69,4
RP_06	69,00	69	69	68,9	68,8	68,5
RP_07	71,40	71,4	71,3	71,3	71,2	70,8
RP_08	70,70	70,7	70,6	70,6	70,5	70,2
RP_09	71,30	71,3	71,2	71,2	71,1	70,7
RP_10	71,40	71,4	71,4	71,3	71,2	70,9
RP_11	71,20	71,2	71,2	71,1	71	70,7
RP_12	70,50	70,5	70,5	70,4	70,3	69,9
RP_13	71,30	71,3	71,3	71,2	71,1	70,8
RP_14	70,60	70,6	70,6	70,5	70,4	70,1
RP_15	71,20	71,2	71,2	71,1	71	70,7
RP_16	71,20	71,1	71,1	71,1	71	70,6
RP_17	70,90	70,9	70,8	70,8	70,7	70,3
RP_18	70,50	70,5	70,4	70,4	70,3	69,9
RP_19	71,30	71,2	71,2	71,2	71,1	70,7
RP_20	70,60	70,5	70,5	70,5	70,4	70
RP_21	70,90	70,9	70,9	70,8	70,7	70,4
RP_22	71,00	71	70,9	70,9	70,8	70,4
RP_23	70,90	70,9	70,8	70,8	70,7	70,3
RP_24	70,30	70,3	70,2	70,2	70,1	69,7
<b>Nivel Medio</b>	<b>70,65</b>	<b>70,63</b>	<b>70,60</b>	<b>70,55</b>	<b>70,45</b>	<b>70,10</b>

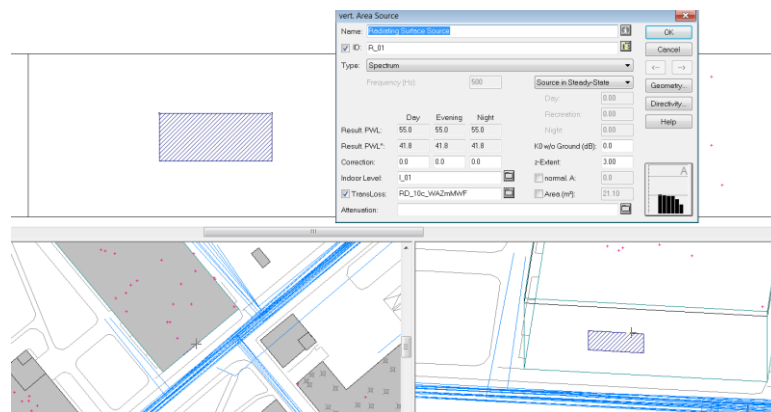
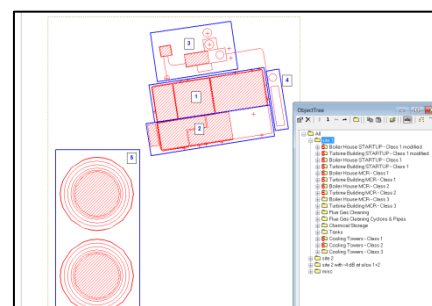


Fig.8 – Determinación del nivel de potencia sonora a partir del nivel de presión sonora previamente importado y de la pérdida de transmisión

## PLANIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EMPLAZAMIENTOS INDUSTRIALES

Durante la planificación de plantas industriales, deben estudiarse varias medidas contra el ruido. Como ejemplo, un modelo de planta de energía se muestra para ilustrar la organización llevada a cabo. Cada sección se organiza mediante una estructura de carpetas jerárquica. Esto permite modificar aspectos



como las condiciones de operación o cambiar sistemas desde un mismo modelo. En el ejemplo, existen 3 tipos de reducción provocado por el cambio de las condiciones de operación (Clase 3: sin reducción; Clase 2: Reducción de 3 Db; Clase 3: Reducción de 6 dB). Esta organización permite comparar variantes y comprobar la efectividad de las medidas mas En las figuras inferiores se comparan dos situaciones. El color rojo significa que ninguna medida ha sido aplicada a los sistemas correspondientes, mientras que los colores verde y amarillo significan que se han aplicado las medidas de clase 2 ó 3. Este planteamiento del problema permite optimizar la solución final con el fin de reducir el ruido en los receptores hasta alcanzar niveles compatibles, con el menor coste posible.

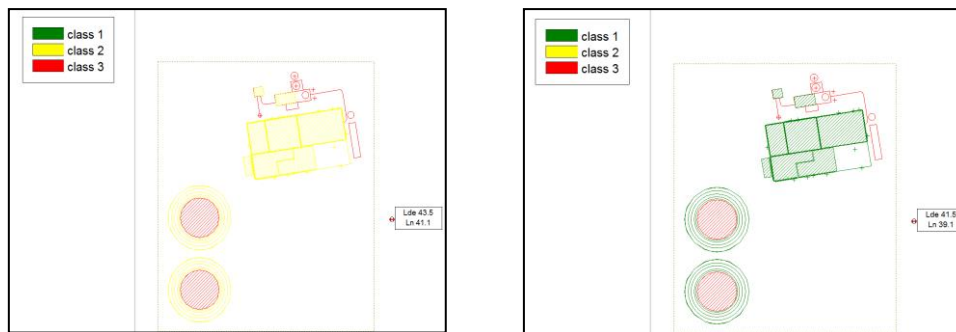


Fig.9 – Comparación entre dos escenarios: Reducción clase class 1 (Izda.) vs. Clase 2 (Dcha.)

## REFERENCIAS

1. ISO 9613, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2 (1996-12): General method of calculation,
2. European Commission, *CNOSSOS-EU JRC Reference Report*, (2012)
3. ISO 3744 Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Engineering method in an essential free field over a reflecting plane
4. ISO 3746:2010, Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane
5. ISO 8297:1994, Acoustics -- Determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment -- Engineering method
6. DataKustik GmbH, "CadnaA – Software for Environmental Noise", [www.datakustik.com](http://www.datakustik.com)
7. DataKustik GmbH, "CadnaR – Software for Interior Sound", [www.datakustik.com](http://www.datakustik.com)