

## IMPLEMENTACIÓN DE LA DIRECTIVA 2015/996/CE EN SOFTWARE DE CÁLCULO DE MAPAS DE RUIDO, SEGÚN NORMA ISO 17534

PACS: 43.28.g | 43.28.js

Notario Tévar, Antonio  
DataKustik GmbH  
Dornierstr. 4  
82205 Gilching  
Alemania  
+49 8105 77467 0  
[antonio.notario@datakustik.com](mailto:antonio.notario@datakustik.com)

**Palabras Clave:** Modelos de cálculo, CNOSSOS-EU, Control de Calidad, Software de Simulación

### ABSTRACT

La Directiva de Ruido Ambiental requiere la realización de Mapas Estratégicos de Ruido (MER) mediante la aplicación de los métodos de cálculo comunes adoptados en la Directiva 2015/996/C. Está previsto que a nivel europeo su uso obligatorio comience a partir de la cuarta ronda en 2022. En esta comunicación se analizará la implementación de la Directiva 2015/996/CE en un software comercial de cálculo de mapas estratégicos de ruido, incluyendo sus aspectos técnicos y operativos, así como los elementos más importantes que deben tenerse en cuenta con el fin de cumplir los estándares de calidad aplicables.

### INTRODUCCION.

En un futuro cercano, los modelos de cálculo CNOSSOS-EU [1] serán los empleados para la predicción acústica, de forma armonizada, en el marco de la Directiva 2002/49/CE. Estos métodos de cálculo no deben presentar desviaciones en los resultados, al tratarse de un método común y, por tanto, es de interés por parte de todas las partes implicadas que la implementación de dichos modelos de cálculo pueda ser aprobada con el fin de asegurar la aplicación de los mismos algoritmos de cálculo.

La serie de normas ISO 17534-1 [2] establece el marco de control de calidad aplicable a la implementación de algoritmos de cálculo en software de predicción a nivel internacional. En contraposición al método de cálculo original, que incluye todas las fórmulas y guías para la implementación de forma general, la aplicación de la norma anteriormente citada implica un método debidamente claro y documentado que resulta en un informe técnico. Como ejemplo, la norma ISO 17534-3 [3] trata el control de calidad en la implementación del método de cálculo ISO 9613-2 [4] en software.

Estos informes técnicos específicos para cada norma de cálculo se basan en tres pilares fundamentales. El primer pilar incluye aclaraciones o incluso anexos adicionales que tratan de corregir vacíos presentes en la descripción oficial de la norma de cálculo. Este pilar va de la mano con el segundo, consistente en la creación de casos de test y su aplicación paso a paso, incluyendo los resultados finales. El paquete completo de casos de test debe cubrir los algoritmos y estrategias de cálculo aplicables a la norma más importantes y en especial, aquellos aspectos tratados en los anexos adicionales previamente citados. De acuerdo con la norma ISO 17534 Parte 1, los casos de test deben incluir escenarios de cálculo tan simples como sea posible, aumentando la complicación solo en caso de que sea necesario para comprobar el cálculo correcto de la situación bajo estudio. Estos casos de test no son un examen, sino que sirven de soporte tanto a los desarrolladores de software como a los usuarios. La publicación de los casos de prueba son principalmente responsabilidad de los diseñadores del propio método de cálculo, de los autores de la norma o de otras personas o grupos involucrados en la finalización de esta, y deben asegurarse que dichos casos son publicados conjuntamente con la norma, de acuerdo con los requisitos anteriormente mencionados. En caso contrario, el paquete de casos de prueba puede formar parte del informe final según ISO 17534. En el caso concreto de CNOSSOS-EU es obvio que existen aún muchos aspectos que necesitan ser clarificados y los casos de prueba han de ser desarrollados e integrados. El tercer pilar es un certificado de conformidad firmado por el desarrollador de software donde se declara que la implementación del método ha sido conforme a la documentación original y a los posibles anexos posteriores. Esta declaración de conformidad también asegura que los casos de test han sido calculados correctamente de acuerdo a una versión específica del software.

#### **ASPECTOS RELATIVOS A LA IMPLEMENTACION DEL CNOSSOS-EU EN SOFTWARE**

El modelo de propagación CNOSSOS-EU está en gran parte basado en el método francés NMPB 2008 [5]. Aun siendo más simple que el modelo Harmonoise [6], análisis detallados muestran que es complicado cumplir los requisitos de calidad según ISO 17534-1 sin añadir convenciones adicionales. El modelo implementado en distintas plataformas de software y solamente basándose en la documentación original muestra demasiados grados de libertad como para asegurar el grado de precisión necesario en situaciones típicas de simulación.

Es necesario remarcar que esto no debe ser entendido como críticas al modelo de propagación CNOSSOS-EU, sino como ejemplos de conclusiones sacadas después de la ejecución de distintos proyectos.

Como cualquier otro método de ingeniería basado en el cálculo de rayos, CNOSSOS-EU reemplaza la incidencia de las ondas sonoras sobre el terreno con revestimiento natural y artificial mediante algunas trayectorias de rayo definidas por el modelo. Incluso en el caso más simple de un emisor puntual y un receptor de forma que la trayectoria más corta no encuentra ningún obstáculo, es necesario anexar algunas especificaciones adicionales.

#### **Absorción Atmosférica**

De acuerdo a la documentación oficial, la atenuación atmosférica  $\alpha_{atm}$ , expresada en dB/km debe estar en concordancia con la norma ISO 9613-1 [7] y determinada por la frecuencia central nominal de cada banda de frecuencia. Con el fin de permitir diferentes temperaturas y

condiciones de humedad relativa es necesario aplicar las fórmulas de B.1 a B.3 del anexo B y las ecuaciones (3) a (5) del capítulo 6.2 de la norma ISO 9613-1. De acuerdo con este formalismo según la ISO 9613-1 la banda central de cada frecuencia se calcula mediante la ecuación (6) de la norma. Esto resulta en los coeficientes de absorción atmosférica que se muestran en la tabla 1 de la norma ISO 9613-1. No obstante, la ecuación (6) no da como resultado la banda central exacta sino que, por ejemplo, para la última frecuencia el resultado es 7943,28 Hz en lugar de 8000 Hz. Por otro lado, todos los resultados en función de la frecuencia presentes en las tablas están referidos a 8000 Hz. En conclusión, es recomendable aplicar las bandas centrales exactas desde 125 Hz a 8000 Hz para calcular el coeficiente de atenuación atmosférica.

### Cálculo del Factor Medio de Terreno $G_{path}$

En el caso de que un rayo se propague sobre un terreno con características de absorción variable descritas mediante un coeficiente de absorción de terreno  $G$ , es necesario calcular un valor medio denominado  $G_{path}$

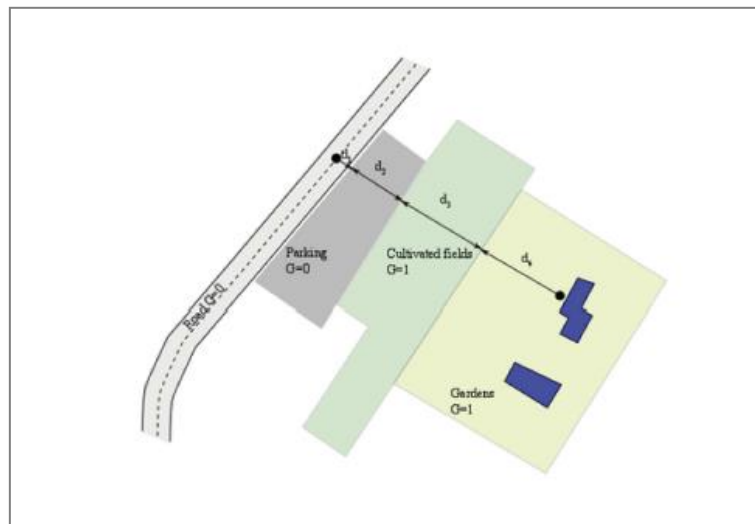


Figura 1: Diferentes terrenos con longitudes  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  y  $d_4$  (Figura 2.5.b en [1] )

$G_{path}$  debe calcularse como la media:

$$G_{path} = \frac{\sum G_i d_i}{\sum d_i} \quad (1)$$

No obstante, la Figura 1 es una representación en dos dimensiones del terreno – no se especifica los casos en los que la altura del terreno varía y el rayo cruza tanto superficies planas como inclinadas. Por supuesto tampoco especifica nada en el caso de un rayo que cruza sobre edificios que, por otro lado, es muy común en zonas construidas.

Teniendo en cuenta los ángulos típicos de las superficies de terreno, un buen compromiso sería promediar los factores  $G$  en una proyección del plano de referencia x-y y por tanto, despreciar la extensión de dichas áreas que son paralelas a la superficie inclinada. Para poder aplicar el

método de forma general sería una ventaja adicional incluir las azoteas y otras superficies reflectantes en la determinación. Cualquier otra solución necesita de especificaciones adicionales que pueden ser complejas.

#### **Apantallamiento – Difracción Sobre los Bordes horizontales y Alrededor de los Ejes Verticales**

La estrategia de selección de rayos desde una Fuente S hasta un receptor R cuando el rayo está apantallado por obstáculos es en multitud de ocasiones complicada y por tanto, necesita de ciertas especificaciones adicionales que no sean ambiguas. La Figura 2 muestra una posible estrategia, de hecho recomendada, en el caso de que un objeto – en este caso un simple edificio cúbico – bloquee el rayo entre ambos. Una contribución se calcula con una trayectoria en el plano vertical  $E_v$  que contiene la fuente S y el receptor R. Adicionalmente se incluyen dos rayos difractados en el plano lateral  $E_L$  que también contiene la fuente S y el receptor R, y es perpendicular al plano  $E_v$ . Uno de los puntos más importantes es clarificar como los rayos laterales se construyen si existen muchos obstáculos entre la fuente y el receptor. Debido a la gran variedad de trayectorias posibles es necesario definir una estrategia clara, concisa y, por tanto, libre de ambigüedades.

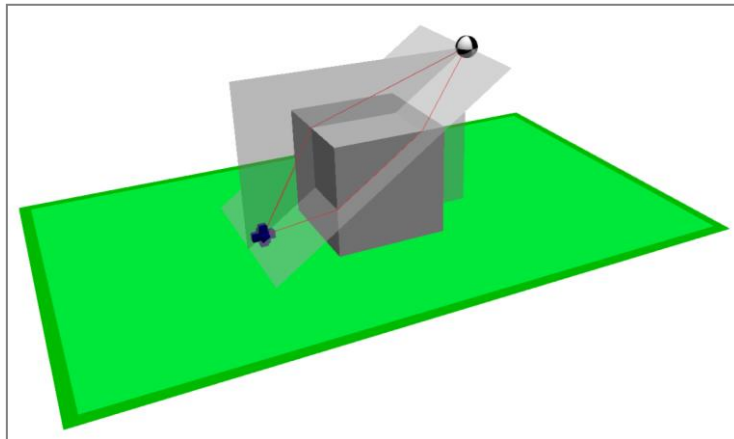


Figura 2: Plano vertical  $E_v$  y plano lateral  $E_L$  incluyendo las trayectorias de los rayos considerados

Cuando existe un borde de difracción entre la Fuente y el receptor, CNOSSOS-EU requiere aproximar el perfil de terreno mediante un plano en cada lado. Por tanto, debe clarificarse que en casos como el mostrado en la Figura 3 este plano medio entre S y el borde de difracción se calcula a partir del polígono coloreado en rojo, el cual contiene la forma del edificio.

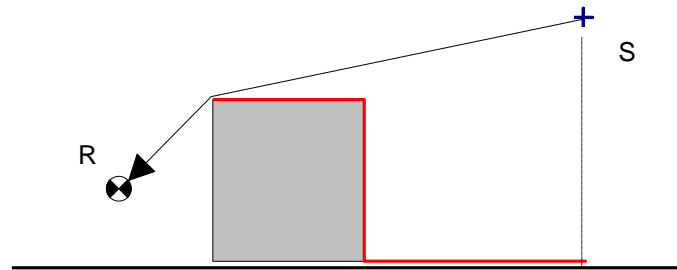


FigurA 3: Los perfiles que contienen el edificio determinan el plano medio de terreno

Estos son sólo algunos ejemplos de estrategias que necesitan aclaraciones adicionales. Es obvio que no tiene sentido dejar estas decisiones a merced de los desarrolladores de software independientemente porque daría como resultado una gran incertidumbre en los resultados producidos por diferentes softwares de simulación.

#### LOS CASOS DE TEST

Como se ha comentado anteriormente, la base de un Informe Técnico específico para una norma de cálculo son casos de test que incluyen resultados intermedios paso a paso y resultados finales, con el fin de dar soporte tanto a desarrolladores como a usuarios. Por otro lado, las estrategias anteriormente citadas deben tenerse en cuenta según las especificaciones y cada caso de test debe ser tan simple como sea posible.

Las figuras 4 y 5 muestran el escenario de un caso de test. Las propiedades acústicas del terreno son diferentes en las tres secciones A1, A2 y A3 (factores de terreno  $G$  de 0.9, 0.5 y 0.2) y la altura absoluta del terreno aumenta en los ejes K1 y K2 de 0 a 10 m. Existen dos pantallas acústicas de 12 m de altura absoluta, y el coeficiente de absorción de la pantalla B1 varía en las bandas de frecuencia de 63 Hz a 8000 Hz entre 0.1 y 0.7. La altura absoluta de la fuente S y receptor R es de 1 m y 11.5 m respectivamente.

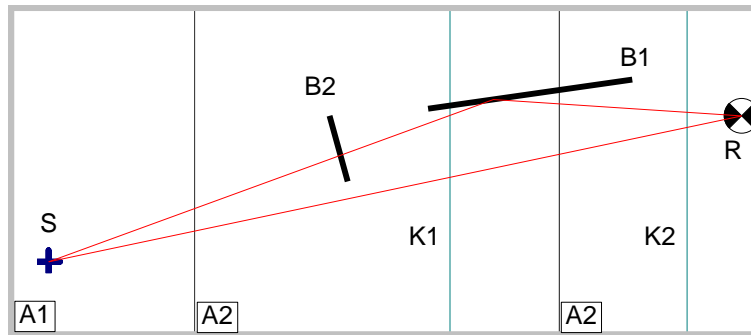


Figura 4: Caso test con un pantalla difractora y otra pantalla reflectante

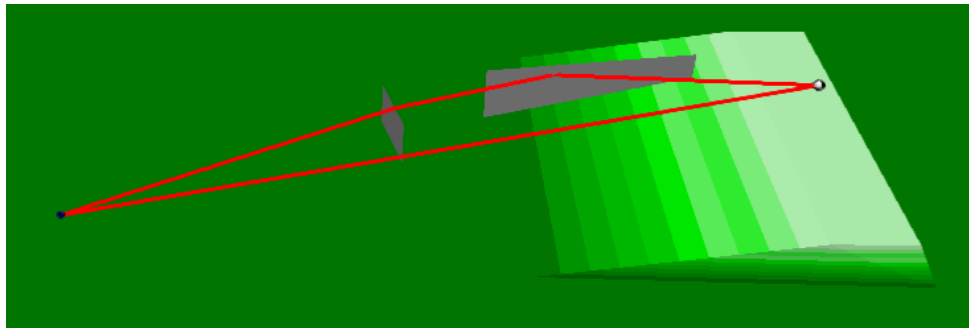


Figura 5: Escenario del caso de test en vista 3D

El principal objetivo de este caso de es comprobar si la influencia del apantallamiento causado por la pantalla B2 en el rayo sonoro reflejado en la pantalla B1 es calculado de acuerdo con la documentación.

La información que necesita ser aportada para el informe se compone 8 tablas, incluyendo los resultados intermedios y el resultado final. Como ejemplo se muestran a continuación la tabla 1, que incluye los pasos de cálculo de la radiación sonora directa y la tabla 2, que incluye los resultados de cálculo del sonido reflejado. Las abreviaturas no se explican en la presente comunicación, pero están de acuerdo a la documentación oficial [1]

Tabla 1: Cálculo paso a paso del sonido directo

f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
$L_W$ in dB	93	93	93	93	93	93	93	93	
$\alpha_{atm}$	0.1	0.4	1.0	1.9	3.7	9.7	33.1	118.4	
$A_{atm}$ in dB	0.02	0.08	0.20	0.37	0.71	1.89	6.43	23.02	
$A_{div}$ in dB	56.78	56.78	56.78	56.78	56.78	56.78	56.78	56.78	
$A_{boundary,H}$ in dB	-1.26	-1.26	-1.26	2.12	-1.26	-1.26	-1.26	-1.26	
$A_{boundary,F}$ in dB	-1.26	-1.26	-1.26	-1.26	-1.26	-1.26	-1.26	-1.26	<b>Total</b>
$L_H$ in dB	37.46	37.40	37.28	33.73	36.77	35.60	31.05	14.46	44.54
$L_F$ in dB	37.46	37.40	37.28	37.11	36.77	35.60	31.05	14.46	44.95
<b>L in dB</b>	<b>37.46</b>	<b>37.40</b>	<b>37.28</b>	<b>35.74</b>	<b>36.77</b>	<b>35.60</b>	<b>31.05</b>	<b>14.46</b>	<b>44.75</b>
<b>A-weighting in dB</b>	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0.0	1.2	1.0	-1.1	
<b><math>L_A</math> in dB</b>	<b>11.26</b>	<b>21.30</b>	<b>28.68</b>	<b>32.54</b>	<b>36.77</b>	<b>36.80</b>	<b>32.05</b>	<b>13.36</b>	<b>41.41</b>

Tabla 2: Cálculo paso a paso del sonido apantallado y reflejado

f in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
$L_w$ in dB	93	93	93	93	93	93	93	93	
$dL_{abs}$	-0.46	-0.97	-1.55	-2.22	-3.01	-3.98	-5.23	-3.01	
$dL_{retrodif}$	2.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
$L_w$ in dB	<b>90.08</b>	<b>92.03</b>	<b>91.45</b>	<b>90.78</b>	<b>89.99</b>	<b>89.02</b>	<b>87.77</b>	<b>89.99</b>	
$\alpha_{atm}$	0.1	0.4	1.0	1.9	3.7	9.7	33.1	118.4	
$A_{atm}$ in dB	0.02	0.08	0.21	0.38	0.73	1.92	6.56	23.48	
$A_{div}$ in dB	56.95	56.95	56.95	56.95	56.95	56.95	56.95	56.95	
$A_{boundary,H}$ in dB	5.62	7.40	9.65	12.22	15.00	17.88	20.83	22.99	
$A_{boundary,F}$ in dB	5.09	6.70	8.79	11.26	13.97	16.82	19.75	22.72	<b>Total</b>
$L_H$ in dB	27.49	27.60	24.65	21.23	17.32	12.27	3.44	-13.43	32.13
$L_F$ in dB	28.01	28.31	25.50	22.19	18.34	13.32	4.51	-13.16	32.84
$L$ in dB	<b>27.76</b>	<b>27.97</b>	<b>25.10</b>	<b>21.74</b>	<b>17.86</b>	<b>12.83</b>	<b>4.01</b>	<b>-13.29</b>	<b>32.50</b>
A-weighting in dB	-26.2	-16.1	-8.6	-3.2	0.0	1.2	1.0	-1.1	0.0
$L_A$ in dB	<b>1.56</b>	<b>11.87</b>	<b>16.50</b>	<b>18.54</b>	<b>17.86</b>	<b>14.03</b>	<b>5.01</b>	<b>-14.39</b>	<b>23.47</b>

Las figuras 6 y 7 muestran otro ejemplo de un caso de test empleado en la comprobación de la difracción alrededor de un edificio de geometría compleja, con propiedades del suelo cambiantes y distintas alturas.

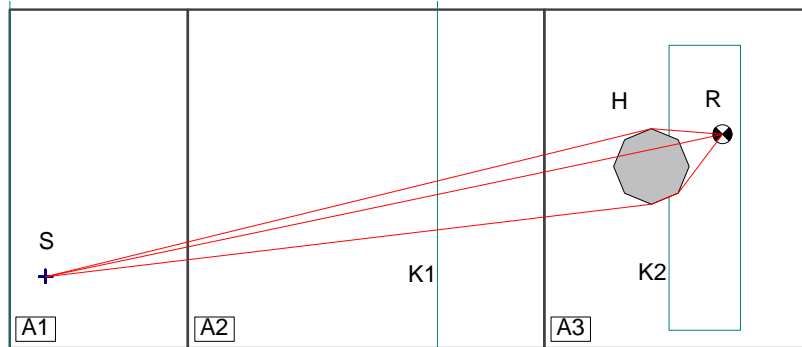


Figura 6: Difracción de un edificio compuesto por 8 bordes sobre terreno de propiedades cambiantes

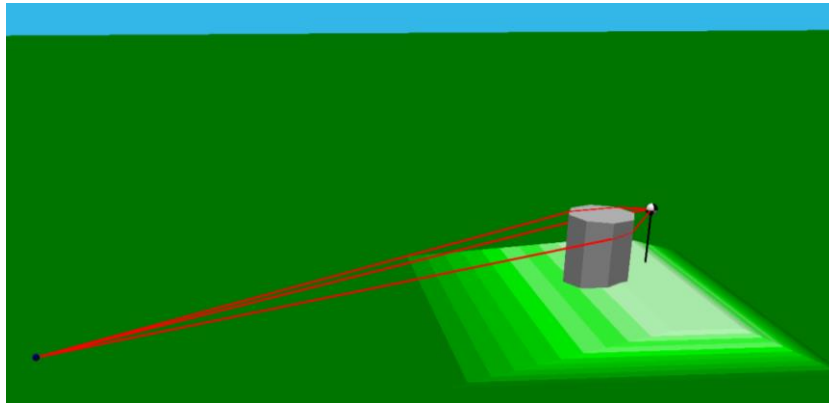


Figura 7: Vista 3D del caso de test con edificio complejo

Basándonos en el desarrollo de varios casos de test podemos asumir que pueden aparecer problemas en la aplicación del “plano medio” en vez de utilizar para el cálculo el perfil real de terreno en casos donde los edificios y otros obstáculos bloquean el rayo directo. Desde nuestro punto de vista, la utilización del control de calidad a la hora de implementar los modelos CNOSSOS-EU es totalmente necesaria, con el fin último de conseguir una herramienta aceptable y precisa en el marco de una estrategia de uso de métodos armonizados para gestionar el ruido ambiental en Europa.

## REFERENCIAS

- 1 COMMISSION DIRECTIVE (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2001/49/EC of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union, L 168, (2015)
- 2 ISO 17534-1:2015, Acoustics - Software for the calculation of sound outdoors - Part 1: Quality requirements and quality assurance
- 3 ISO 17534-3:2015, Acoustics - Software for the calculation of sound outdoors - Part 3: Recommendations for quality assured implementation of ISO 9613-2 in software according to ISO 17534-1
- 4 ISO 9613-2:1993, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation
- 5 NF S 31-133:2011, Acoustique - Bruit dans l'environnement - Calcul de niveaux sonores, ISSN 0335-3931
- 6 Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise, Final Technical Report, reference HAR7TR-041213-AEAT04 (2005)
- 7 ISO 9613-1:1993, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere