

## CONTROL DE RUIDO INDUSTRIAL MEDIANTE UN MODELO COMPUTACIONAL: ESTUDIO DE CASO

Pablo G. Girón<sup>\*</sup>, Martín Sequeira<sup>\*</sup>, Adrián P. Azzurro<sup>\*</sup> y Víctor H. Cortínez<sup>\*†</sup>

<sup>\*</sup> Grupo de Análisis de Sistemas Mecánicos  
Facultad Regional Bahía Blanca  
Universidad Tecnológica Nacional  
11 de Abril 461 (B8000LMI), Bahía Blanca, Argentina  
e-mail: pgiron@frbb.utn.edu.ar, vcortine@frbb.utn.edu.ar

<sup>†</sup> CONICET, Argentina

**Key words:** Ruido industrial, mecánica computacional, simulación.

**Abstract.** *El presente trabajo aborda la problemática de la modelización computacional de campos acústicos generados en recintos industriales por equipos mecánicos y de procesos. Se realiza la modelización computacional de una planta petroquímica, junto con la calibración del modelo a partir del relevamiento de niveles de presión acústica en dicha planta, así como la medición de potencia sonora en las fuentes a efectos de caracterizar las mismas. Para la modelización se utiliza el método de Ray Tracing a través de un código comercial conocido como SoundPlan versión 6.2. Dicho programa permite modelizar tanto recintos abiertos como cerrados. Utiliza para ello modelos de propagación aceptados por normas europeas, tanto VDI como ISO.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas ambientales más serios en los establecimientos industriales viene dado por el excesivo ruido generado por los diferentes equipos involucrados en los procesos. Dicho ambiente sonoro puede ser perjudicial tanto desde el punto de vista Psicológico como fisiológico para los operarios de la planta. Por tal motivo el control de la contaminación acústica constituye una actividad de importancia en prácticamente cualquier establecimiento industrial. Más aun considerando las cada vez más exigentes regulaciones gubernamentales, ambientales y laborales.

Para implementar un programa de control de ruido se necesita realizar un plan de mediciones de los niveles sonoros existentes y su comparación con los valores admisibles. De esta manera pueden detectarse los lugares conflictivos. A partir de dicho diagnóstico es posible adoptar medidas organizativas de mitigación de los efectos del ruido sobre las personas, tales como limitación del tiempo de exposición por parte de los trabajadores, uso supervisado de elementos de protección auditiva, etc.

Sin embargo, no siempre es posible solucionar completamente el problema con ese tipo de estrategias, debiéndose entonces diseñar soluciones tecnológicas para la reducción de los niveles sonoros. En este trabajo se presenta un estudio realizado en una planta petroquímica ubicada en el Polo industrial de Bahía Blanca. El objetivo de dicho estudio consistió en la determinación de soluciones técnicas para reducir los niveles de ruido existente en los diferentes lugares de la planta. Para llevar a cabo este cometido se realizó una exhaustiva tarea de medición de niveles sonoros y sus componentes espectrales. Con tales valores se calibró un modelo computacional de acústica de la planta. Específicamente se utilizó un programa comercial denominado Soundplan, que está basado en el método de Ray Tracing. Esta etapa de calibración resultó esencial debido a la falta de conocimiento preciso de las potencias acústicas de cada fuente en condiciones de operación y la imposibilidad de realizar una parada de planta para la realización de mediciones individuales.

Posteriormente el modelo fue utilizado para analizar los cambios en el ambiente acústico debido a la implementación “in silico” de diferentes medidas de atenuación. A partir del análisis comparativo de dichas soluciones se obtuvieron las estrategias más apropiadas para lograr la reducción buscada.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema que motivó la realización de la presente investigación fue la existencia de niveles sonoros elevados en áreas de un planta industrial, los que deben disminuirse para poder cumplir con la legislación vigente, y en particular con el resolución 295/03<sup>1</sup> que modificó al decreto 351/79<sup>2</sup>, reduciendo los niveles de exposición para jornadas laborales de 8 hs. a 85 dB(A). Los niveles encontrados excedían, en algunos casos, los 105 dB(A). A efectos de poder estudiar medidas de atenuación para mitigar esta situación, se propuso en primera instancia la modelización general de la planta mediante el método de Ray Tracing. Luego, sobre la base de este modelo computacional calibrado sería posible introducir medidas



Esta tarea básica de relevamiento fue realizada en áreas tanto cerradas como abiertas de la planta.

### 3.2 Modelización computacional del problema:

El tratamiento computacional del fenómeno de la propagación de ruido permite la utilización de diferentes técnicas numéricas entre las que se encuentran el método de Elementos Finitos, método de elementos de contorno, métodos energéticos estadísticos y los métodos de la acústica geométrica tal como el método de Ray Tracing o trazado de rayos.

La modelización computacional del problema se realizó utilizando un software comercial conocido como SoundPlan 6.2, basado en el método de Ray Tracing. Esta técnica computacional se aplica en conjunto con diversas normas europeas que proponen modelos de propagación de ruido provenientes de fuentes industriales. En particular, se han utilizado en el presente trabajo los modelos de propagación propuestos por la norma ISO 9613 Parte 2<sup>6</sup>, para el caso de áreas abiertas, y la VDI 3760E<sup>7</sup> para el caso de propagación de ruido en ambientes cerrados. El principio utilizado por el método de Ray Tracing se muestra esquemáticamente en la figura 2.

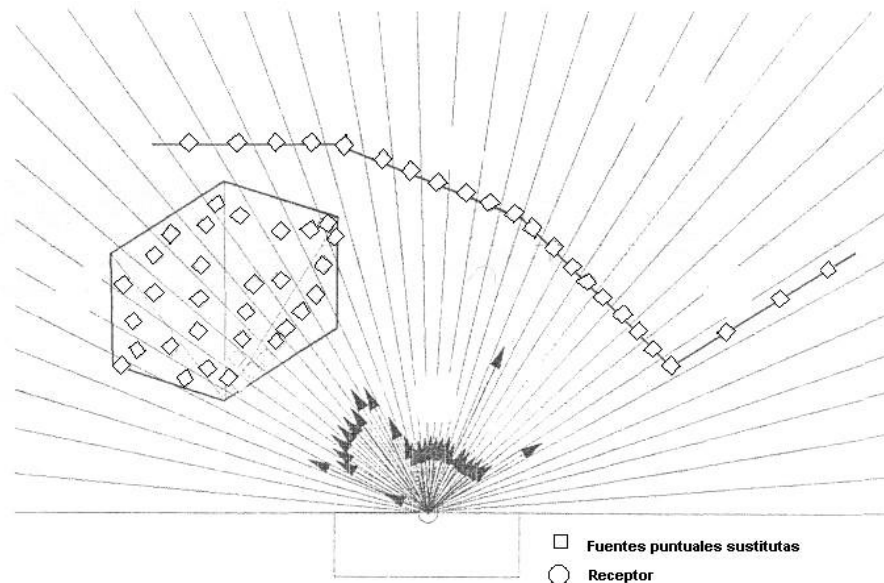


Figura 2: Principio del método de búsqueda (fuente: Manual Soudplan)

La norma ISO 9613 parte 2 especifica un método de ingeniería para predecir niveles de presión sonora teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas desde fuentes con potencia sonora conocida y en espacios abiertos. El método consiste en un algoritmo para calcular la atenuación del sonido en bandas de octavas, originadas desde una o más fuentes puntuales, o fuentes lineales o de área que pueden tratarse como combinaciones de fuentes puntuales.

En los últimos años esta norma ha sido utilizada para calcular la atenuación del ruido durante su propagación en ambientes externos desde una variedad de fuentes. Este standard tiene en cuenta diferentes condiciones climáticas (por ejemplo inversión térmica) y de viento, así como diferentes categorías de superficies con sus correspondientes características absorbentes.

La ecuación básica para calcular nivel sonoro continuo equivalente (NSCE) en bandas de octavas está dado, para una sola banda, por:

$$L_s = [L_w + D_1 + K_0] - [D_s + \sum D] \quad (1)$$

donde  $L_s$  es la potencia sonora producida por la fuente de ruido en una banda de octavas,  $D_1$  es la corrección por directividad de la fuente,  $K_0$  por la propagación esférica,  $D_s$  es la atenuación en bandas de octavas debida a la dispersión geométrica y  $\sum D$  tiene en cuenta diferentes factores:

$$\sum D = D_{atm} + D_{gr} + D_{bar} + D_{misc} \quad (2)$$

$D_{atm}$  es la atenuación debida a la absorción atmosférica del aire,  $D_{gr}$  es la atenuación debida al efecto del piso y efectos meteorológicos,  $D_{bar}$  es la atenuación debida a efectos de barreras acústicas y  $D_{misc}$  es la atenuación debida a otros efectos. La absorción del aire es evaluada en función de la norma ISO 9613 part 1 o ANSI 126. La absorción del piso está vinculada a las mayores propiedades absorbentes de la superficie y varían entre pisos duros (altamente reflectivos) o blandos. El término  $D_{bar}$  corresponde al efecto de apantallamiento generado por barreras naturales o artificiales y está determinado por:

$$D_{bar} = 10 \cdot \log(C_1 + C_2 / \lambda \cdot C_3 \cdot Z \cdot K_w) \text{ dB} \quad (3)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda en la banda considerada,  $Z$  es la longitud adicional de la trayectoria recorrida por el rayo debido a la barrera,  $K_w$  el factor de corrección por influencia meteorológicas y  $C_1$  a  $C_3$  constantes.

El término  $D_s$  está expresado en general, para una fuente puntual, como:

$$D_s = 20 \cdot \log(R) + 11 \text{ dB(A)} \quad (4)$$

donde  $R$  es la distancia desde la fuente al punto considerado como receptor.

Para la modelización de la propagación en ambientes cerrados, SoundPlan utiliza la norma VDI 3760E, como ya fue expresado. Esta metodología se utilizó para evaluar la propagación

del ruido en ambientes tales como salas de sopladores y salas de proceso. Esta norma utiliza una descripción geométrica básica del recinto, permitiendo incorporar diferentes coeficientes de absorción para cada superficie del recinto. Para la modelización, el sistema usa las siguientes simplificaciones:

- Se utilizan las leyes de la acústica geométrica<sup>7</sup>.
- Las superficies, que son todas planas, reflejan la energía espectralmente como si fueran provenientes de un plano infinito.
- Todas las superficies absorben energía sonora de acuerdo con su coeficiente de absorción, que es independiente del ángulo de incidencia.
- El sonido es tratado como una función de energía y no como una función de la presión.
- Las energías se suman directamente, por lo que no se tienen en cuenta los efectos de fase.

La dispersión del sonido debido a los rebotes en los obstáculos existentes en la habitación (máquinas, cañerías, etc.) se tiene en cuenta solo en forma estadística, es decir no se considera la geometría de cada uno y su interacción con los rayos proyectados. Por lo tanto se define, como parámetro, la densidad de objetos:

$$q = S / (4 \cdot V) \text{ dB(A)} \quad (5)$$

donde S es la superficie total de todos los objetos que hay dentro del recinto y V es el volumen de la misma, considerando aquellos objetos más grandes que la longitud de onda.

La energía acústica en la habitación consiste en la suma de la energía proveniente del campo directo más el campo reverberante. El sonido directo es aquel que se propaga directamente desde la fuente al receptor sin obstáculos intermedios. Para una fuente puntual en una habitación infinitamente larga esta fracción de la energía incidente es:

$$E_d(r) = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot c \cdot r^2} \cdot e^{-(q+m)r} \quad (6)$$

donde P es la potencia sonora de la fuente, c la velocidad del sonido, r la distancia entre fuente y receptor y m la constante de amortiguamiento del aire. La densidad de energía del sonido directo en una habitación cerrada es la suma de todas las energías de la fuente original y las fuentes espejo. Para las fuentes espejo, la pérdida por reflexión debe tomarse en cuenta. La suma es:

$$E_d = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (1-\alpha)^i (1-\alpha)^j (1-\alpha)^k E_d(r_{ijk}) \quad (7)$$

donde los  $\alpha_{i,j,k}$  son los coeficientes de absorción medios de los planos reflectivos de la habitación y  $r_{i,j,k}$  son las distancias de las fuentes espejo del mismo orden al receptor.

Para el cálculo de la energía debida al campo reverberante se utiliza el método desarrollado por Jovicic<sup>8</sup> en 1986. La densidad de energía debida al sonido disperso en una habitación plana es:

$$E_d(r) = \frac{3 \cdot q \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot c \cdot r} \cdot e^{(-r(3 \cdot q \cdot a)^{0.5})} \quad (8)$$

El exponente  $a$  se debe a la absorción media de los objetos reflectantes, mientras que el exponente  $b$  describe la energía perdida debido a la absorción de piso y techo.

La densidad de energía en una habitación cerrada infinita es análoga la de la ecuación 7:

$$E_d = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (1 - \alpha_x)^i (1 - \alpha)^j (1 - \alpha_y)^k E_S(r_{ijk}) \quad (9)$$

La modelación se completa con el cálculo de la propagación interna en los edificios industriales, para luego, conocidos los niveles de presión sonora interiores, evaluar la potencia acústica de las fachadas de estos edificios como fuentes externas. Una vez realizado este paso, junto con las fuentes externas puede modelarse la distribución exterior de presión sonora en la planta.

#### 4 RESULTADOS NUMÉRICOS: OBTENCIÓN DE MAPAS ACÚSTICOS

La primera etapa de la modelización consistió en obtener mapas acústicos ajustados a la realidad de la planta. Esta etapa previa permitiría luego implementar medidas de control de ruido sobre los modelos obtenidos y calibrados, de forma de poder llevar a cabo la evaluación de los resultados:

En la figura 3 puede observarse un mapa acústico obtenido para una sala con varios sopladores colocados en la misma. De acuerdo a lo descripto, se procedió a volcar en el modelo la potencia acústica medida de las fuentes, para luego modelizar la propagación de las mismas. Las fuentes efectivamente consideradas se encuentran marcadas con un contorno blanco, mientras que las negras se encuentran inactivas. El proceso de modelización requirió de diversos ajustes en la potencia de las fuentes, en virtud de que era imposible medirlas en forma independiente para estimar con absoluta precisión sus características acústicas.

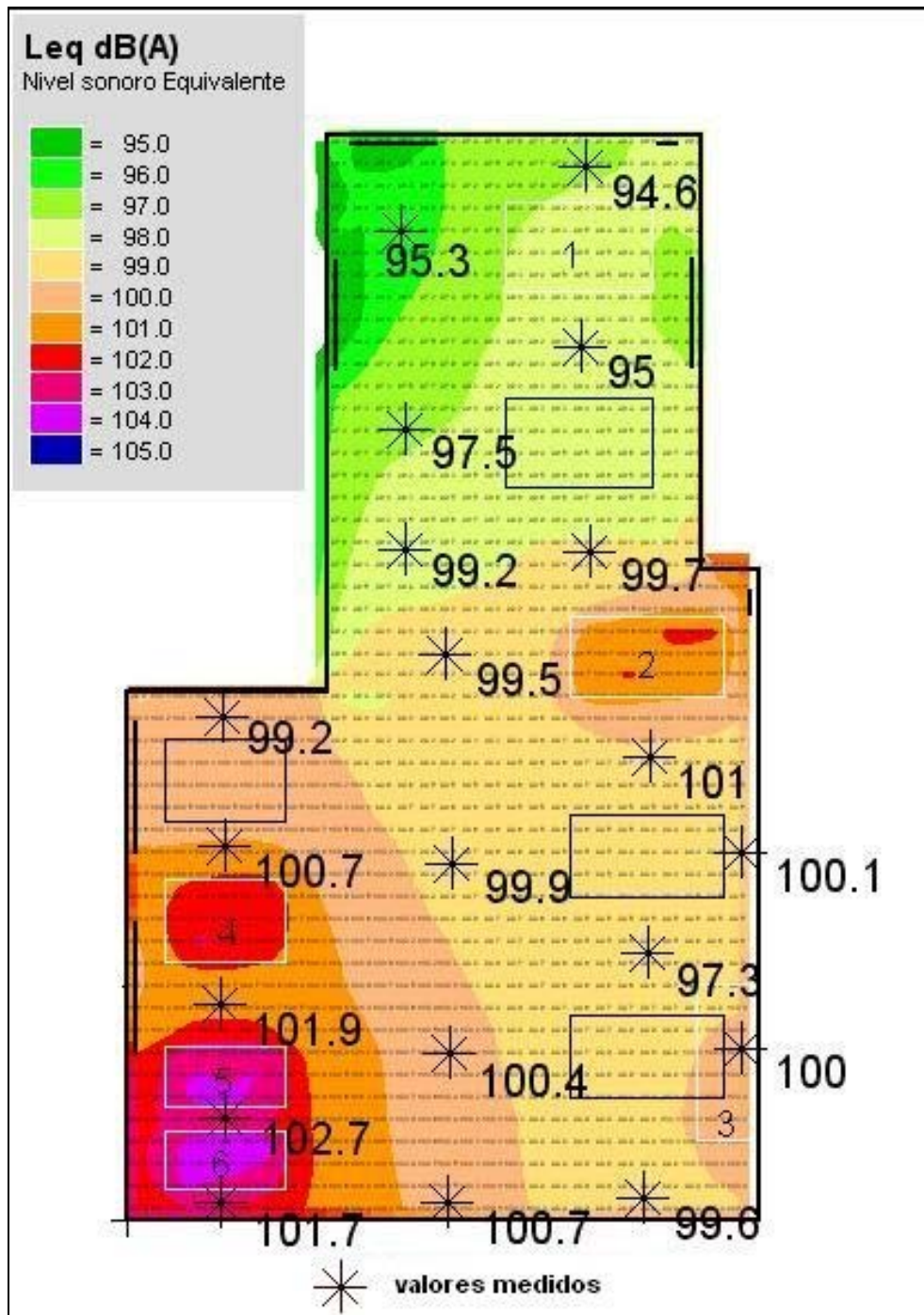


Figura 3: mapa acústico calibrado de sala de sopladores.

En el mapa acústico se destacan en números grandes los valores de presión acústica medidos, superpuestos con el mapa de propagación obtenido con Soundplan. La posición en que los valores fueron medidos se encuentran indicadas con asteriscos. Estos niveles medidos



fueron los utilizados para la calibración del modelo.

En la figura 4 se muestran los niveles sonoros obtenidos luego de modelizadas en el software una serie de soluciones para la atenuación del ruido proveniente de las fuentes. En particular se introdujeron cajas acústicas en las fuentes 3, 7, 8 y 9 constituidas por una combinación de materiales aislantes y absorbentes del ruido. Todos los mapas se encuentran calculados a 1.5 mts. de altura sobre el piso del local.

En la figura 5 se muestra la diferencia calculada entre la situación previa a la colocación de las cajas acústicas y posterior a esta. Este tipo de representación resulta interesante porque permite apreciar claramente la disminución de los niveles de presión acústica dentro de la habitación, y evaluar de esta manera la efectividad de la solución propuesta.

Se aprecian en la escala de colores, en esta última figura, diferencias con la situación original que van desde los 7 a los 25 dB en las zonas de mayor atenuación.

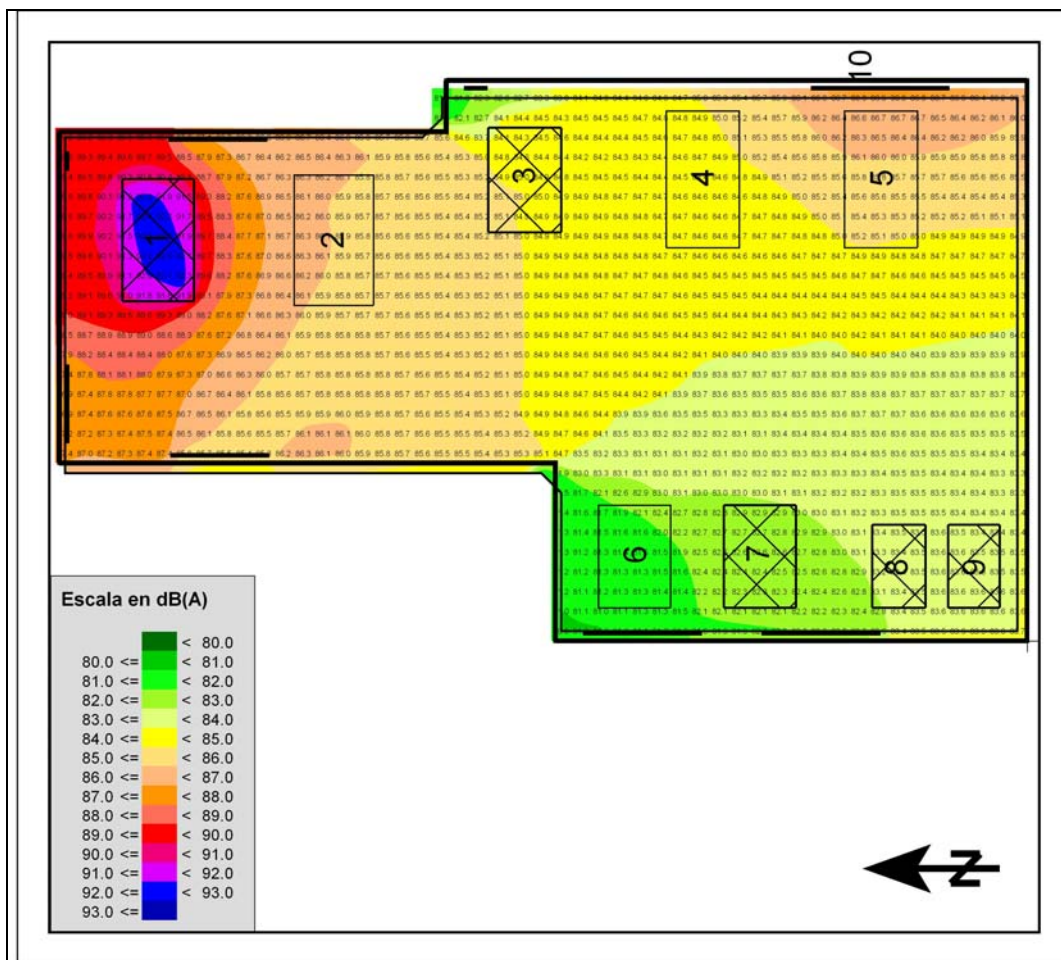
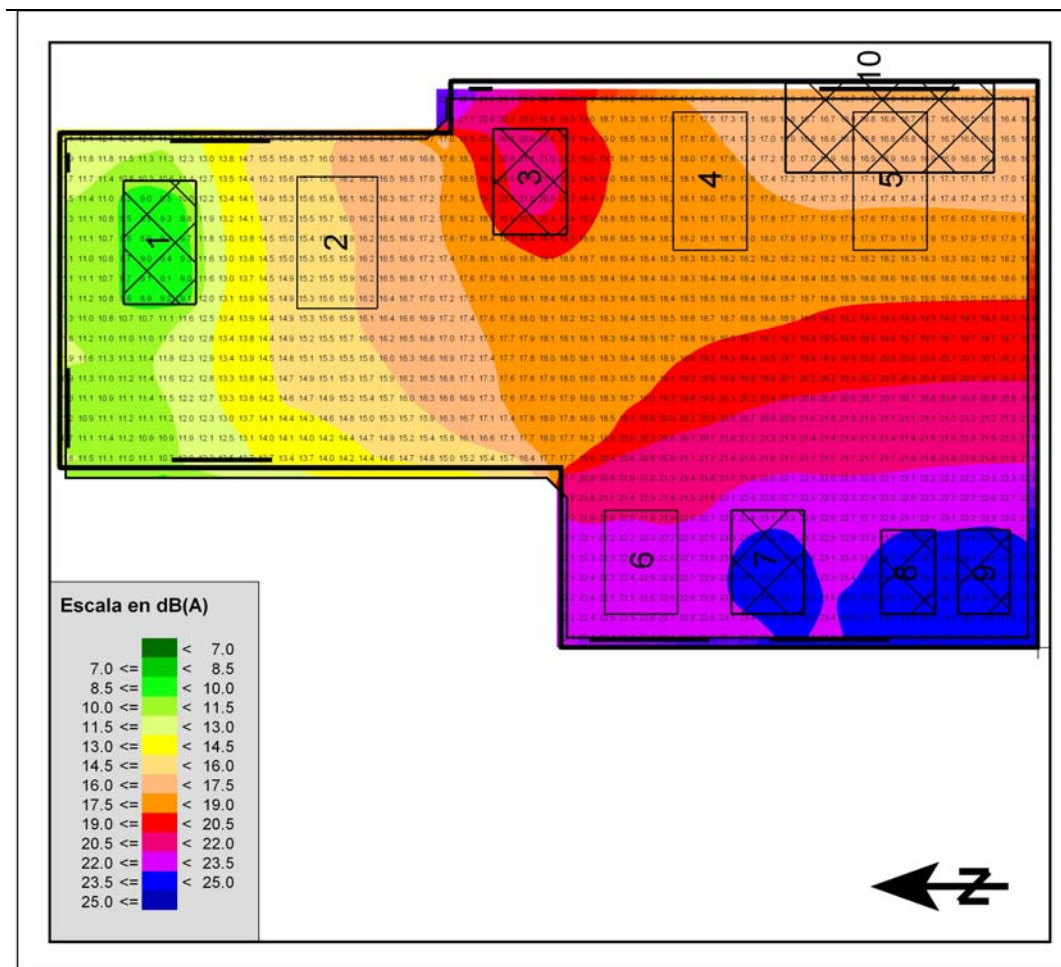


Figura 4: Modelo representativo de los niveles de ruido luego de implementadas cajas acústicas

En la figura 6 puede apreciarse un modelo geométrico simplificado utilizado en la modelización de esta habitación. Como puede verse, los detalles geométricos son escasos en

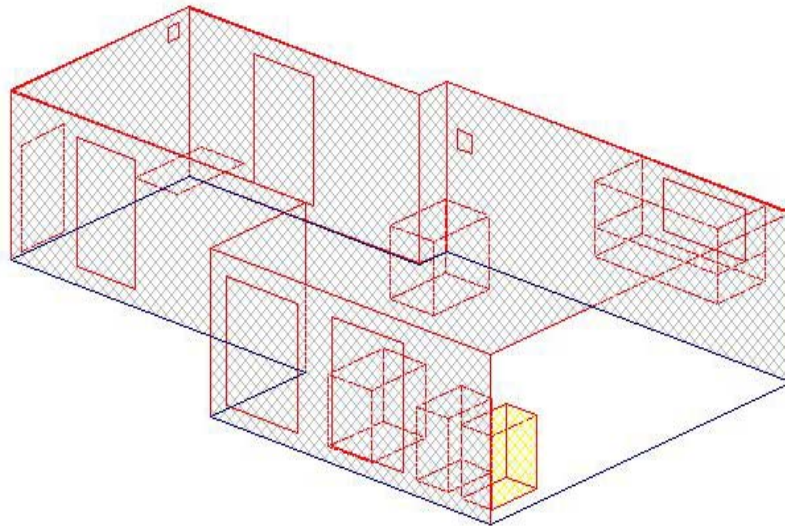
el interior. Solo se destacan las fuentes que han sido modelizadas como una serie de superficies de área que conforman una caja. Para obtener la potencia sonora de esas superficies fue necesario calcular cada fuente como si se tratara de un recinto industrial aislado, obteniendo de esta manera los valores de potencia acústica transmitidos por cada una de las fachadas que constituye la caja, en campo libre. Estos valores de potencia fueron luego incorporados al modelo.



**Figura 5: Modelo representativo de la diferencia entre los niveles de ruido antes y después de implementadas las soluciones.**

En la figura 7 se aprecia la modelización geométrica completa de la planta industrial. Las salas coloreadas en rojo son los recintos industriales considerados, entre los que se encuentra la habitación presentada en los párrafos anteriores. En azul se observan diversos edificios que no constituyen fuentes de ruido y cuyo objeto es tener en cuenta su influencia sobre la propagación como barreras acústicas. En verde diversas superficies reflejantes. Se observan también fuentes externas puntuales y de área en color amarillo con contorno rojo. La

diferencia en las características de absorción del piso también se ha tenido en cuenta. Dentro de los parámetros ambientales se ha considerado viento en calma, temperatura ambiente de 10 °C y humedad relativa del 70 %. Este tipo de modelos geométricos pueden realizarse sobre el mismo SoundPlan o importarse de un software CAD.



**Figura 6: modelo geométrico final del recinto**

Utilizando el modelo geométrico propuesto en la figura 7, con los parámetros precitados, se procedió a evaluar la propagación en ambiente externo de acuerdo con la ISO 9613-2 y utilizando entonces el mecanismo de Ray Tracing. Se observan en las figuras 8 a 13 los siguientes resultados:

Figura 8: niveles finales obtenidos en toda la planta luego de la aplicación de las medidas de atenuación, tanto exterior como interior en los edificios industriales y fuentes externas.

Figura 9 y 10: detalle de algunas áreas críticas de planta con los niveles finales obtenidos. Es interesante observar en estas figuras, que tratándose de las áreas más comprometidas del punto de vista acústico, luego de la aplicación de las soluciones, los niveles máximos se sitúan en el orden de los 87 dB(A).

Figura 11: diferencia con el mapa original luego de la aplicación de las soluciones para todas las áreas exteriores.

Figura 12 y 13: detalle de las diferencias obtenidas con el mapa original luego de la aplicación de las soluciones en la zonas más comprometidas. Se observa en detalle la disminución localizada en los niveles de presión acústica en las zonas cercanas a las barreras acústicas, con disminuciones de hasta 8 dB.

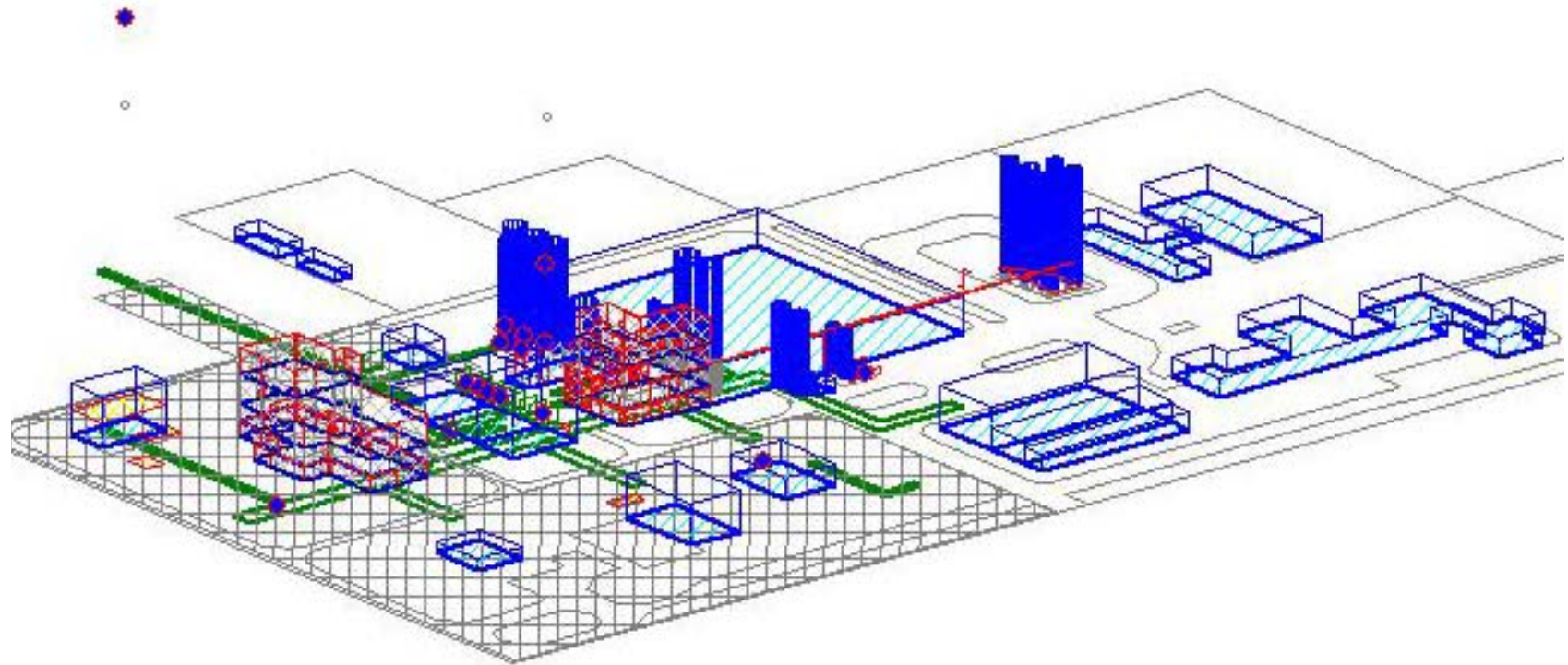


Figura 7: Modelo geométrico de la planta

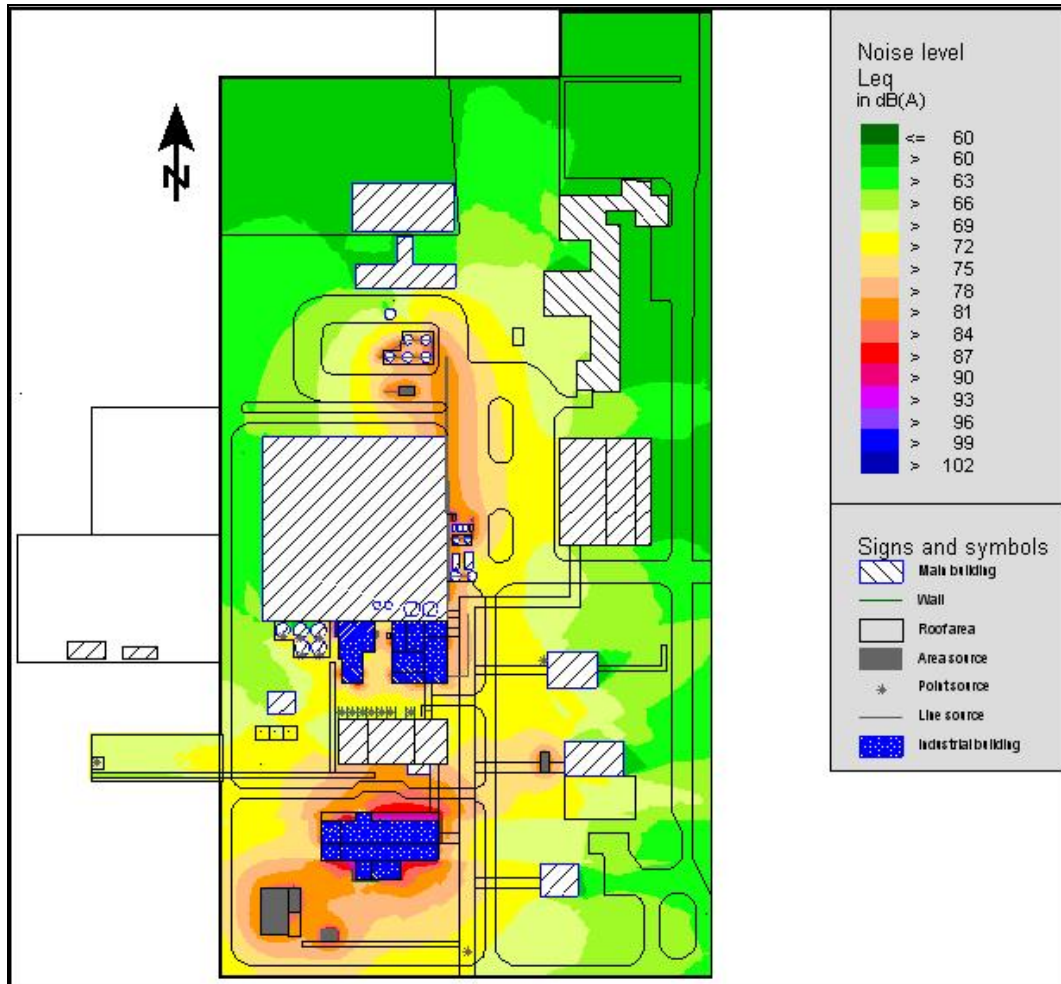
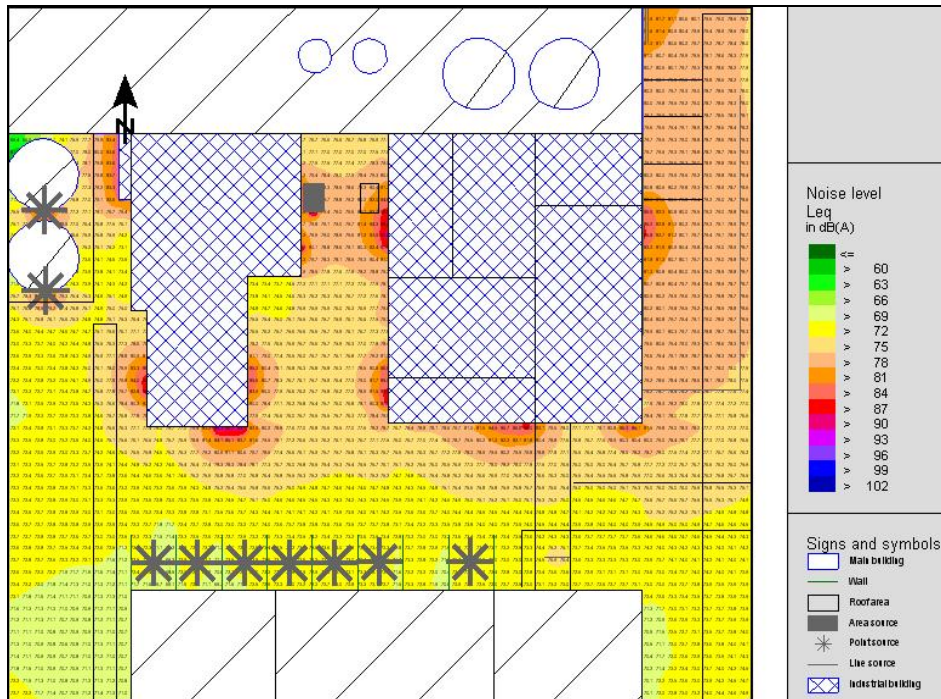
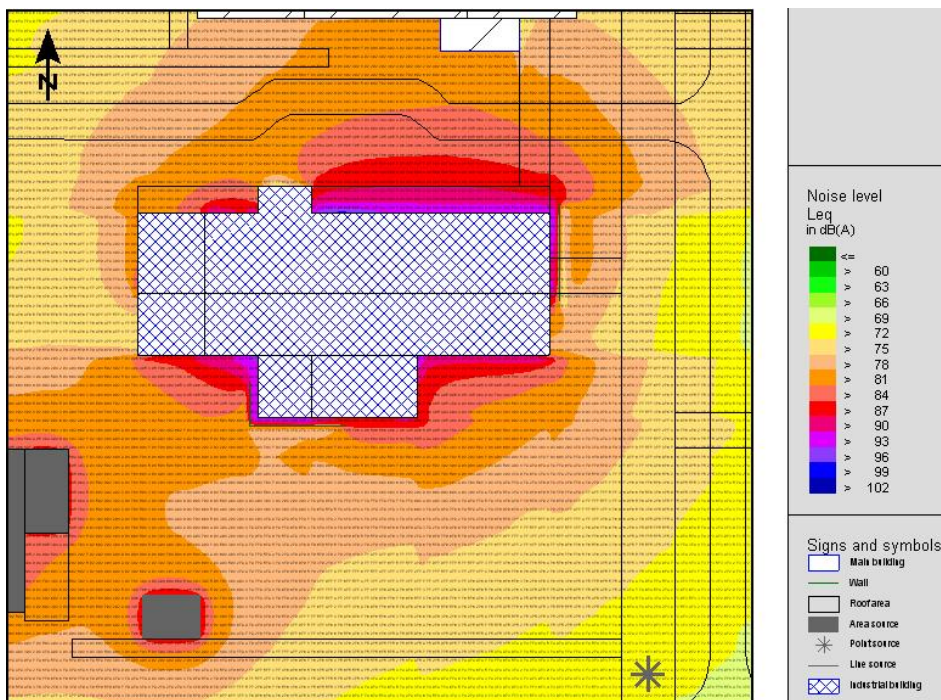


Figura 8: Modelo representativo de los niveles de ruido luego de implementadas las soluciones interiores y exteriores



**Figura 9: Detalle de los niveles sonoros exteriores luego de implementadas las soluciones**



**Figura 10: Detalle de los niveles sonoros exteriores luego de implementadas las soluciones**



Figura 11: Comparación global de los niveles de ruido entre las situaciones anterior y posterior a la implementación de las soluciones

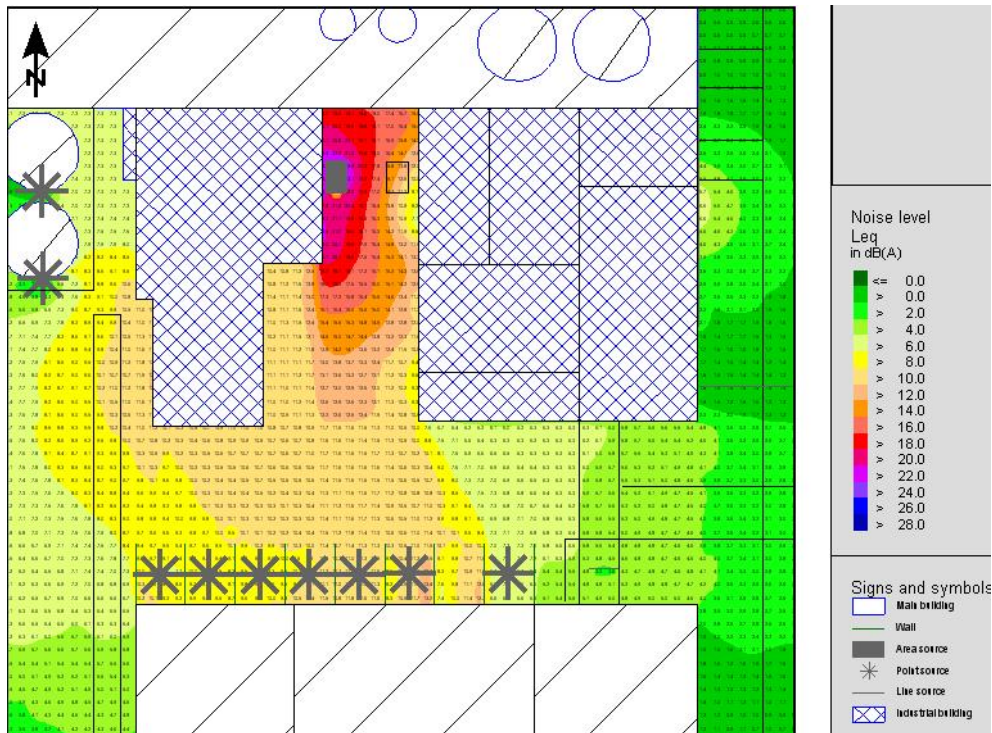


Figura 12: Comparación entre los niveles de ruido antes y después de implementadas las soluciones

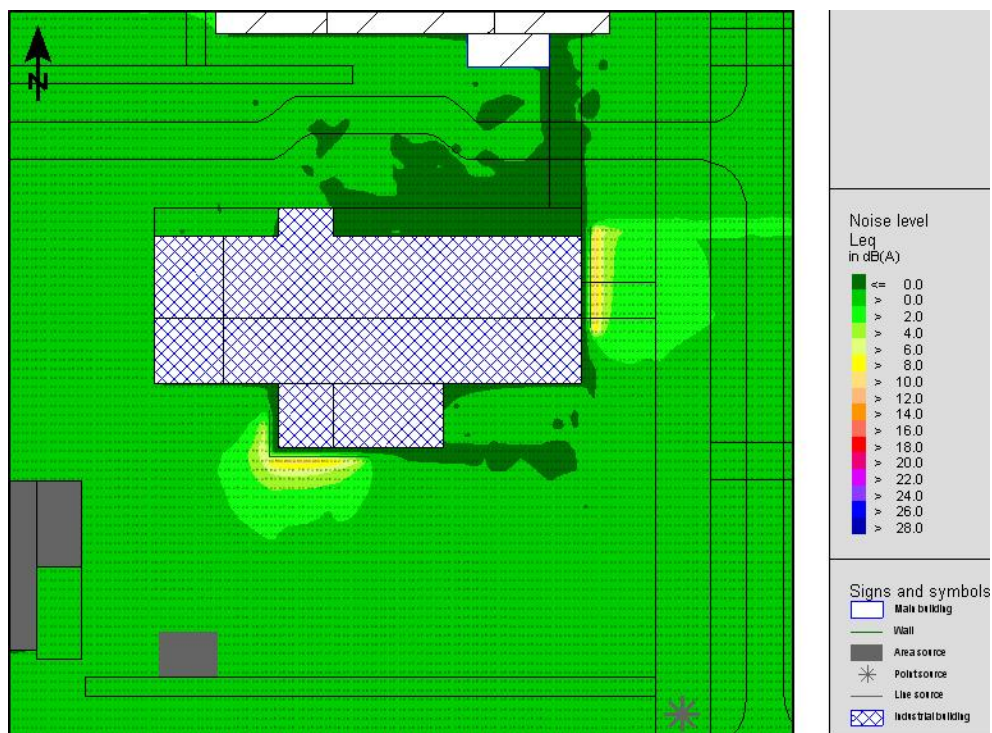


Figura 13: Comparación entre los niveles de ruido antes y después de implementadas las soluciones



## 5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado un ejemplo de aplicación de una metodología computacional, en este caso el método de Ray Tracing, a la solución de un problema industrial. Esta aplicación se ha realizado a través de la utilización de un software comercial (Soundplan 6.2), y se ha verificado su exactitud mediante la realización de numerosas mediciones de presión acústica. Se han realizado comparaciones entre los modelos y resultados experimentales con el objeto de calibrar el primero, y obtener una plataforma confiable sobre la que se puedan estudiar posibles soluciones a problemas acústicos. La aplicación del software contempla el uso de los modelos normalizados adecuados para la propagación del ruido en diferentes situaciones. Dichos modelos se han descripto sintéticamente.

Se ha mostrado por otra parte la efectividad de diversos tipos de soluciones a problemas acústicos, las que se han adaptado a la situación descripta en este trabajo. Estas soluciones, entre las que podemos nombrar la colocación de cajas, barreras acústicas y materiales absorbentes en salas cerradas, permitirían disminuciones superiores a los 20 dB en las zonas más críticas.

## 6 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido auspiciado por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, y por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional.

## 7 REFERENCIAS

- [1] Resolución 295/03 del Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social. Higiene y Seguridad en el Trabajo. Argentina, 2003.
- [2] Decreto 351/79 reglamentario de la ley 19.587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo. Argentina, 1979.
- [3] Métodos para la determinación de niveles de potencia sonora de fuentes de ruido, Pautas para la utilización de normas fundamentales y para la preparación de ensayos relativos al ruido. IRAM, 1989.
- [4] Determinación de niveles de potencia acústica emitidos por fuentes de ruido, método de ingeniería para condiciones de campo libre sobre un plano reflejante. IRAM, 1991.
- [5] Método de “control” para la determinación de niveles de potencia sonora emitidas por fuentes de ruido. IRAM, 1989.
- [6] ISO 9613-2, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. 1996.
- [7] Technical Acoustics in Soundplan. Manual de referencia del software SoundPlan 6.2.