

OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES ACÚSTICAS EN RECINTOS INDUSTRIALES

V.H. Cortínez^{a,b}, M.C. Vidal^a y P.G. Girón^a

^a*Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada ,
Universidad Tecnológica Nacional(FRBB),
11 de Abril 461, 8000, Bahía Blanca, Argentina, vcortine@frbb.utn.edu.ar, http://www.frbb.utn.edu.ar*
^b*CONICET, Argentina*

Palabras claves: *Diseño acústico. Optimización. Simulated Annealing.*

Resumen. La contaminación acústica constituye un serio problema ocupacional en los establecimientos industriales. En efecto, puede provocar, en los operarios, pérdida total o parcial de la audición así como trastornos cardiovasculares y aún psicológicos. Las soluciones técnicas involucradas poseen un alto costo, motivo por el cual se hace necesario diseñar cuidadosamente los sistemas de control de ruido.

En este trabajo se presenta un enfoque de optimización a los efectos de diseñar adecuadamente un sistema para el control de ruido. Se muestra que el método de *simulated annealing* es apropiado para estudiar este tipo de problemas.

1 INTRODUCCION

La contaminación acústica constituye un serio problema ocupacional en los establecimientos industriales. En efecto, largos períodos de permanencia en ambientes excesivamente ruidosos pueden provocar, en los operarios, pérdida total o parcial de la audición así como trastornos cardiovasculares y aún psicológicos. Otro problema asociado al ruido en recintos industriales es que puede enmascarar señales de alarma con el consecuente peligro que ello implica (Gerges y Arena, 2004).

Por tal motivo, existen regulaciones cada vez más rigurosas a los efectos de controlar el ambiente acústico. En muchos casos, las soluciones técnicas involucradas poseen un alto costo, motivo por el cual se hace necesario diseñar cuidadosamente los sistemas de control de ruido. Para ello, el ingeniero acústico cuenta con modelos matemáticos que permiten predecir con suficiente precisión los niveles sonoros cuando se conocen las potencias acústicas de las fuentes y las características acústicas en un recinto. Dichos modelos permiten estudiar el efecto que producen ciertas modificaciones técnicas tales como instalación de material absorbente y/o aislamiento en el ambiente acústico.

Sin embargo, deben realizarse simulaciones de numerosos escenarios a los efectos de obtener una solución técnica eficiente. En tal sentido, es conveniente emplear técnicas de optimización matemática conjuntamente con los modelos aludidos a los efectos de desarrollar un método de diseño acústico optimal.

En este trabajo se presenta un modelo matemático para cumplir este objetivo, haciendo uso de formulaciones simplificadas del comportamiento acústico del recinto conjuntamente con una conveniente técnica heurística de optimización (“*simulated annealing*”) que permite determinar diseños cuasi-optimales (Burkard y RENDL, 1984). Este enfoque es un método estocástico que evita quedar atrapado en mínimos locales. Por otra parte, no requiere obtener el gradiente de la función objetivo, lo cual lo hace especialmente apto para analizar problemas de optimización con variables discretas.

Se plantean medidas tecnológicas basadas en la incorporación de material absorbente y encapsulamiento de fuentes, y sus variables de optimización asociadas. Dicha situación es frecuente en ambientes industriales cuando deben mejorarse ciertas condiciones acústicas preestablecidas.

2 MODELO ACÚSTICO

En recintos industriales con producción continua el campo acústico presenta generalmente condiciones estacionarias. En tal caso es conveniente describir dicho campo empleando los niveles de presión sonora, los cuales están directamente vinculados a la sensibilidad del oído humano (Gerges y Arena, 2004). Existen diversos métodos computacionales para la determinación del campo acústico, siendo el más utilizado el método de acústica geométrica, que se adapta en forma suficientemente precisa al rango de frecuencias existentes en las plantas industriales (Hodgson 2003, Girón et al. 2005). Sin embargo, para algunos casos, es posible utilizar simples formulaciones analíticas basadas en la teoría de campo reverberante.

En su concepción más simple dicha teoría supone que el nivel sonoro se descompone en dos tipos de contribuciones: el campo directo y el reverberante. Para el primero de ellos asume atenuación esférica a partir de una fuente puntual, mientras que plantea el campo reverberante como uniforme y dependiente de las condiciones de absorción del local. A pesar de sus limitaciones este enfoque simplificado es corrientemente utilizado por los ingenieros acústicos, y brinda soluciones razonables para una cantidad importante de situaciones

(aspectos geométricos del recinto y condiciones de absorción) (Hodgson, 1996).

El nivel de presión acústica generado por una fuente puntual se expresa de acuerdo a la citada teoría en la forma (Gerges y Arena, 2004):

$$L_{p_{ijf}} = \beta_{if} L_{w_{if}} + 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r_{ij}^2} + A_f \right] \quad (1)$$

donde:

$L_{p_{ijf}}$ representa el nivel de presión acústica en cada punto j del recinto bajo estudio, a causa de la fuente i y en la banda de frecuencias f .

$L_{w_{if}}$ es la potencia acústica de cada fuente i para cada banda de frecuencias f

β_{if} representa la atenuación introducida por un encapsulamiento acústico para cada fuente i y en cada frecuencia f (Si no existe encapsulamiento β_{if} adopta el valor 1).

$\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r_{ij}^2}$ tiene en cuenta la contribución del campo directo generado por cada fuente i sobre cada punto j del recinto, siendo r_{ij} la distancia entre la fuente i y el punto de observación j .

A_f representa el campo reverberante para cada frecuencia f , y depende de las características de absorción del recinto.

El coeficiente del recinto A_f se ha considerado mediante la ecuación:

$$A_f = \frac{4 \cdot (1 - \alpha_f)}{\alpha_f \cdot S} \quad (2)$$

donde S es la superficie total del recinto y α_f corresponde al coeficiente de absorción del mismo para cada banda de frecuencias.

Por otra parte, α_f se calcula a través de:

$$\alpha_f = \frac{\sum_{m=1}^N \alpha_{fm} \cdot S_m}{\sum_{m=1}^N S_m} \quad (3)$$

donde

α_{fm} representa el coeficiente de absorción en cada banda de frecuencia f para cada superficie S_m del recinto.

Se han realizado las siguientes simplificaciones:

- No se ha considerado la direccionalidad de las fuentes, las que se suponen entonces omnidireccionales.
- En el término que toma en cuenta el campo reverberante no se ha considerado la absorción del aire dentro del recinto.
- En todos los cálculos se consideraron solo las superficies que se han definido como optimizables, es decir no se han tenido en cuenta las propiedades absorbentes de piso y techo.

Para la determinación del nivel sonoro total es necesario considerar la suma de los efectos, en cada punto del recinto, generado por cada fuente y en cada rango de frecuencias. Esto se realiza de la siguiente manera:

$$L_{p_{ijf}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^M 10^{\frac{L_{p_{ijf}}}{10}} \right) \quad (4)$$

donde $L_{p_{ijf}}$ representa la contribución sumada de todas las fuentes j existentes en el recinto para cada banda de frecuencias f y M representa el número total de fuentes sonoras.

Por otra parte:

$$L_{p_i} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{f=1}^{Nf} 10^{\frac{L_{p_{ijf}}}{10}} \right) \quad (5)$$

representa el nivel de presión acústica total en cada punto i del recinto, considerando la adición de efectos en todas las bandas de frecuencia Nf (en este trabajo se tienen en cuenta 10 bandas de frecuencia). Esta fórmula requiere el conocimiento del nivel de potencia acústica de las fuentes en bandas de octavas.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

La situación considerada es la de un recinto industrial donde se han detectado niveles de presión sonora mayores a los admisibles.

Se pretende disminuir estos niveles mediante la aplicación de material absorbente adicional (asociados a una superficie de aplicación S_i y a un coeficiente de absorción α_{fm}) y/o implementación de cerramientos acústicos de las fuentes (asociados a los coeficientes de atenuación β_{if}).

Se conocen las características de emisión de las fuentes (espectro de niveles de potencia acústica y características absorbentes pre-existentes en el local).

El diseño acústico se plantea de tal manera de minimizar los costos de instalación bajo la restricción de que en ningún punto del recinto se sobrepase un valor admisible del nivel sonoro resultante (en este trabajo se considera un valor máximo admisible de 90 dB(A)).

En consecuencia, el problema de optimización se formula de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } C(X) = \sum_{j=1}^{NS} C_j S_j X_j + \sum_{i=1}^M C_i X_i \\ \text{sa} \\ L_{pj} \leq 90 \end{array} \right. \quad (6)$$

donde

C es la función objetivo (Costo de instalación)

NS es el número total de superficies de absorción posibles

M el número total de máquinas

C_i el costo de encapsular la máquina i

C_j el costo por unidad de superficie para el sector j .

La variable de diseño X tiene dimensión $1 \times (NS + M)$ y está definida como sigue:

$$X(i) = \begin{cases} 1 & \text{si la superficie } i \text{ se absorbe} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad i=1:NS$$

$$X(i) = \begin{cases} 1 & \text{si la máquina } i \text{ se aísla} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad i=NS+1:NM$$

El problema (6) es un problema de optimización entera, es decir, las variables involucradas toman valores enteros, más precisamente es un problema conocido como 0-1 en el que las variables sólo toman valores 0 o 1. Entre los métodos más conocidos para resolver esta clase de problemas están los métodos *Branch and Bound* y los métodos de plano cortante (Nemhauser y Wolsey, 1988). Ambos métodos resultan muy costosos desde el punto de vista computacional a medida que aumenta la dimensión del problema, proporcionan la solución exacta con un tiempo límite razonable sólo para aquellos problemas de pequeña escala, para aquellos de gran escala es conveniente recurrir a un método heurístico. Es sabido que entre las heurísticas más conocidas para resolver este tipo de problemas, *simulated annealing* es la que ha demostrado mejor performance. Presentamos a continuación las principales características de este método.

4 SIMULATED ANNEALING

Simulated Annealing (SA) es una técnica heurística de optimización combinatoria basada en una generación al random de soluciones factibles cuya principal característica es la de evitar convergencia local en problemas de gran escala (Burkard y Rendl, 1988). El nombre de este método deriva de un proceso termodinámico de *annealing* o recocido, en el cual se somete un metal a una máxima temperatura de forma tal que se funda, luego se va disminuyendo la temperatura lentamente de manera que el metal fundido tienda a solidificarse hasta alcanzar un equilibrio térmico caracterizado por una energía mínima. Un esquema

controlado de disminución de la temperatura evita defectos en el metal.

En un problema de optimización estos algoritmos comienzan con una solución factible inicial X_0 y general sucesivamente a partir de ella nuevas soluciones que son aceptadas como soluciones actuales de acuerdo a un cierto criterio probabilístico definido como:

$$P(\text{aceptar } X_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } \Delta C < 0 \\ e^{-\frac{\Delta C}{kT}} & \text{si } \Delta C > 0 \end{cases}$$

donde k es un factor de escalamiento conocido como constante de Boltzmann, $\Delta C = C(X_{i+1}) - C(X_i)$ y T es el parámetro conocido como temperatura.

A medida que el algoritmo avanza se va disminuyendo T de manera tal de disminuir la probabilidad de aceptar soluciones factibles que no produzcan una mejora en la función objetivo. En la figura (1) se presenta el algoritmo general de un método *simulated annealing*.

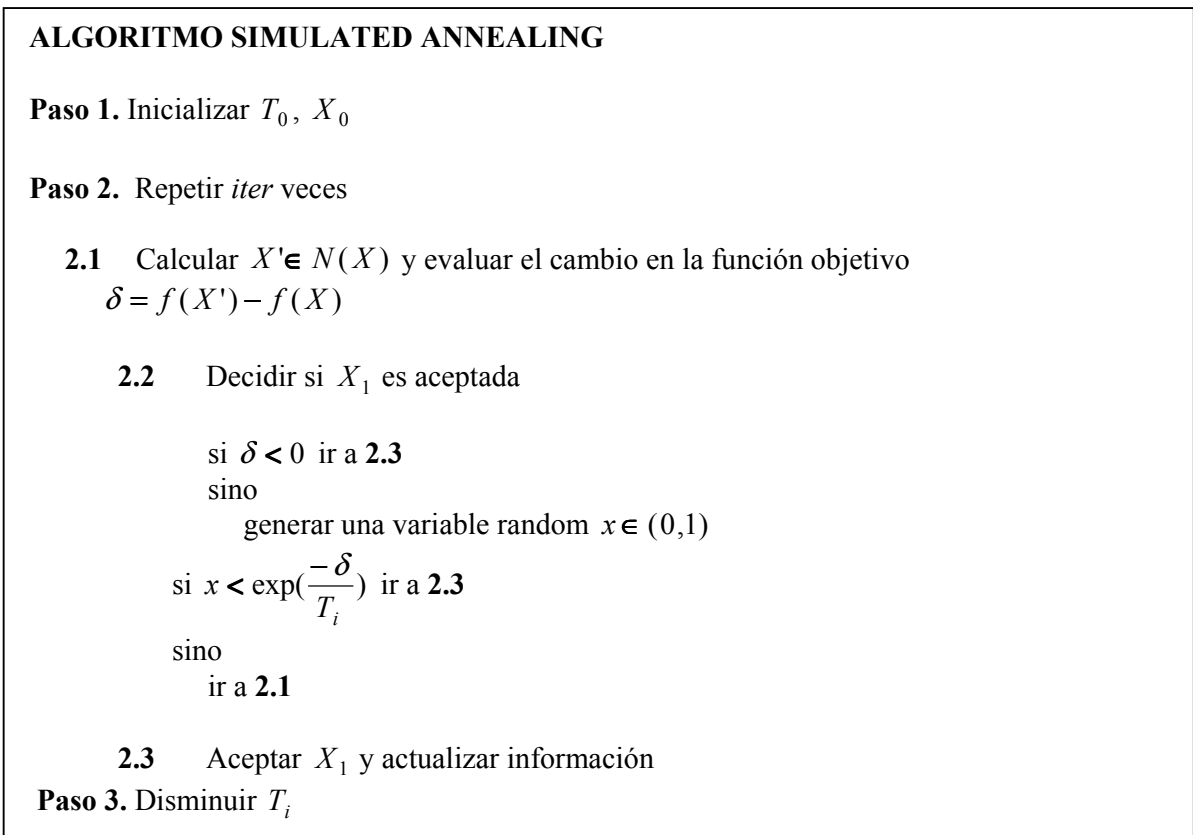


Figura 1. Algoritmo *Simulated Annealing*.

El valor inicial T_0 , se debe determinar de manera de producir una alta aceptación de soluciones factibles propuestas.

La función que determina y controla el descenso de la temperatura (paso 3 del algoritmo), juega un rol fundamental en la eficiencia del método. El esquema más utilizado por distintos autores es el esquema geométrico en el cual se disminuye la temperatura de acuerdo al siguiente criterio

$$T_{i+1} = \alpha \cdot T_i \text{ con } \alpha \in (0,1) \text{ elegido de manera adecuada en general } \alpha \in (0.3,1)$$

Sin embargo, aún obteniendo buenas soluciones, el principal inconveniente que presentan estos algoritmos es el tiempo de ejecución necesario para obtener dichas soluciones. En algunos casos resultan más costosos que si se aplicara un método de resolución enumerativo (Lundy y Mees 1986).

En este trabajo presentamos una nueva estrategia (Vidal 2003) para disminuir la temperatura cuyo principal objetivo es establecer parámetros de manera de obtener un equilibrio entre el tiempo final de ejecución del algoritmo y el número de búsquedas que realice el mismo. La misma consiste en disminuir la temperatura de acuerdo al siguiente esquema:

$$T_{i+1} = \frac{T_i}{1 + T_i \times T_i} \quad \text{y tomar } iter = O(n^k) \text{ para algún } k \in N$$

Con esta nueva propuesta se logra disminuir la temperatura más rápidamente al inicio del algoritmo. El efecto más importante de esto es evitar aceptar en un comienzo la mayoría de las soluciones factibles y en consecuencia reducir el elevado costo inicial que presenta la mayoría de estos algoritmos.

La implementación de este nuevo esquema muestra una sorprendente efectividad del mismo, la misma está relacionada tanto en a excelente calidad de las soluciones obtenidas como con la disminución substancial del tiempo de ejecución del algoritmo. Esto lo podemos observar en los resultados numéricos obtenidos en distintos problemas.

4 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Se ha considerado un recinto de 12 x 8 metros y 3,5 metros de altura. Para el mismo se han considerado dos tipos de superficies:

- una superficie sin tratar con material absorbente, y a la que se han adjudicado los coeficientes de absorción correspondientes a hormigón.
- Un tipo de superficie tratada basada en material absorbente compuesto de poliuretano expandido.

Los coeficientes correspondientes a cada uno de estos materiales se consignan en la tabla 1.

Material	Frecuencias									
	31	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K
Hormigón	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12
Poliuretano	0,05	0,10	0,15	0,36	0,78	0,84	0,80	0,80	0,80	0,80

Tabla 1: Coeficientes de absorción acústica para los materiales considerados.

La adopción de estos materiales tiene por objeto tomar en cuenta materiales de uso común en aplicaciones industriales, tanto para las paredes sin tratar, como en el caso del material acústico. Los coeficientes de absorción entre ambos materiales muestran un gran contraste en cuanto a su capacidad de absorción de energía sonora, sobre todo en frecuencias superiores a los 125 Hz.

Por otra parte, se han considerado dos posibles distribuciones de fuentes sonoras, tomando en cuenta 6 fuentes para el ejemplo 1 y 4 fuentes para el ejemplo 2. En el primer caso se

consideran todas las fuentes incluidas en la tabla 2, mientras que en el segundo caso solo las primeras 4. En esta Tabla se muestran los niveles de potencia acústica por bandas de octavas .

Fuente	Frecuencias									
	31	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K
1	53	64	75	81	100	102	101	94	84	70
2	55	65	70	82	88	90	91	87	79	63
3	54	64	69	81	88	90	91	85	78	62
4	48	59	70	76	92	91	90	85	75	65
5	54	64	69	81	88	90	91	85	78	62
6	48	59	70	76	92	91	90	85	75	65

Tabla 2: Potencia acústica de las fuentes en dB(A).

Por otra parte se considera una sola configuración posible de encapsulamiento acústico para las fuentes a través de cajas que poseen las siguientes pérdidas por inserción:

Frecuencias									
31	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K
5	10	15	22	30	34	35	40	42	45

Tabla 3: Pérdidas por inserción de cajas acústicas en dB(A).

En función de esto los coeficientes β_{ij} correspondientes a la ecuación (1) se muestran en la Tabla 4.:

Fuente	Frecuencias									
	31	63	125	250	500	1 K	2 K	4 K	8 K	16 K
1	0,91	0,84	0,80	0,73	0,70	0,67	0,65	0,57	0,50	0,36
2	0,91	0,85	0,79	0,73	0,66	0,62	0,62	0,54	0,47	0,29
3	0,91	0,84	0,78	0,73	0,66	0,62	0,62	0,53	0,46	0,27
4	0,90	0,83	0,79	0,71	0,67	0,63	0,61	0,53	0,44	0,31
5	0,91	0,84	0,78	0,73	0,66	0,62	0,62	0,53	0,46	0,27
6	0,90	0,83	0,79	0,71	0,67	0,63	0,61	0,53	0,44	0,31

Tabla 4. Coeficientes de atenuación β_{ij}

Este problema fue resuelto aplicando el algoritmo *simulated annealing* descrito en la sección anterior. En las tablas 5 y 6 se muestra un estudio comparativo aplicando dicha técnica con diferentes esquemas de enfriamiento y a su vez los resultados se comparan con los obtenidos por medio de un método enumerativo exacto.

Método	Valor función objetivo	Tiempo CPU (en seg)
Exacto	12100	5.067200000000000e+001
SA con esquema geométrico	13200	2.986250000000000e+001
SA con esquema propuesto	12100	6.515999999999991e+000

Tabla 5. Sala con 4 máquinas

Método	Valor función objetivo	Tiempo CPU (en seg)
Exacto	13500	2.986250000000000e+002
SA con esquema geométrico ($\alpha = 0.4$)	14900	2.447970000000000e+002
SA con esquema geométrico ($\alpha = 0.6$)	13500	3.447970000000000e+002
SA con esquema propuesto	13500	8.235999999999999e+001

Tabla 6. Sala con 6 máquinas

Puede apreciarse en estas tablas que el método de *simulated annealing* arroja valores de la función objetivo muy cercanos a los obtenidos por el método exacto. Por otra parte, cuando se utiliza SA con el enfoque de enfriamiento propuesto, los valores de la función objetivo coinciden con los obtenidos mediante el método exacto. En cuanto a los tiempos de cálculo se aprecia que el método de *simulated annealing* propuesto emplea tiempos sustancialmente menores que el método exacto y que SA con otros esquemas de enfriamiento.

En las figura 2 se muestra el comportamiento de la temperatura para el caso geométrico con $\alpha = 0.4$ y en la figura 3 se pueden apreciar los valores de la función objetivo a medida que el algoritmo avanza. En un comienzo se aceptan soluciones factibles que no mejoran el valor de la función objetivo, siendo estas cada vez menos probables. Se puede apreciar que alrededor de iteración 500 se alcanza el valor óptimo deseado.

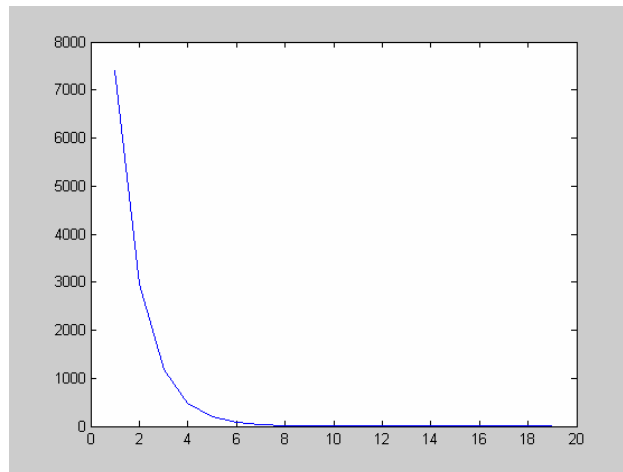


Figura 2. Temperatura vs No de iteraciones (Enfriamiento geométrico)

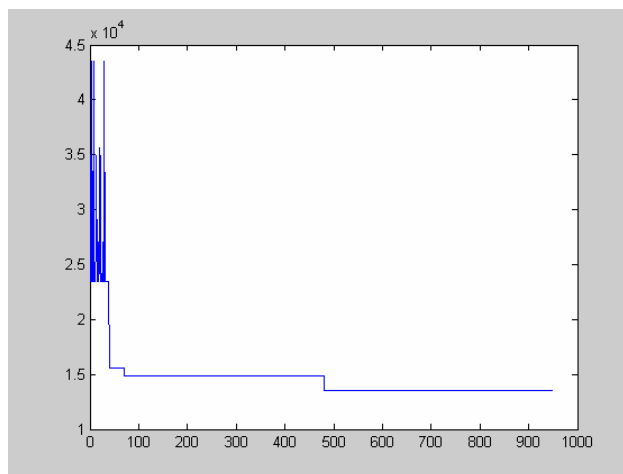


Figura 3. Convergencia de la Función Objetivo

(Función objetivo vs No de iteraciones- Enfriamiento geométrico)

En las figuras 4 y 5 se puede apreciar el comportamiento del esquema de temperatura propuesto, pudiéndose observar en la figura 5 que se alcanza el valor óptimo deseado en la iteración 200, con lo que se comprueba una reducción sustancial tanto en el tiempo de ejecución del algoritmo como en la cantidad de iteraciones necesarias para arribar a la solución sin perder la calidad de la misma.

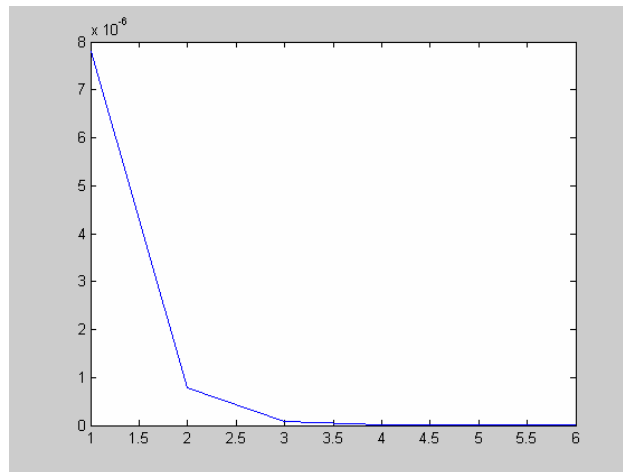


Figura 4. Temperatura vs No de iteraciones (Enfriamiento propuesto)

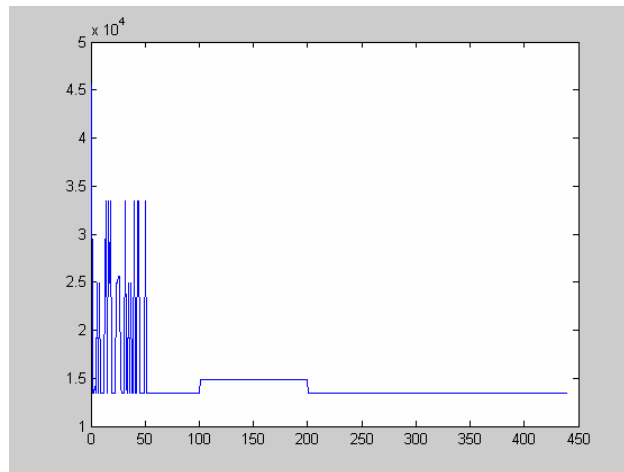


Figura 5. Figura 3. Convergencia de la Función Objetivo
(Función objetivo vs No de iteraciones- Enfriamiento propuesto)

La solución obtenida no sólo puede compararse con el óptimo sino que también puede calcularse el coeficiente de variación σ/μ de la solución media obtenida por *simulated annealing* utilizando el esquema propuesto. Este coeficiente de variación nos da la información sobre el comportamiento del método. Cuanto más pequeño es el coeficiente de variación más estable es el comportamiento del algoritmo. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 7.

Dimensión	Coefficiente de variación
8	5.75336873099602e-16
10	9.1942412497632e-16

Tabla 7. Coeficiente de Variación de SA

En las Figuras 6 y 7 (8 y 9) se muestran los campos acústicos para los ejemplos 1 y 2 respectivamente, una vez implementadas las soluciones técnicas. Como puede apreciarse, los niveles sonoros resultantes son prácticamente uniformes, con valores oscilando entre los 89 y 90 dB(A). Estos valores son solamente sobrepasados en las inmediaciones de las fuentes.

Debe ser considerado, no obstante, que las fuentes puntuales corresponden a una idealización, cuando en realidad tiene volumen. Por lo tanto, los valores superiores a los admisibles caen dentro de estos volúmenes.

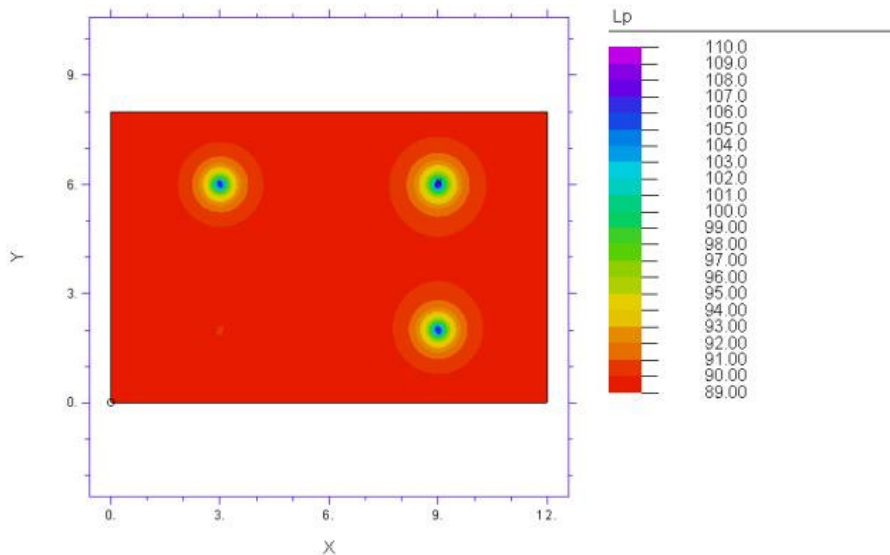


Figura 6. Sala con 4 máquinas

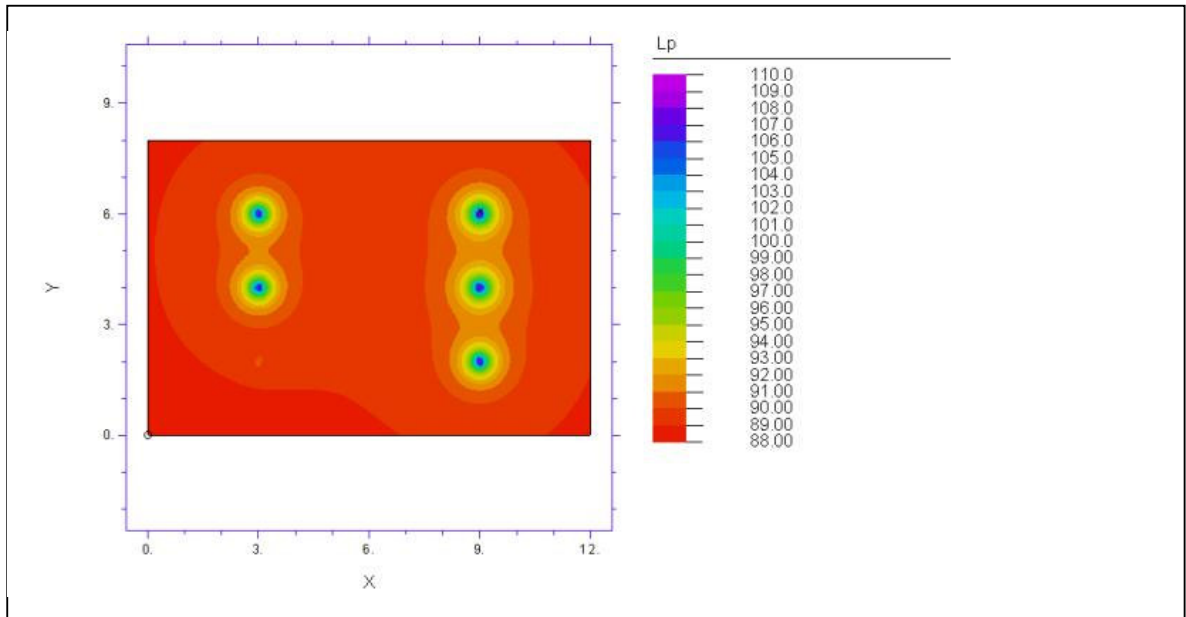


Figura 7. Sala con 6 máquinas

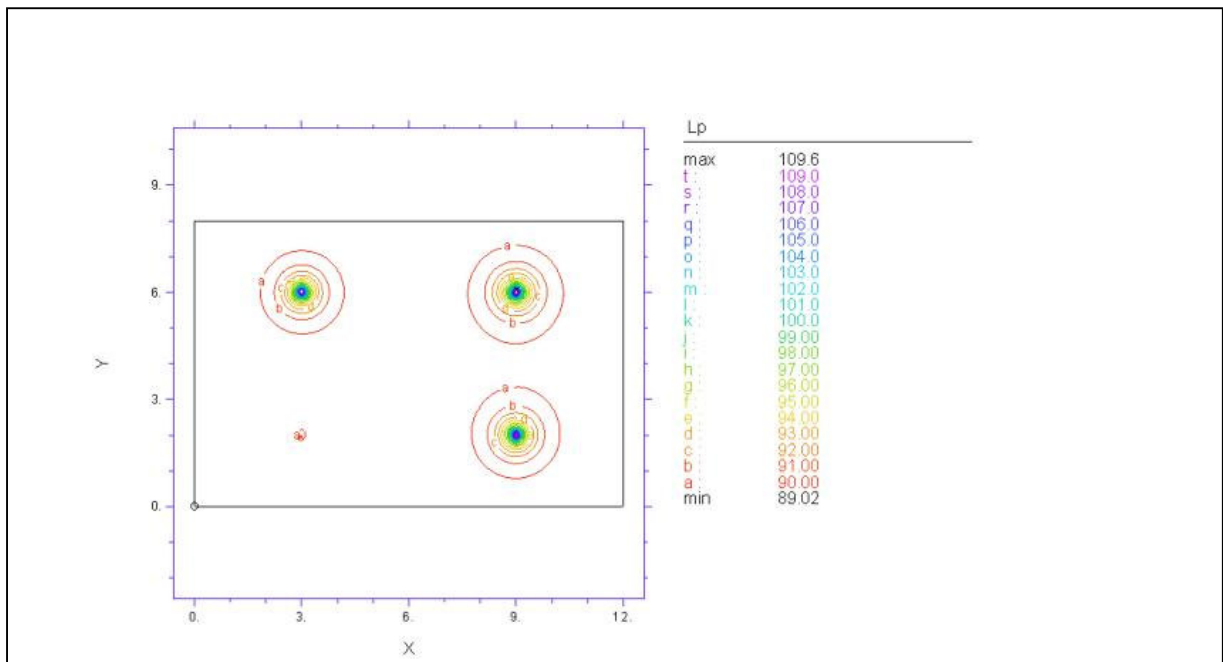


Figura 8. Sala con 4 máquinas

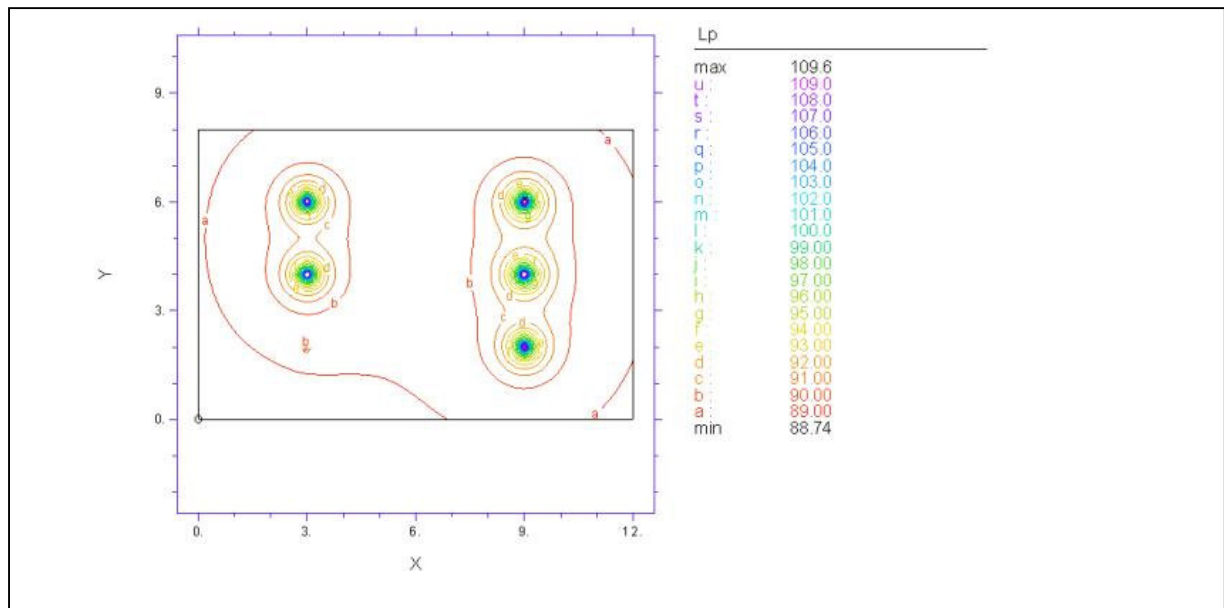


Figura 9. Sala con 6 máquinas

5 CONCLUSIONES

Se ha formulado un enfoque de optimización para realizar el diseño óptimo de recintos industriales, de tal manera de minimizar los costos de implementación de soluciones técnicas.

El problema de optimización de variable entera resultante ha sido resuelto en forma exitosa mediante el método de *simulated annealing* modificado. La modificación consistente en un nuevo esquema de enfriamiento ha mostrado una convergencia mejorada con respecto al enfoque clásico.

Si bien solamente se han analizado problemas simplificados, dicha técnica es promisoría pues es apta para utilizarse con modelos acústicos computacionales (Cortínez y Piovan, 2004) que permitan considerar situaciones reales.

Los autores están trabajando actualmente en tal dirección.

REFERENCIAS

- Burkard, R.E. y Rendl, F.. A Thermodynamically Motivated Simulation Procedure for Combinatorial Optimization Problems. *European Journal of Operational Research* , 17:169-174,1984.
- Cortínez, V.H. y Piovan, M.P. Un Modelo de Elementos Finitos para Ruido Urbano basado en la Teoría de Picaut. *Terceras Jornadas de Acústica , Electroacústica y Áreas Vinculadas*, Buenos Aires , 2004.
- Gerges, S. N. Y. y Arenas, J.P. Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones NR Editora, Florianópolis, 2004.
- Girón, P.G., Sequeiro, M., Azzurro, A.P., Cortínez, V.H.. Control de ruido industrial mediante un modelo computacional: estudio de caso. *Mecánica Computacional*, Vol. XXIV

- (Asociación Argentina de Mecánica Computacional), 2325-2341, 2005.
- Hodgson, M., When is Diffuse-Field theory applicable.. *Applied Acoustics*, 49(3), 197-207. 1996.
- Hodgson, M. Ray-Tracing evaluation of empirical models for predicting noise in industrial workshops. *Applied Acoustics*, 64, 1033-1048. 2003.
- Lundy, M. y Mees, A.. Convergence of an Annealing Algorithm. *Mathematical programming*, 34:111-124,1986.
- Nemhauser, G. and Wolsey, G.. *Integer and Combinatorial Optimization*. John Wiley, New York, 1988.
- Vidal, M.C. *Un procedimiento heurístico para un problema de asignación cuadrática*