

## Importancia de las variables experimentales en la estimación del *Índice de Reducción Sonoro* por la técnica de intensidad acústica

**A. Esquivel Delgado<sup>1</sup>; A. E. Pérez Matzumoto<sup>1</sup> y S. J. Pérez-Ruíz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Grupo de Acústica, División de Vibraciones y Acústica  
Centro Nacional de Metrología

<sup>2</sup> Laboratorio de Acústica y Vibraciones,  
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM

Los ruidos de tu vecino te pueden molestar porque:

- Eres inusualmente sensitivo a los ruidos.
- Tu vecino se comporta de forma irracional.
- El aislamiento sonoro entre sus casas es malo.

*Panfleto de BRE (UK).*

# Organización

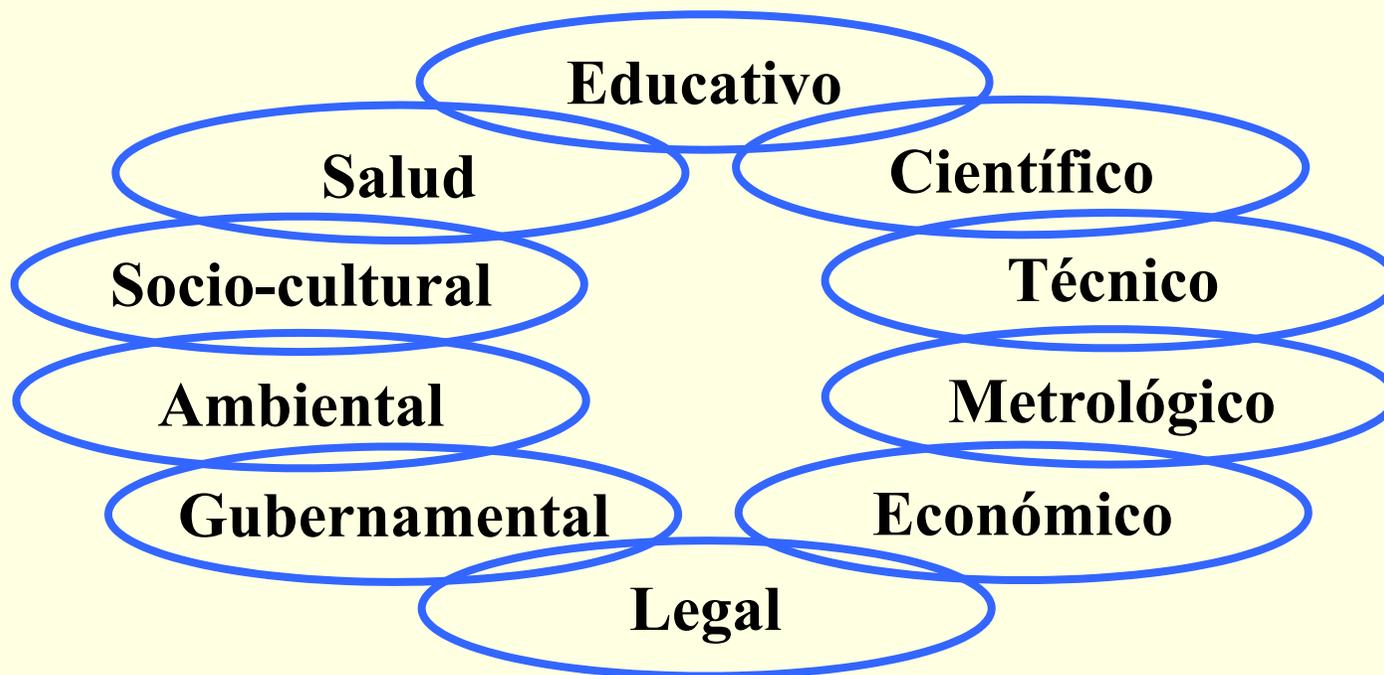
- Objetivo
- Introducción
- Método Convencional (de presión acústica)
- Técnica de intensidad acústica
- Mediciones en la cámara de transmisión
- Resultados
- Conclusiones

- Analizar, en condiciones de laboratorio, la influencia que diferentes variables de la técnica de intensidad acústica tienen sobre la estimación del índice de reducción sonoro (SRI) en muestras de paneles dobles.
  - Las variables estudiadas son: posición de la fuente sonora, espaciador de micrófonos, distancia muestra-sonda y densidad de puntos de medición.
  - Los valores del SRI obtenido con la técnica de intensidad acústica son comparados con los obtenidos por presión acústica (método convencional).

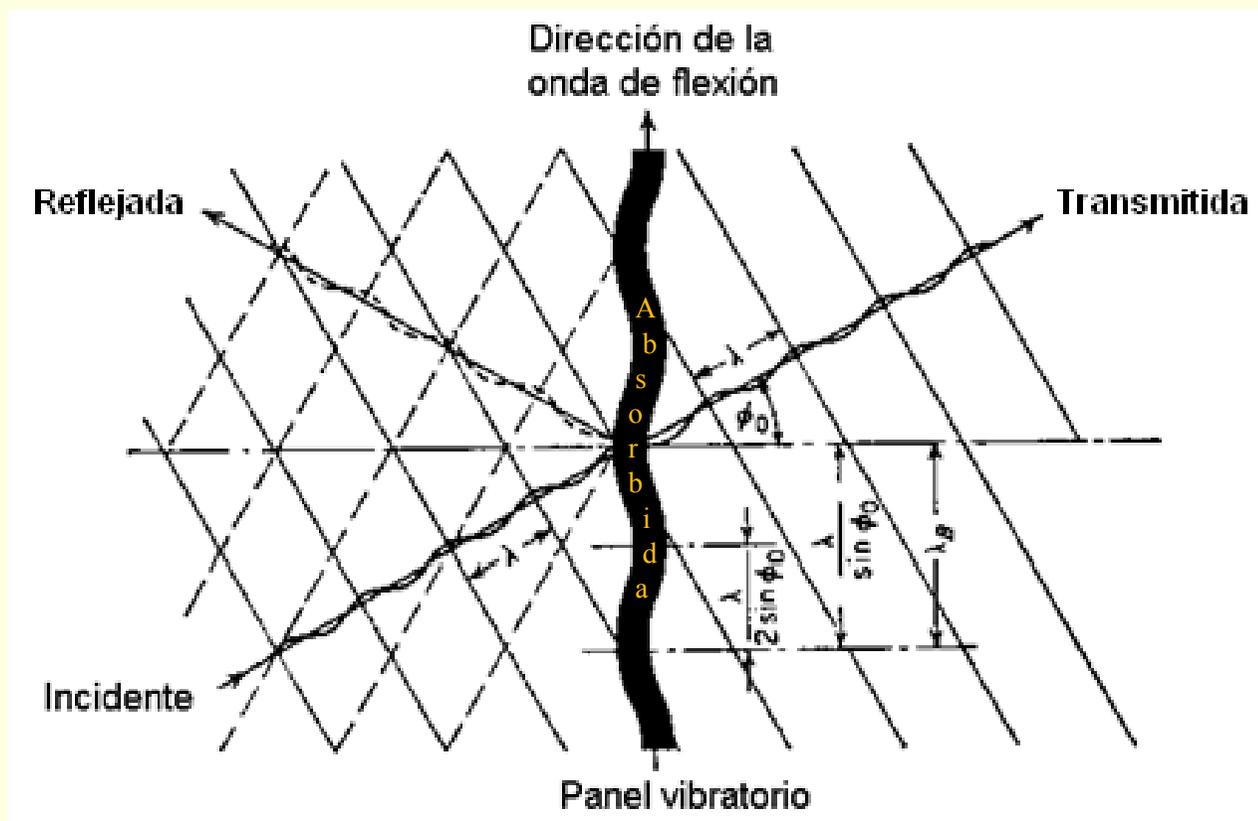
# Introducción



## Situación Actual



## Transmisión del sonido

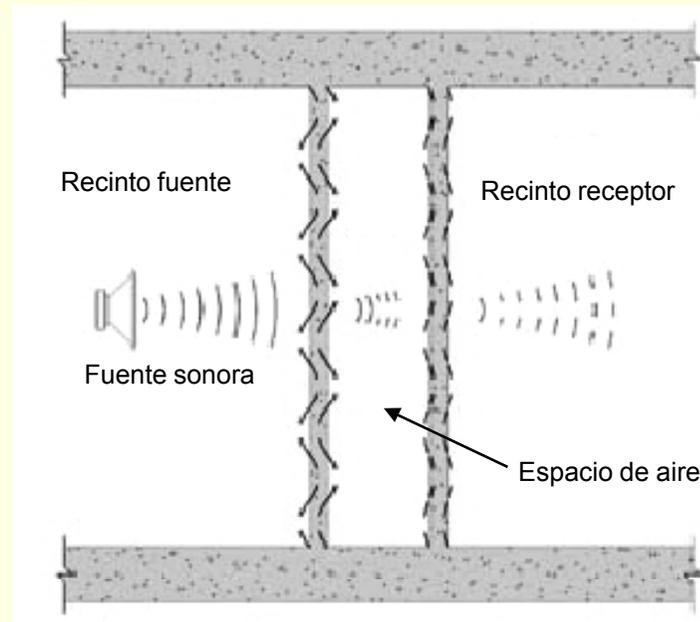


Distribución de la energía acústica al incidir sobre un panel

## Transmisión del sonido

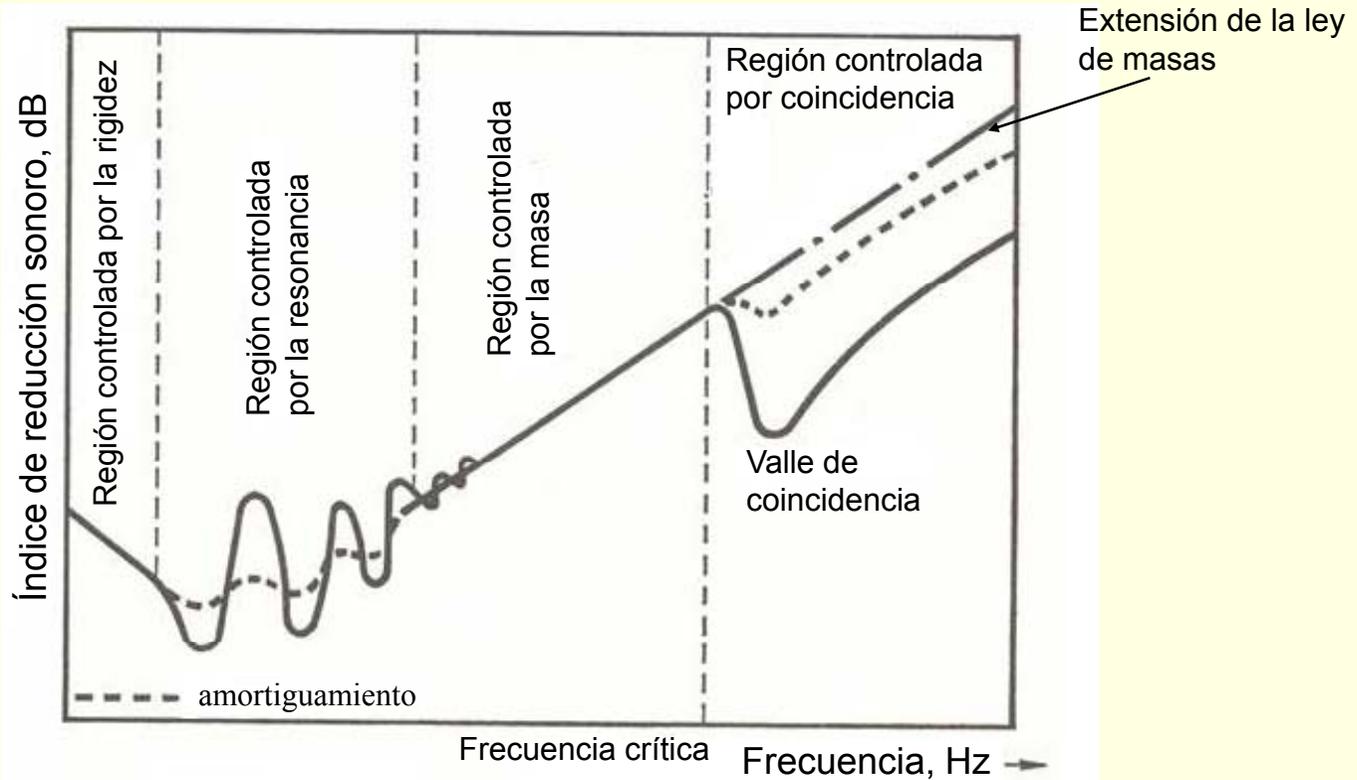
Las amplitudes de las energías sonoras reflejadas y transmitidas dependen de:

- Ángulo de incidencia
- Densidad superficial de los medios
- Velocidad del sonido en los medios



Ejemplo de una pared doble con espacio de aire

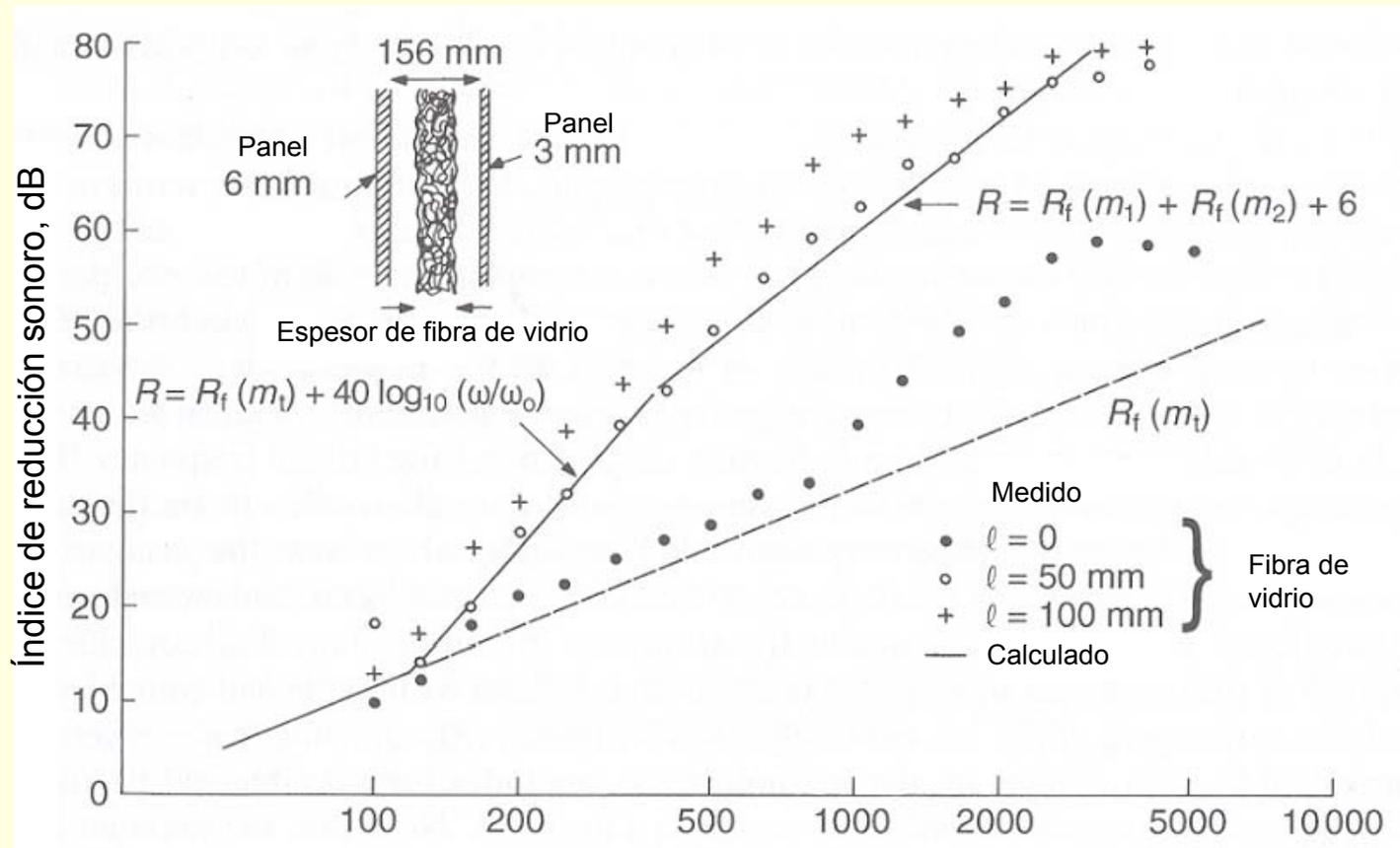
# Introducción



## Comportamiento típico de una pared simple

La frecuencia más baja en la que ocurre el efecto de coincidencia es cuando la velocidad de la onda de flexión es igual a la velocidad del sonido en el aire, la cual se conoce como **frecuencia crítica**

# Introducción



Índice de reducción sonora de una pared doble  
mecánicamente aislada

## Aislamiento Acústico

La habilidad de un ambiente dado o composición física de disminuir la transmisión de sonido de un espacio a otro. Indica la separación acústica entre dos ambientes.

El coeficiente de transmisión  $\tau$  se define como:

$$\tau = \frac{W_{transmitida}}{W_{incidente}} = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}}$$

## Índice de Reducción Sonoro

$$R = 10 \log \left( \frac{1}{\tau} \right) \text{ dB} \qquad R = 10 \log \frac{W_1}{W_2} \text{ dB}$$

## Normatividad Internacional

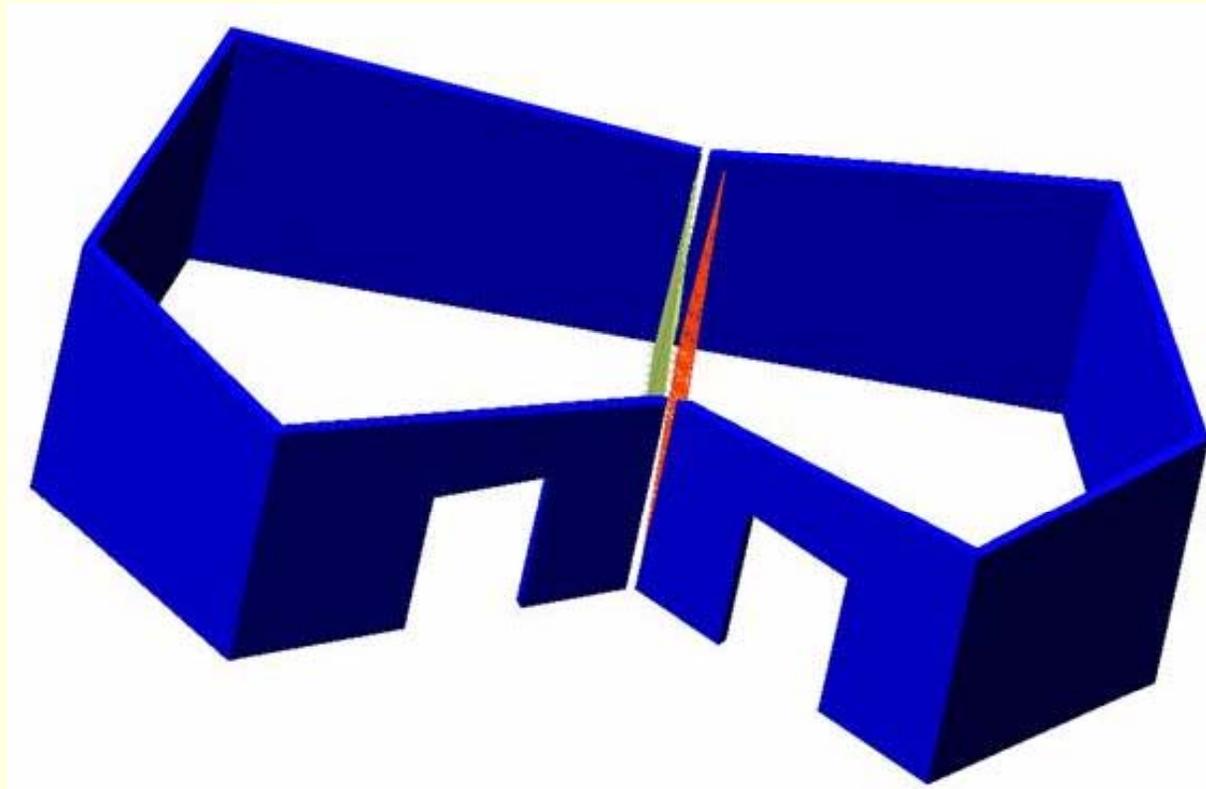
### Método convencional

- Método de laboratorio: ISO 140-1:1997, ISO 140-2:1991, ISO 140-3:1995, ISO 140-10:1991, ASTM E 90-04
- Método *in situ*: ISO 140-4:1998

### Técnica de intensidad acústica

- Método de laboratorio: ISO 15186-1:2000, ISO 15186-3:2002
- Método *in situ*: ISO 15186-2:2003

# Método Convencional



## Método convencional

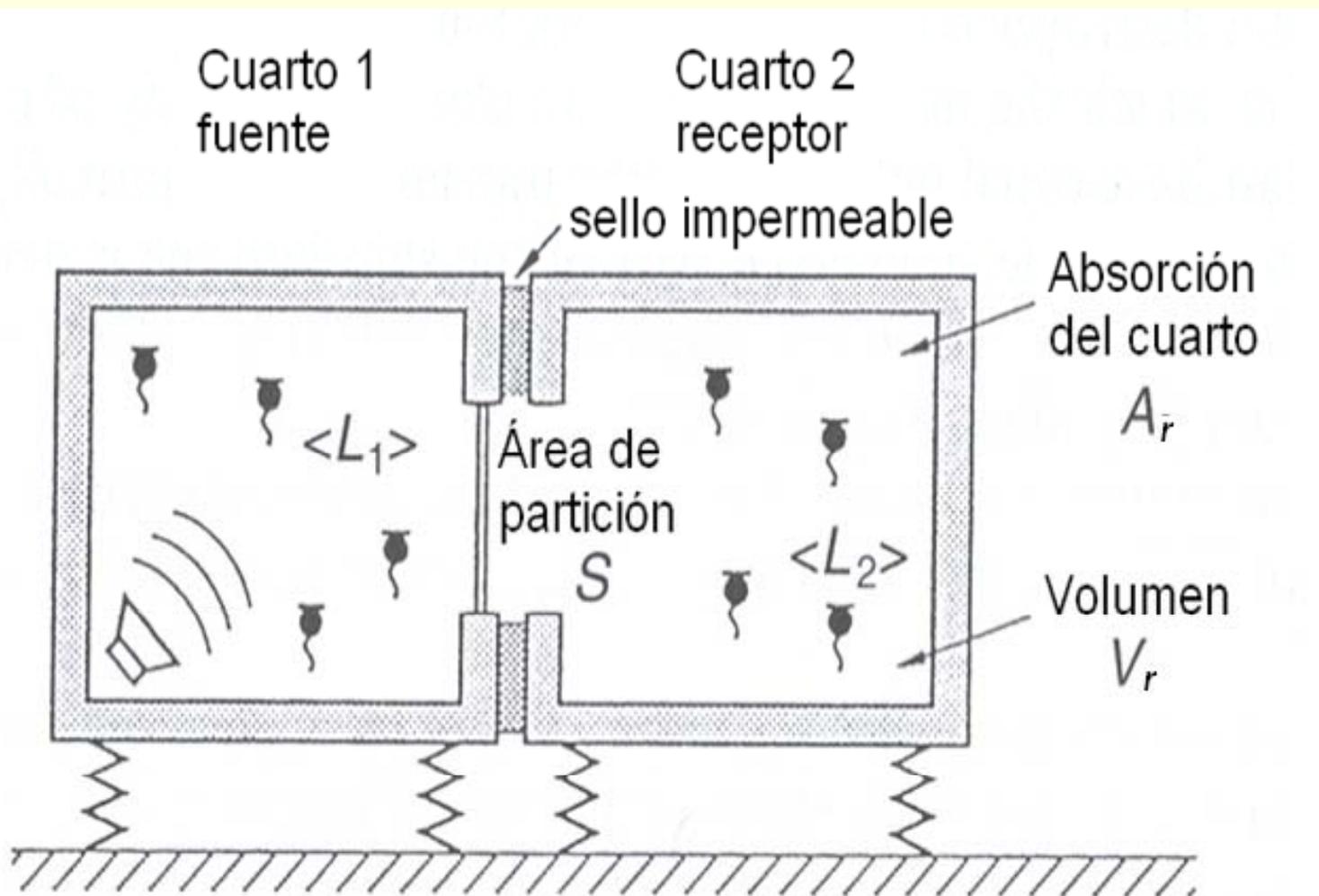


Diagrama esquemático de una cámara de transmisión

## Método convencional

### Determinación del SRI, $R$ , por el método convencional

$$R = 10 \log \left( \frac{W_1}{W_2} \right) = L_1 - L_2 + 10 \log \left( \frac{S}{A_r} \right)$$

Donde:

$L_1$  es el NPA en el cuarto fuente [dB re 20  $\mu$ Pa].

$L_2$  es el NPA en el cuarto receptor [dB re 20  $\mu$ Pa].

$S$  es la superficie del espécimen bajo prueba [ $m^2$ ]

El área de absorción acústica equivalente se define como:

$$A_r = 0,163 \cdot \frac{V_r}{T_{60}}$$

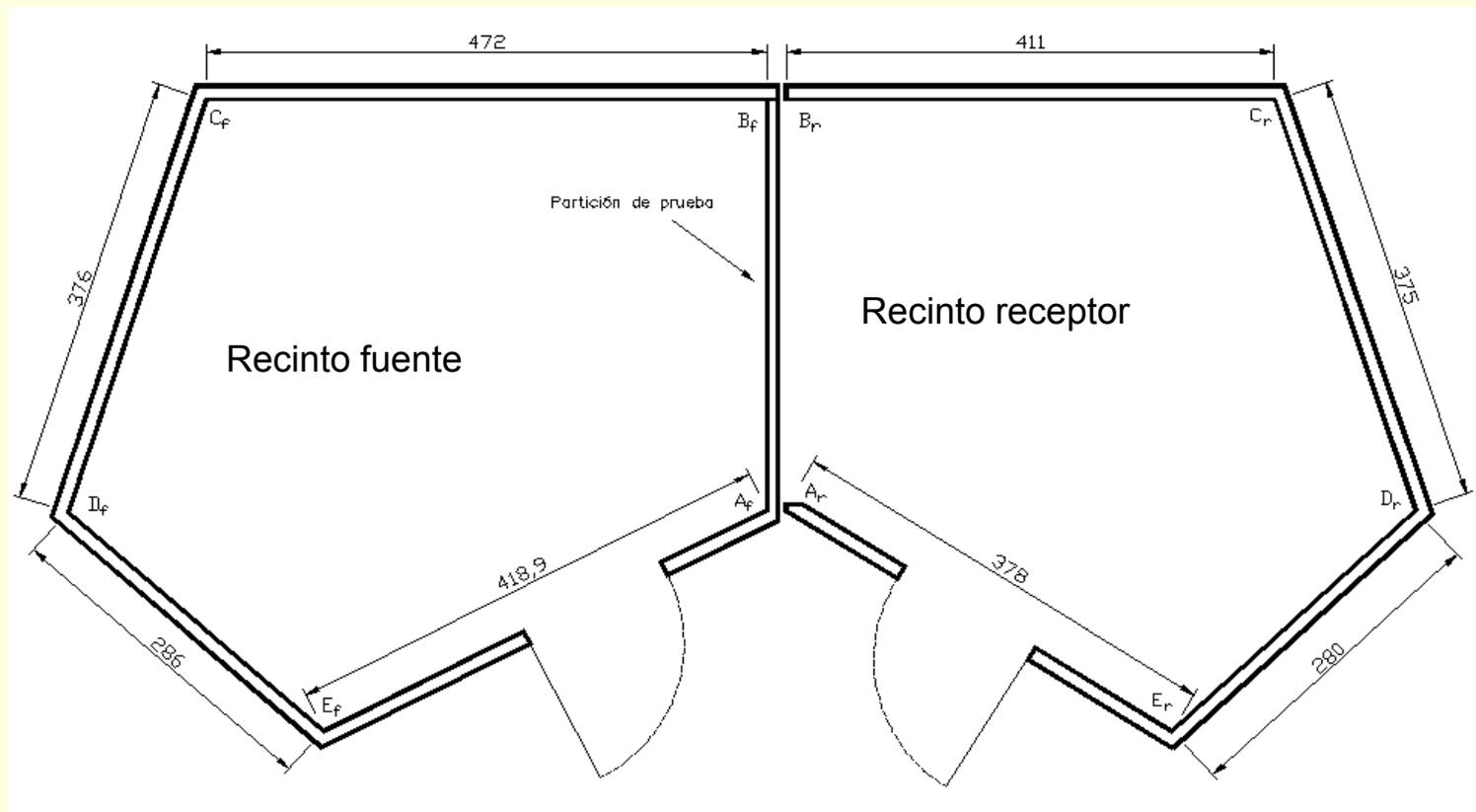
Donde  $V_r$  es el volumen del cuarto receptor [ $m^3$ ] y  $T_{60}$  es el tiempo de reverberación [s].

## Método convencional

### Factores que afectan los valores del SRI

- Flanqueo
- Ruido de fondo del recinto receptor
- Difusividad en el recinto fuente y receptor
- Tiempo de reverberación
- Montaje de la muestra de prueba
- Tamaño de la muestra de prueba
- Absorción de la muestra de prueba
- Posición de la fuente sonora y trayectoria del micrófono
- Omni-direccionalidad de la fuente sonora

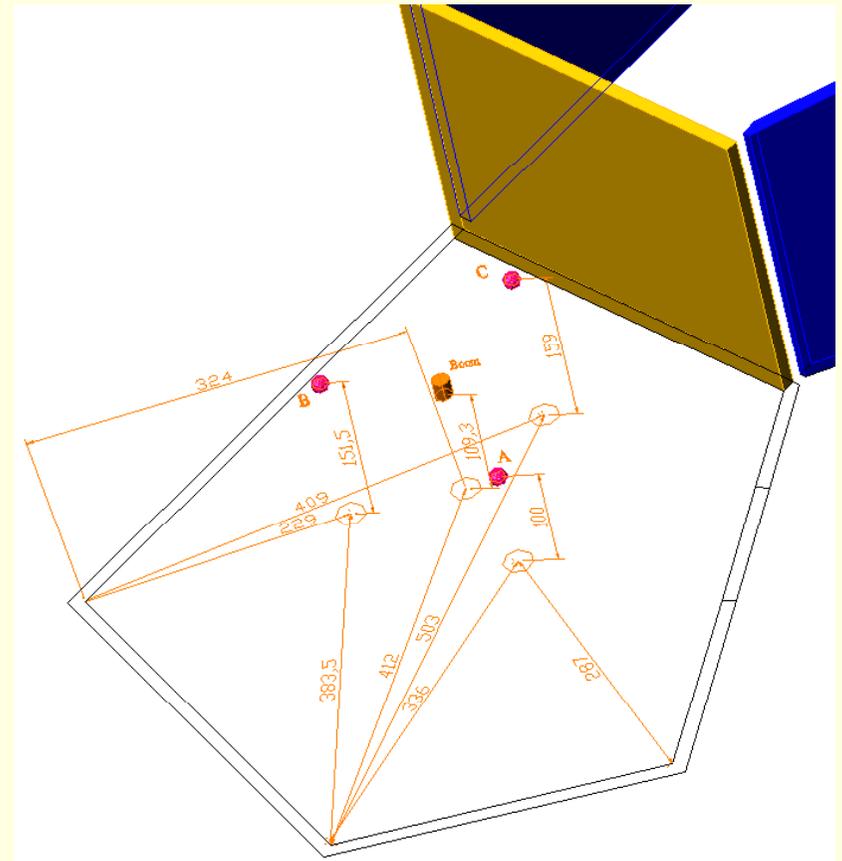
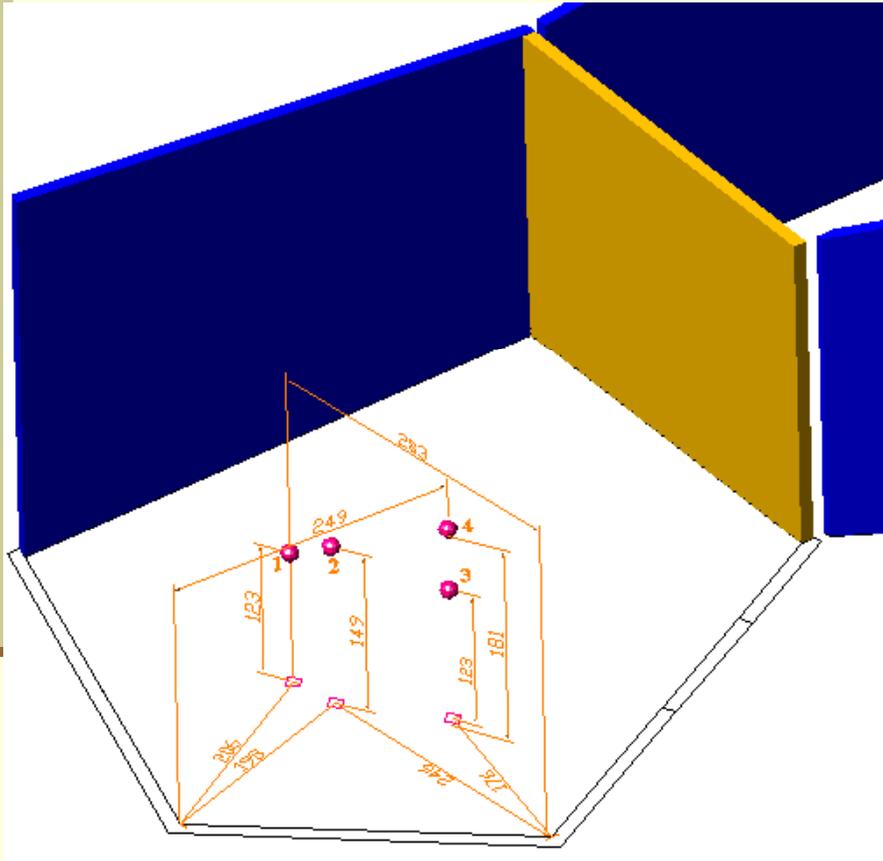
## Método convencional



Vista superior. Dimensiones interiores de la cámara de transmisión del CCADET-UNAM

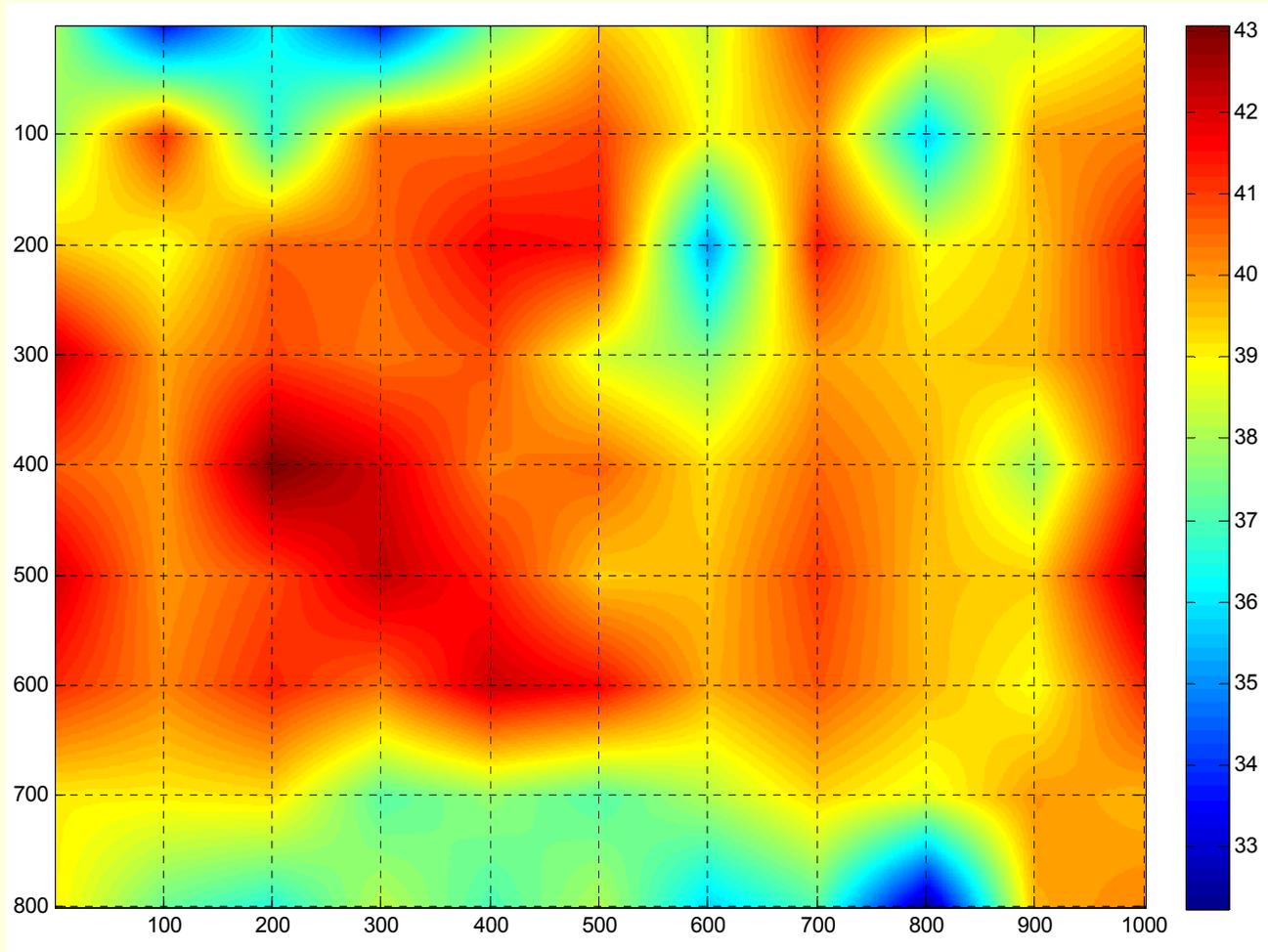
## Método convencional

### Posiciones de la fuente sonora y trayectoria del micrófono conforme a la ISO 140-3



Posiciones de la fuente sonora y plano de giro del boom giratorio dentro del recinto fuente

# Técnica de Intensidad Acústica



## Técnica de intensidad acústica

### Teoría para determinación de potencia acústica

Teóricamente, la potencia acústica de una fuente es calculada integrando la componente normal de la intensidad acústica sobre la superficie de medición

$$W = \int \vec{I} dS$$

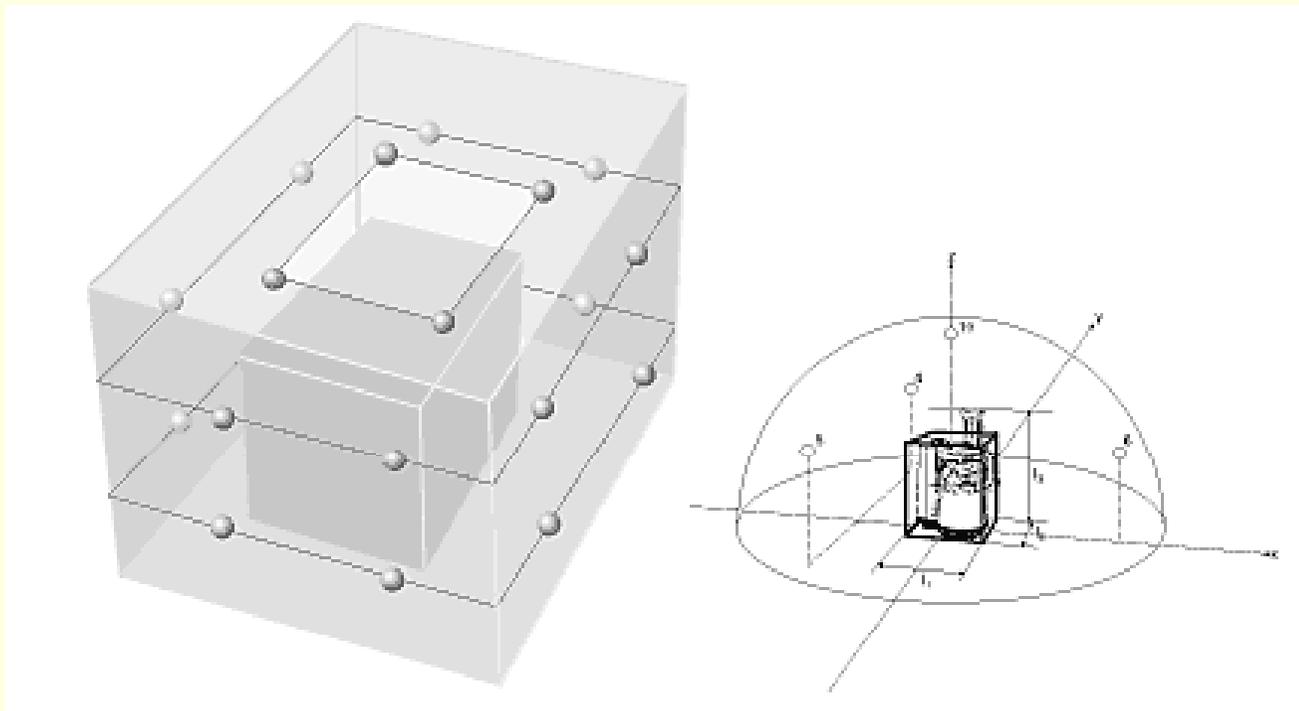
Prácticamente se tiene

$$W = \sum_{p=1}^n \vec{I}_p (\Delta S)_p$$

Sí  $n$  tiende a infinito

$$W = \int \vec{I} dS = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{p=1}^n \vec{I}_p (\Delta S)_p$$

# Técnica de intensidad acústica



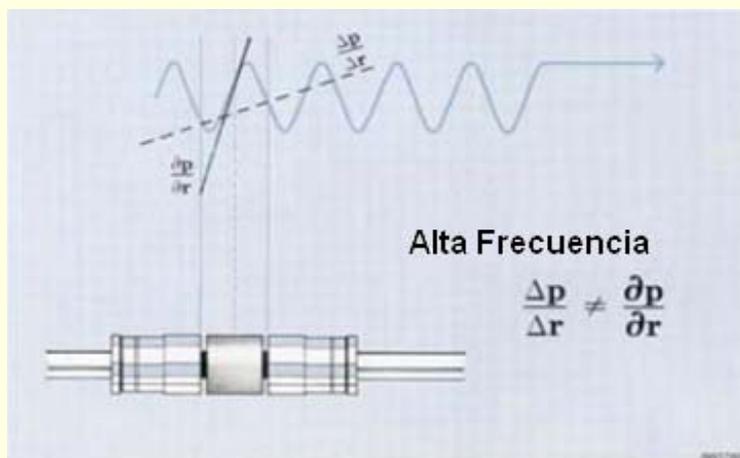
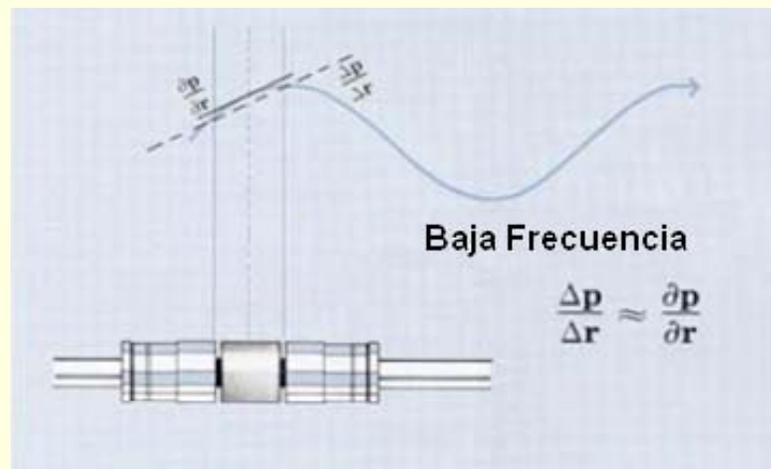
La **exactitud en la integración** de la superficie depende de:

- La complejidad del campo acústico sobre la superficie de medición
- El tamaño de los segmentos
- La técnica de muestreo de la componente normal de la intensidad
  - + Puntos discretos (ISO 9614-1)
  - + Técnica de escaneo (ISO 9614-2, ISO 9614-3)

# Técnica de intensidad acústica

## Limitaciones en la medición de intensidad acústica

- Bajas Frecuencias:
  - ✓ Error de fase en los micrófonos  
(Índice presión-intensidad residual)

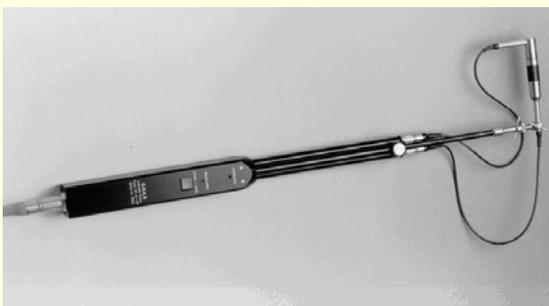


- Altas frecuencias:
  - ✓ Aproximación por diferencia finita  
(separación entre micrófonos)

# Técnica de intensidad acústica

## Requerimientos en la instrumentación

Analizador de señal {  
Intervalo de frecuencia  
Filtrado  
Provisión para separación entre micrófonos  
Promediación  
Índice presión – intensidad residual  
Correcciones por presión estática y temperatura



Sonda de intensidad {  
Contrucción mecánica  
Respuesta en presión  
Respuesta en intensidad acústica  
Características direccionales  
*Igualdad de los sensores*

# Técnica de intensidad acústica

## Indicadores de campo sugeridos en la ISO 9614-1

$$F_1 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M \left( I_{nk} - \bar{I}_n \right)^2}$$

Índice de la variabilidad temporal del campo

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|}$$

Índice presión superficial-intensidad

$$F_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n}$$

Índice de la potencia parcial negativa

$$F_4 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( I_{n_i} - \bar{I}_n \right)^2}$$

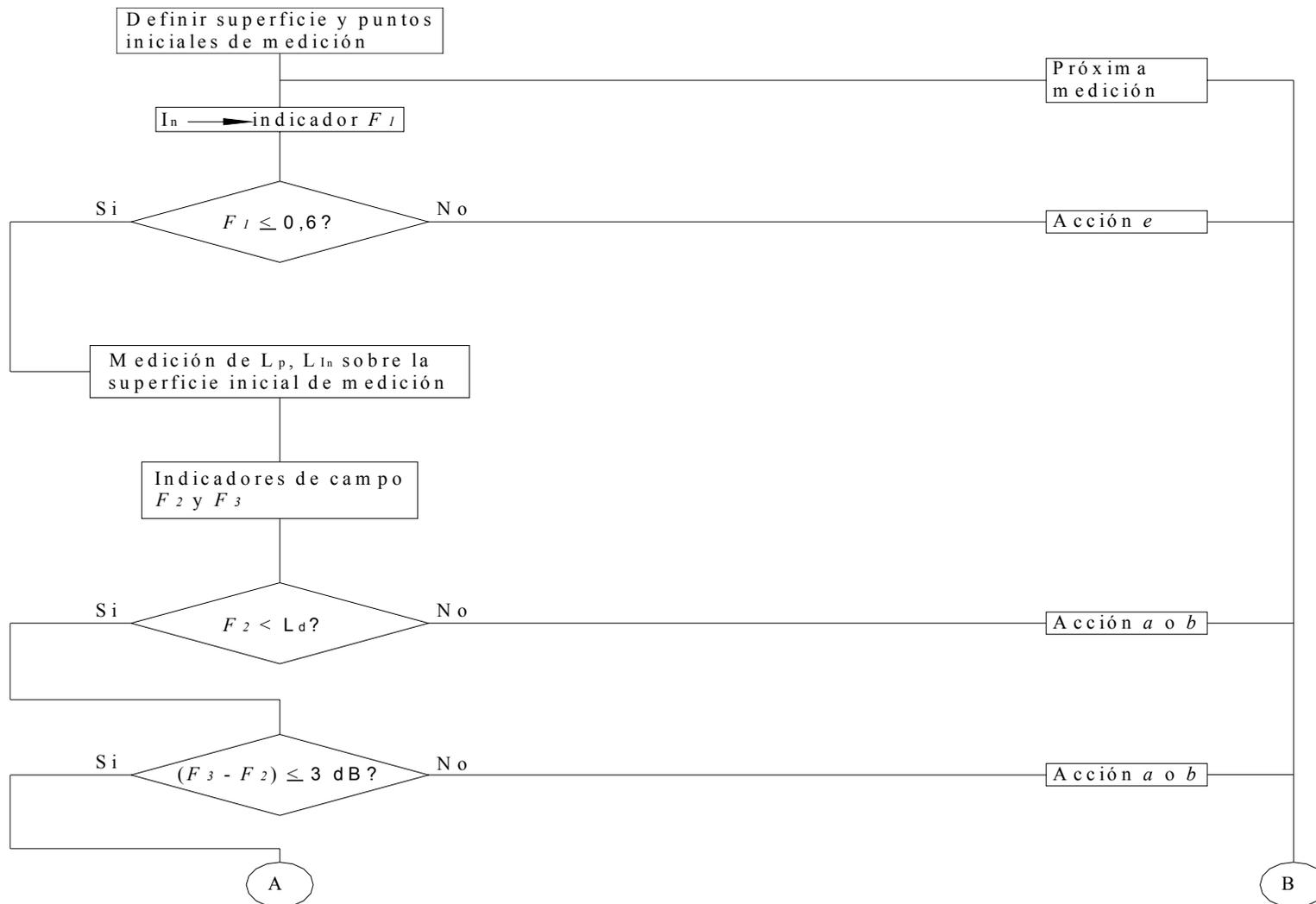
Índice de la no-uniformidad del campo

$$L_d = \delta_{p_0 I_o} - K$$

Índice de capacidad dinámica del equipo

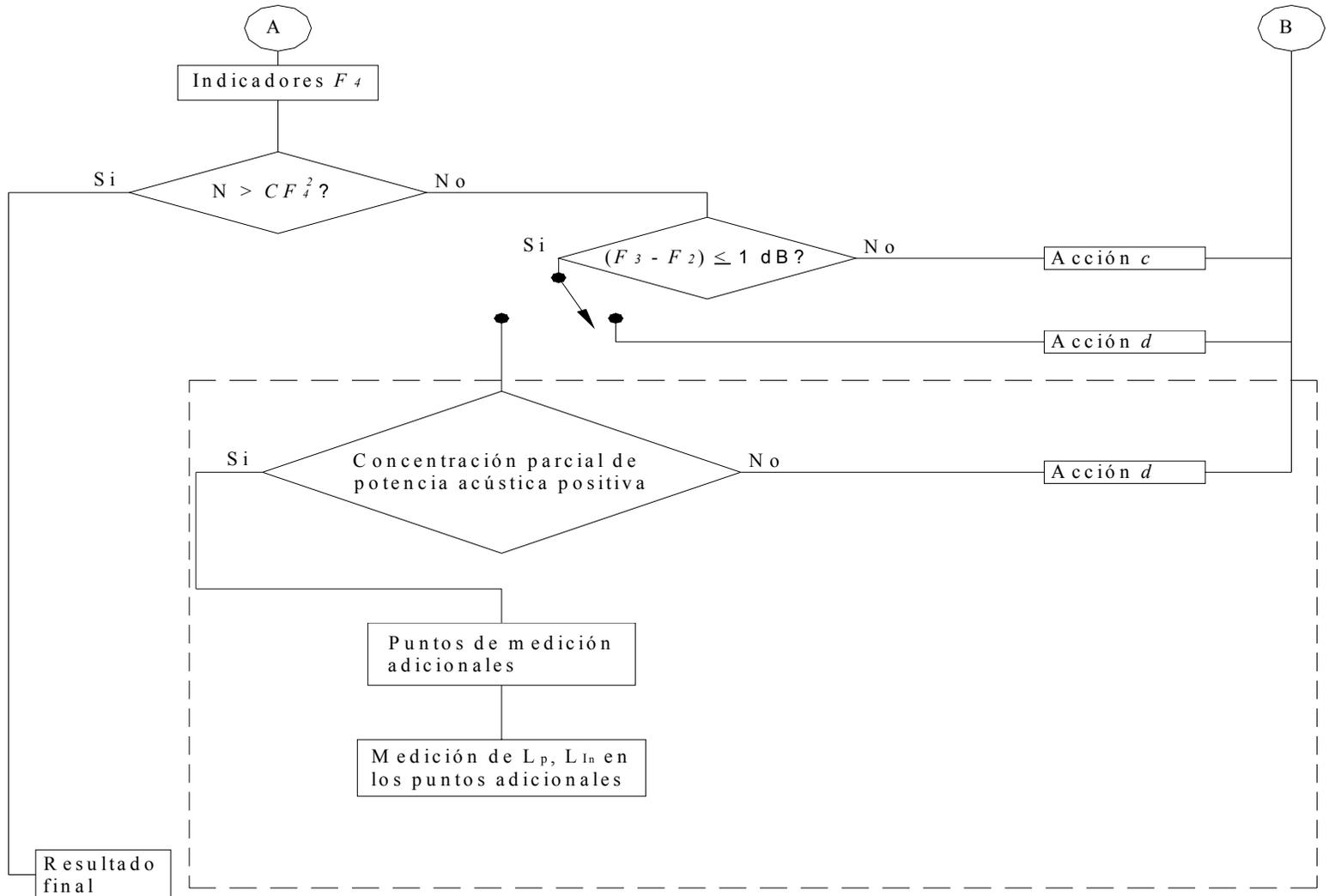
# Técnica de intensidad acústica

## Procedimiento de medición de intensidad acústica conforme a la ISO 9614-1 para lograr el grado de exactitud deseada



# Técnica de intensidad acústica

Procedimiento de medición de intensidad acústica conforme a la ISO 9614-1 para lograr el grado de exactitud deseada



## Técnica de intensidad acústica

### Determinación del SRI, $R_I$ , por la técnica de intensidad acústica

$$R_I = L_1 - 6 - \left[ L_{In} + 10 \log_{10} \left( \frac{S_m}{S} \right) \right] + K_C$$

$L_1$  es el NPA en el cuarto fuente [dB re 20  $\mu$ Pa].

$L_{In}$  es Nivel de Intensidad Sonora promedio sobre al superficie de medición en el cuarto receptor [dB re  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>].

$S_m$  área total de la superficie de medición [m<sup>2</sup>].

$S$  área del material bajo prueba [m<sup>2</sup>]

$$K_C = 10 \log_{10} \left( 1 + \frac{S_{br} \lambda}{8V_r} \right) \quad \text{Corrección de Waterhouse}$$

Donde  $S_{br}$  es el área de todas las superficies en el cuarto receptor [m<sup>2</sup>] y  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia media [m].

# Técnica de intensidad acústica

## Factores que afectan los valores del SRI

- Flanqueo
- Ruido de fondo del recinto receptor
- Difusividad en el recinto fuente
- Tiempo de reverberación en el recinto receptor
- Montaje de la muestra de prueba
- Tamaño de la muestra de prueba
- Absorción de la muestra de prueba
- Posición de la fuente sonora y trayectoria del micrófono
- Omni-direccionalidad de la fuente sonora
- Características del equipo de medición
- Espaciador de micrófonos
- Distancia muestra-sonda
- Discretización de la superficie de medición

# Mediciones en la cámara de transmisión



# Mediciones en la cámara de transmisión



Ubicación de la fuente sonora y el boom giratorio en el recinto fuente

# Mediciones en la cámara de transmisión



Equipo para operación de la fuente sonora

Colocación de material absorbente en el recinto receptor



# Mediciones en la cámara de transmisión



Equipo empleados para la medición de intensidad acústica

# Mediciones en la cámara de transmisión



Estructura para montaje de los paneles de prueba

# Mediciones en la cámara de transmisión



Montaje de los paneles de prueba

Muestra de prueba



# Mediciones en la cámara de transmisión

Materiales de prueba

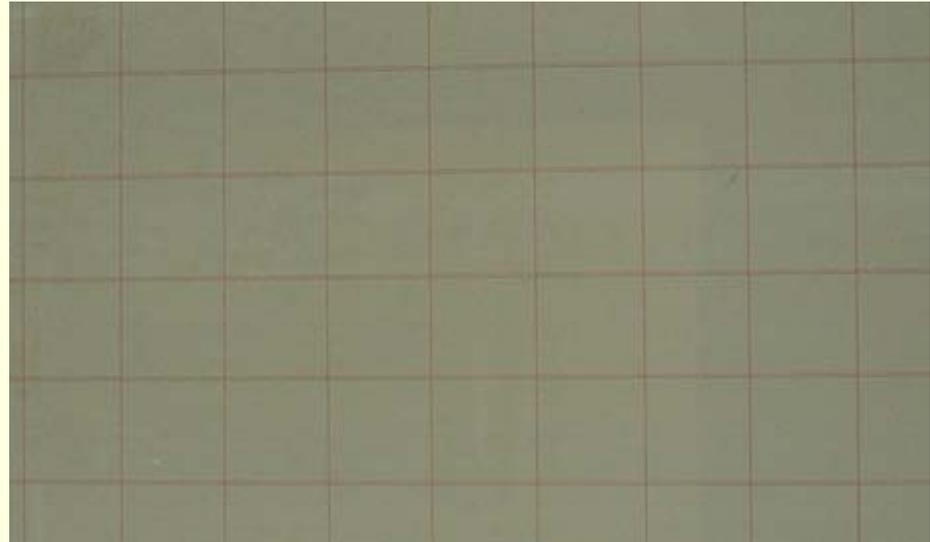
Material	Densidad, kg/m <sup>3</sup>
Tabla-cemento A	12,30
Tabla-cemento B	12,23
Tabla-cemento C	15,21

Mediciones de intensidad acústica sobre la superficie de medición, conforme a ISO 9614-1



# Mediciones en la cámara de transmisión

Mallado para la mediciones de intensidad acústica sobre la superficie de la muestra.

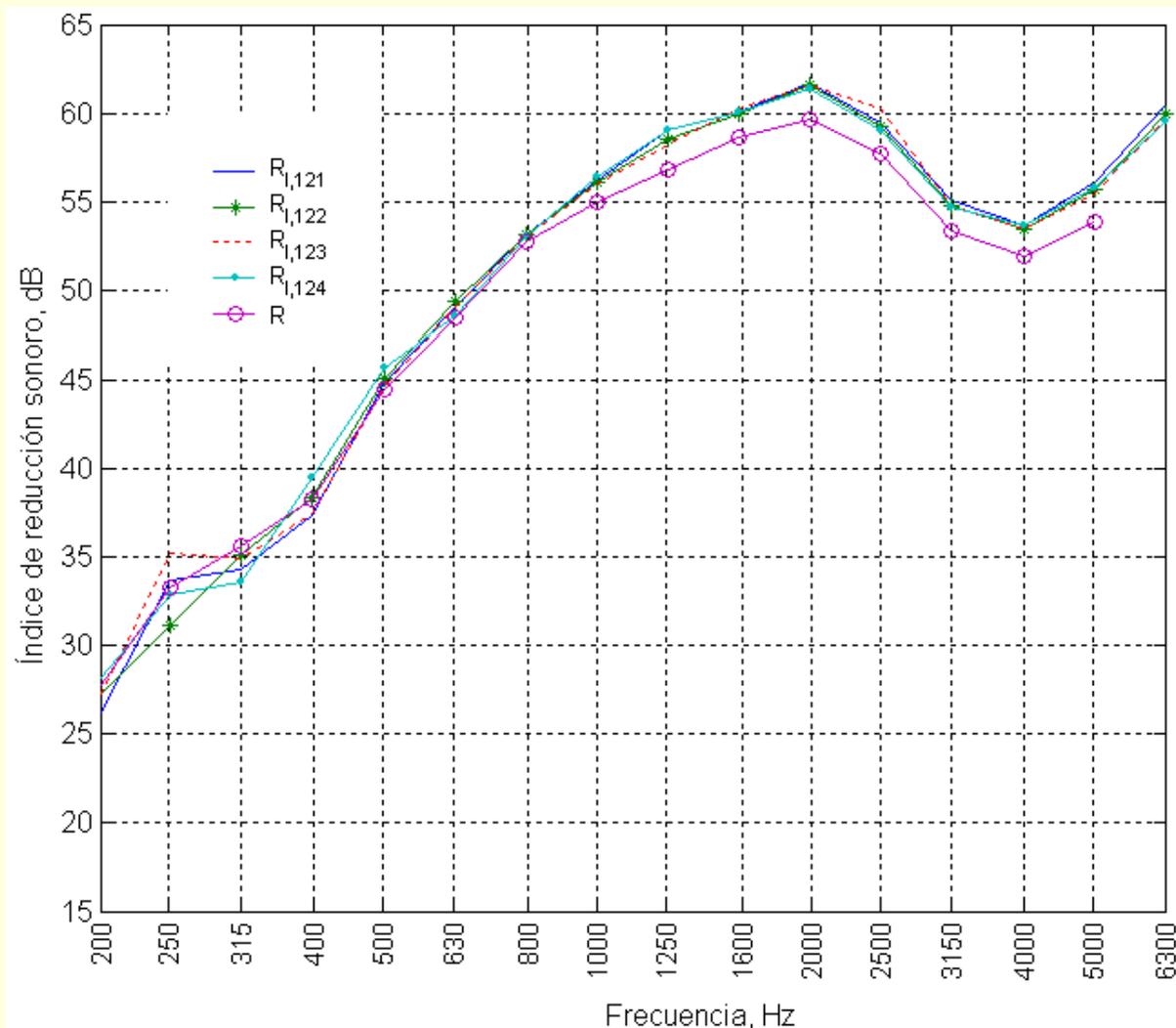


Variable	Espaciador	Designación
Espaciador	12	1
	50	2
Distancia muestra-sonda	15	1
	20	2
	23	3
Posición de la fuente sonora		1
		2
		3
		4

Variables y su nomenclatura

# Resultados





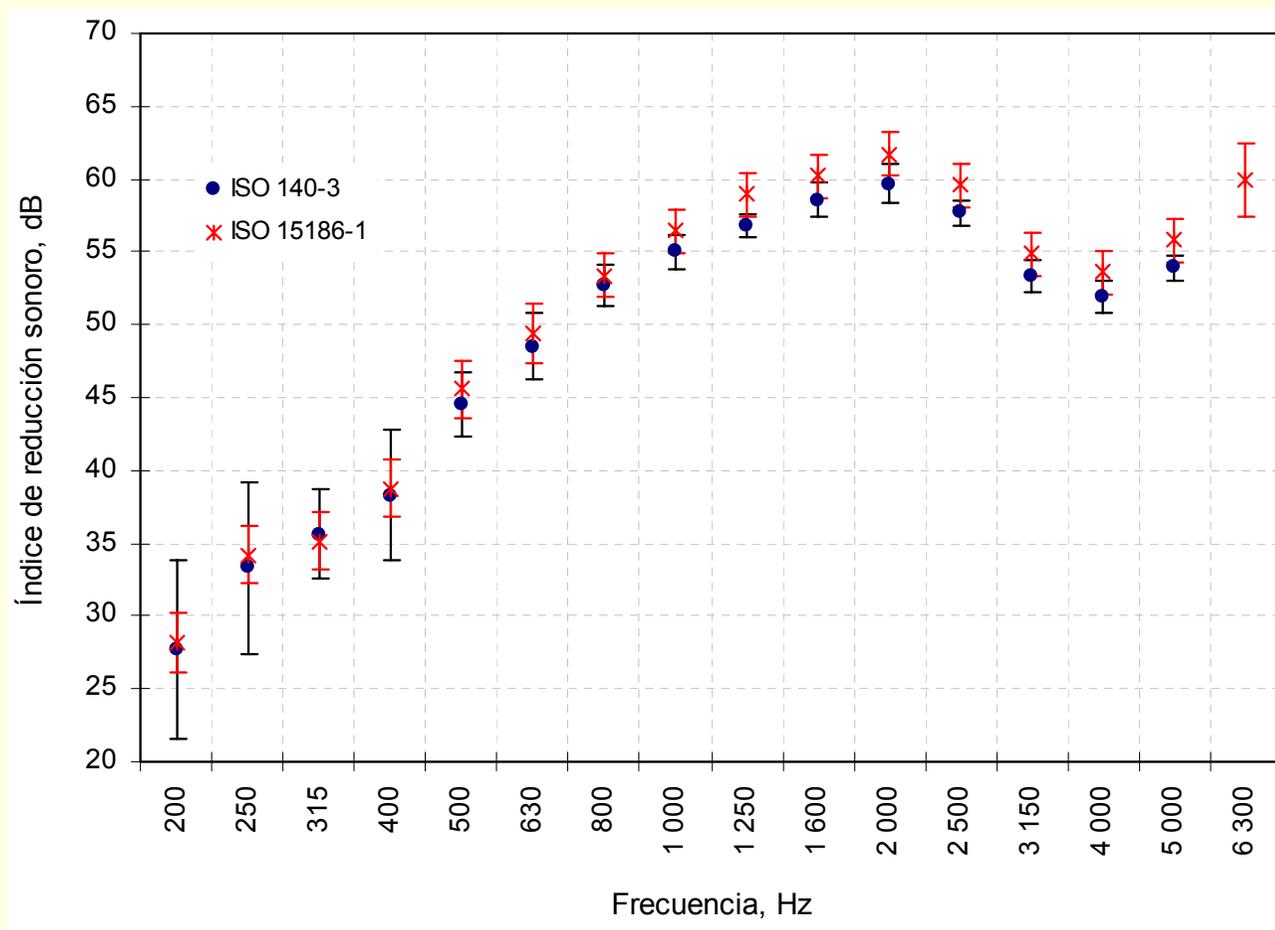
Comparación del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica para cuatro posiciones de la fuente sonora. Material Tabla-cemento A.

Frec. Hz	Posición de la fuente sonora				
	$L_d$	1	2	3	4
200	12,9	5,42	5,35	5,66	5,65
250	13,9	5,50	5,66	5,94	5,91
315	13,4	6,17	5,86	6,65	6,25
400	13,4	6,32	6,15	6,53	6,36
500	14,1	6,69	6,47	6,85	6,53
630	14,3	6,87	7,12	7,08	6,78
800	16,0	7,16	7,16	7,32	6,94
1000	13,3	7,08	7,37	7,24	7,18
1250	12,6	6,98	7,20	7,2	7,29
1600	11,7	7,24	7,23	7,55	7,32
2000	13,2	7,40	7,82	7,84	7,70
2500	12,6	7,11	7,24	7,93	7,10
3150	12,5	6,52	6,45	6,44	6,29
4000	12,2	5,97	5,90	5,90	5,85
5000	12,4	5,82	5,73	5,72	5,65
6300		5,88	5,63	5,71	5,52

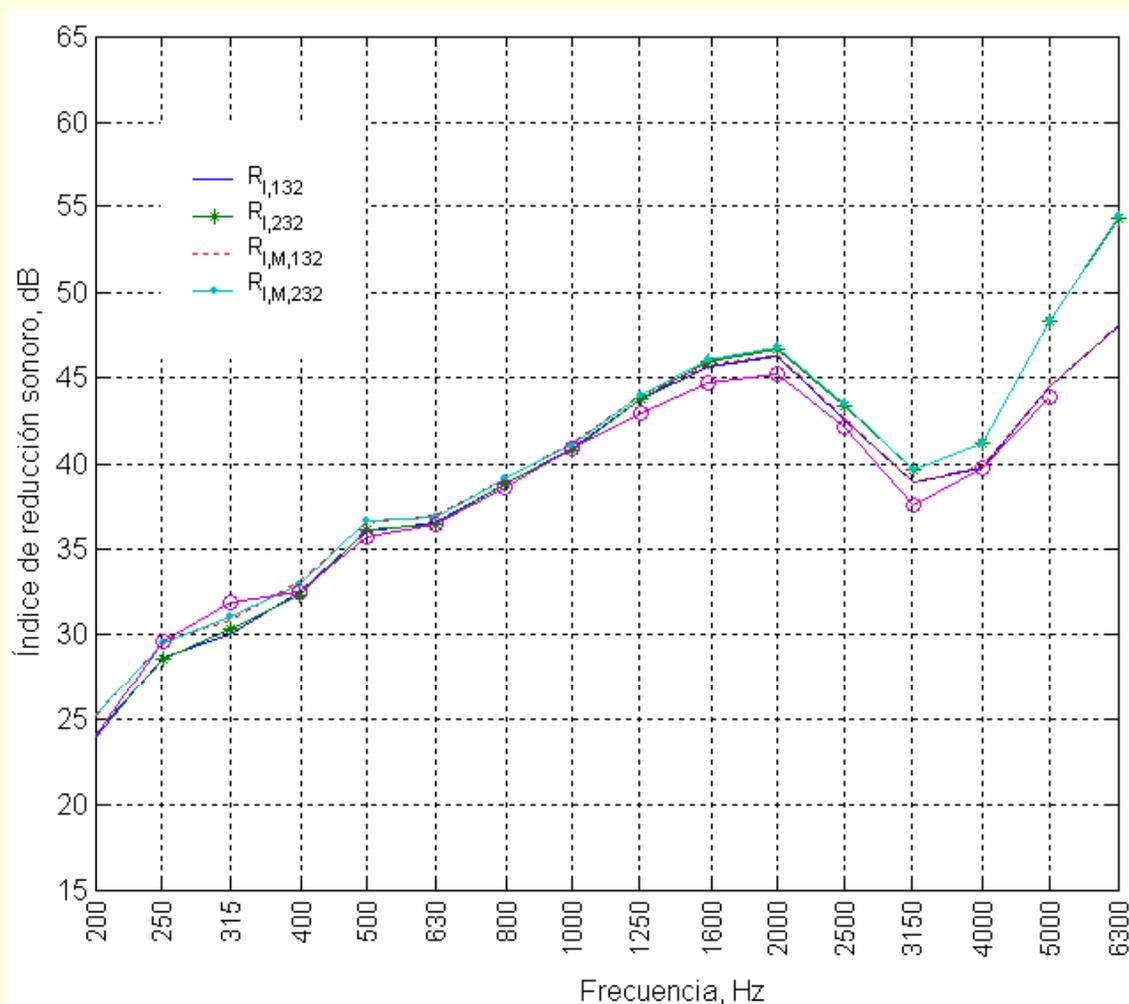
Indicador de campo  $F_{2,12k}$  para las cuatro posiciones de la fuente sonora. Material Tabla-cemento A.

Frecuencia Hz	$R_{I,M,121} - R$	$R_{I,M,122} - R$	ISO 9614-1 Desviación estándar
	dB	dB	dB
200	-0,66	0,63	2,0
250	1,37	-1,21	2,0
315	-0,64	0,23	2,0
400	-0,33	0,63	2,0
500	0,93	1,09	2,0
630	0,94	1,23	1,5
800	0,78	0,75	1,5
1000	1,50	1,33	1,5
1250	2,43	1,99	1,5
1600	1,60	1,48	1,5
2000	2,11	2,01	1,5
2500	1,86	1,69	1,5
3150	1,88	1,50	1,5
4000	1,84	1,60	1,5
5000	2,20	1,88	2,5
6300			2,0

Diferencia entre  $R_{IM}$  y  $R$  para dos posiciones de la fuente sonora, y desviación estándar sugerida por la ISO 9614-1 en mediciones de intensidad acústica para estimación de potencia acústica. Material Tabla-cemento A.



Comparación del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica. Graficado el valor promedio del SRI para las cuatro posiciones de la fuente sonora. La componente de repetibilidad para mediciones es determinada conforme a ISO 140-2. La desviación estándar para mediciones conforme a ISO 15186-1 es aquella sugerida por la ISO 9614-1. Material Tabla-cemento A.

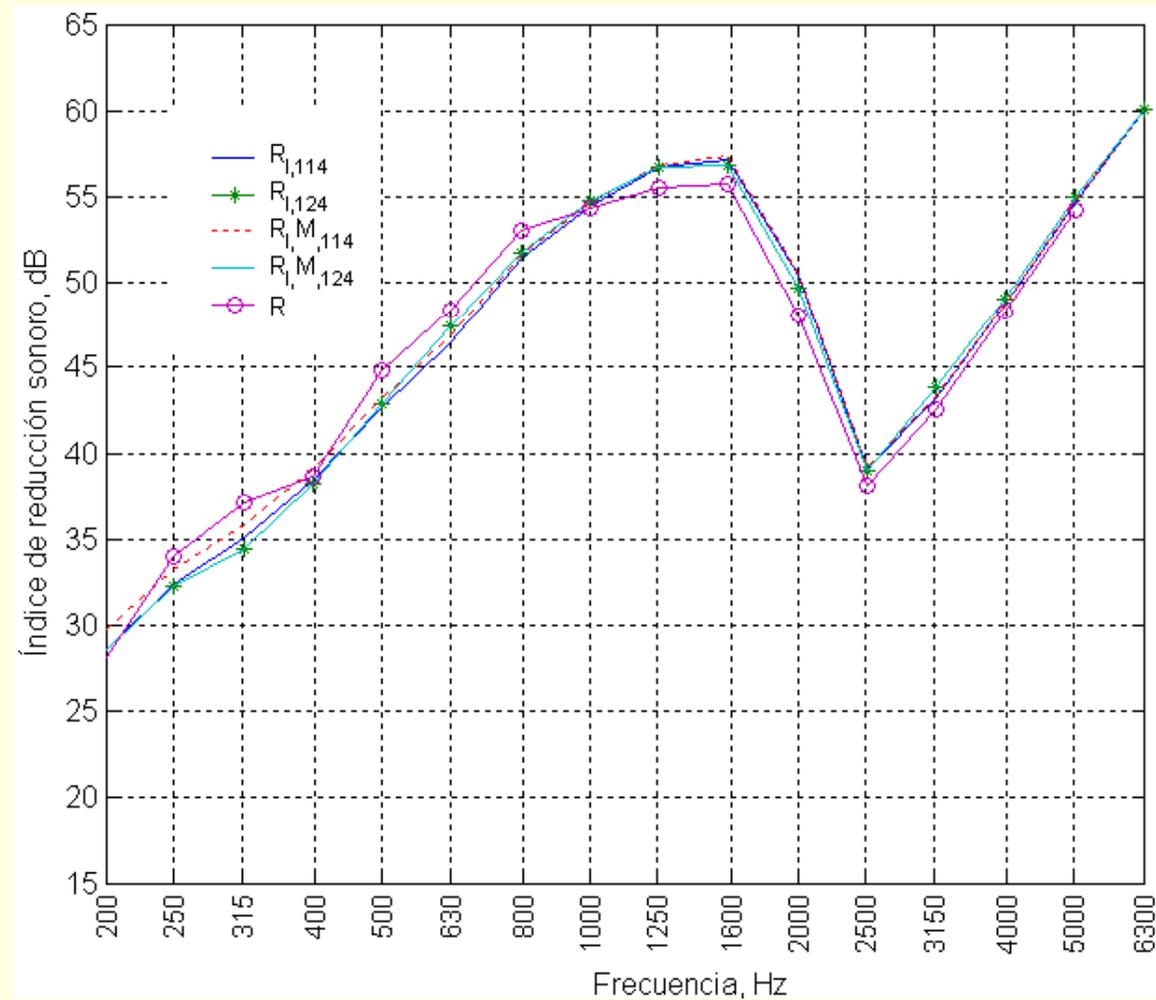


Comparación del índice de reducción sonoro entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica para dos espaciadores de micrófonos. Material tabla-cemento B.

Frec. Hz	$L_d$	$F_{2,132}$	$F_{2,232}$
200	19,1	5,88	5,62
250	20,1	6,13	6,08
315	19,6	6,25	6,10
400	19,6	6,46	6,25
500	20,3	6,32	6,24
630	20,5	6,35	5,91
800	22,2	6,53	6,41
1000	19,5	6,31	6,20
1250	18,8	6,15	6,06
1600	17,9	6,23	6,09
2000	19,4	6,15	5,86
2500	18,8	5,86	5,63
3150	18,7	7,17	7,11
4000	18,4	5,56	5,35
5000	18,6	4,66	4,93
6300		5,17	8,19

Indicador de campo  $F_{2,13k}$  para dos espaciadores de micrófonos.

Material Tabla-cemento B.

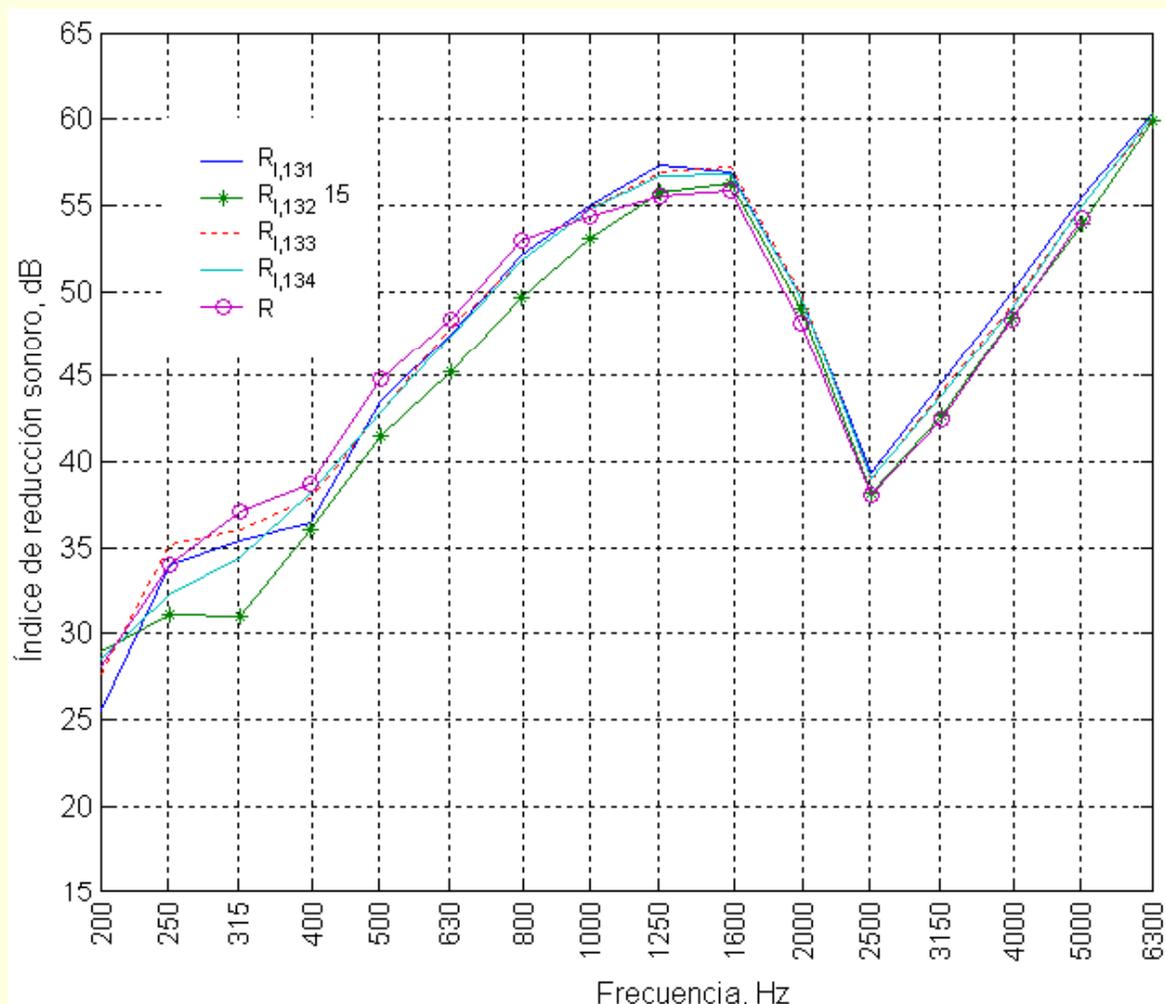


Comparación del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica para dos distancias muestra-sonda. Material tabla-cemento C.

Frec. Hz	$F_{2,114}$	$F_{2,131}$	$F_{2,132}$	$F_{2,133}$	$F_{2,134}$
200	6,27	5,61	5,54	5,58	5,84
250	6,15	5,51	5,78	5,47	5,72
315	7,72	5,98	5,97	6,44	6,40
400	7,75	6,48	6,34	6,5	6,44
500	7,38	7,24	6,72	7,06	6,71
630	7,15	6,65	7,06	6,57	6,80
800	7,52	6,94	7,08	7,03	6,81
1000	7,5	7,06	7,06	6,86	6,86
1250	7,76	6,82	7,33	7,11	6,80
1600	8,25	7,08	7,34	7,01	6,95
2000	8,89	7,17	7,46	7,16	7,20
2500	8,02	7,15	7,02	6,77	6,98
3150	5,22	5,33	5,1	5,16	5,23
4000	3,54	3,55	3,61	3,57	3,57
5000	3,8	3,8	3,95	3,81	3,83
6300	4,36	4,14	4,65	4,12	4,25

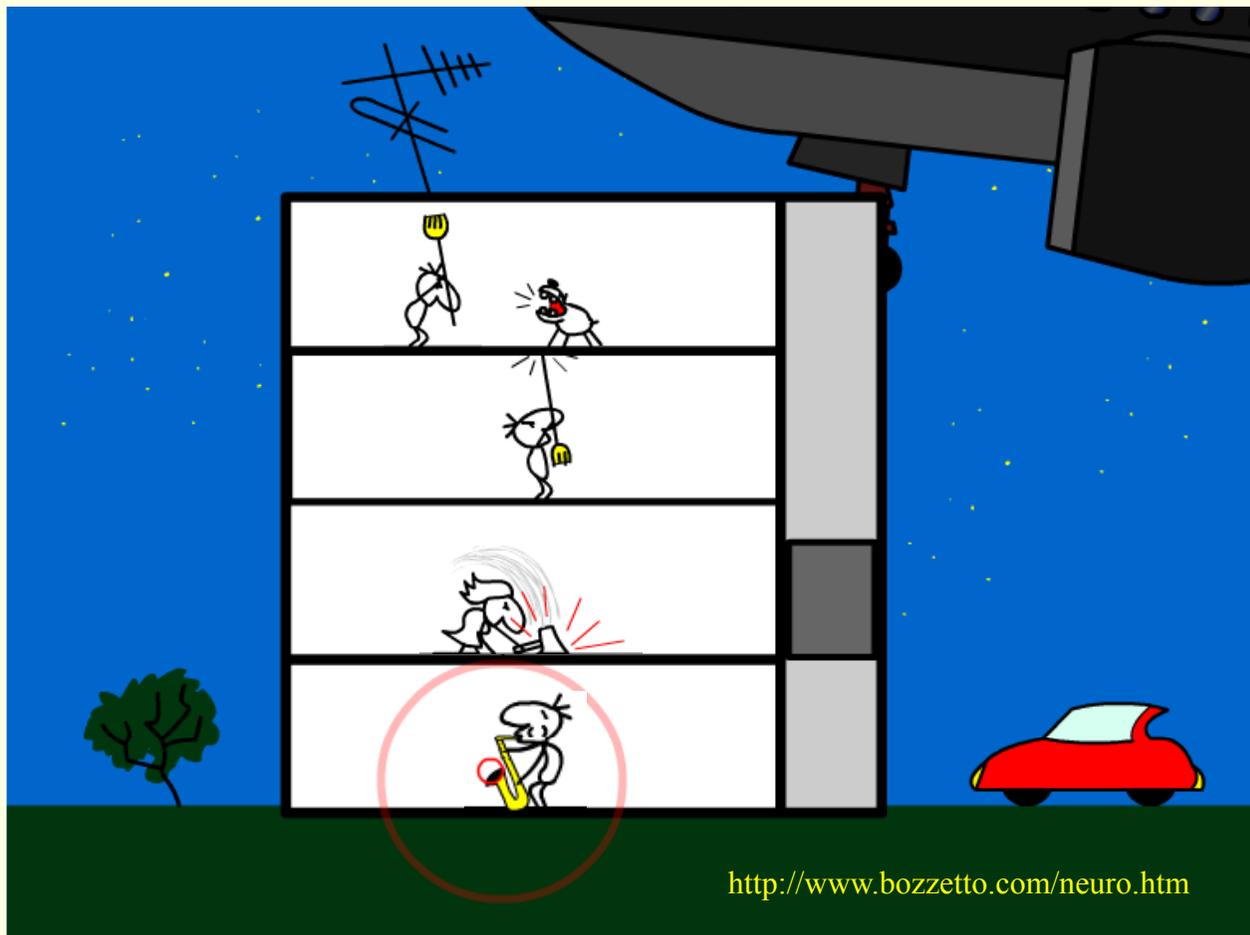
Indicador de campo  $F_2$  para dos distancia muestra-sonda.  
Material Tabla-cemento C.

# Resultados



Comparación del índice de reducción sonora entre el método convencional y la técnica de intensidad acústica para dos discretizaciones de la superficie de medición (15 cm y 30 cm). Material tabla-cemento C.

# Conclusiones



- En el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 6,3 kHz, es posible lograr una exactitud de medición de los valores del SRI con el espaciador de micrófonos de 12 mm, dentro de lo que indica la norma ISO 15186-1:2000.
- Una discretización de 30 cm (densidad de 99 puntos) es suficiente para lograr una incertidumbre dentro de lo que marca la norma ISO 15186-1:2000, bajo las condiciones de prueba empleadas (tiempo de reverberación en el receptor, posiciones de la fuente sonora, etc.).

## Conclusiones

- El uso de varias posiciones de la fuente sonora es recomendable para, en la medida de lo posible, detectar problemas de difusividad del campo; así como del montaje de la muestra de prueba.
- Es importante señalar que las diferencias encontradas entre  $R$  y  $R_{IM}$  en la mayoría de las mediciones quedan dentro de la desviación estándar de medición de intensidad acústica conforme la ISO 9614-1.

- Los valores del SRI obtenidos por la técnica de intensidad son más bajos a bajas frecuencias y ligeramente más altos a altas frecuencias que los obtenidos por el método de presión conforme a la norma internacional ISO 140-3:1995.
  - El comportamiento es muy semejante a lo presentado por diferentes autores en la literatura.
  
- Mientras sea posible conseguir una mayor difusividad del campo acústico a bajas frecuencias, la diferencia del SRI entre el método convencional y la técnica de intensidad tenderá a un valor mínimo.

- Al aplicar la corrección de Waterhouse a los valores del SRI obtenidos por el técnica de intensidad, con la expresión sugerida en la norma ISO 15186-1:2000, la diferencia entre los valores del SRI obtenidos por ambos métodos se disminuye a bajas frecuencias.
- Se desarrolla en México la estimación del índice de reducción sonoro mediante la técnica de intensidad acústica bajo condiciones de laboratorio en la cámara de transmisión del CCADET-UNAM en el intervalo de frecuencia de 200 Hz a 6,3 kHz, conforme a la norma internacional ISO 15186-1:2000.

## Agradecimientos

**Este trabajo fue posible gracias al financiamiento del Fondo Mixto CONACyT - Gobierno del estado de Querétaro.**

¡Muchas Gracias!



¿Alguna Pregunta?