

## **El sonido lateral y el diseño de salas**

*Francesc Daumal i Domènech, y Benoit Beckers.*

*E.T.S. Arquitectura Barcelona  
Dpto. Construccions Arquitectòniques I (U.P.C.)  
Avda. Diagonal 649  
08028 Barcelona.*

En el presente estudio, se analizan las dificultades de interpretación que conllevan los dos principales parámetros definidos para describir la “sensación espacial” en las salas de concierto (LEF y IACC) y se ilustran sus diferencias en un caso modelizado.

La respuesta de una sala a un impulso acústico contiene toda la información sobre como esta sala, por la producción de reflexiones y otros fenómenos, modifica cualquier mensaje sonoro entre dos puntos (emisor y receptor).

Cuando las reflexiones especulares constituyen lo principal de estas modificaciones, el modelo geométrico es válido y pueden utilizarse modelos informáticos, entre los cuales destacan hoy en día los programas de rayos sonoros. Según las frecuencias estudiadas, el carácter ondulatorio puede imponerse y hay que imaginar otros métodos para tener en cuenta difusión, difracciones o interferencias. Mientras tanto, la idea general permanece igual: analizar como el sonido llega en el tiempo, con sus componentes directa y reflejadas y reproducir esta medición - o cálculo - para cuantos pares emisor-receptor se juzgue útil.

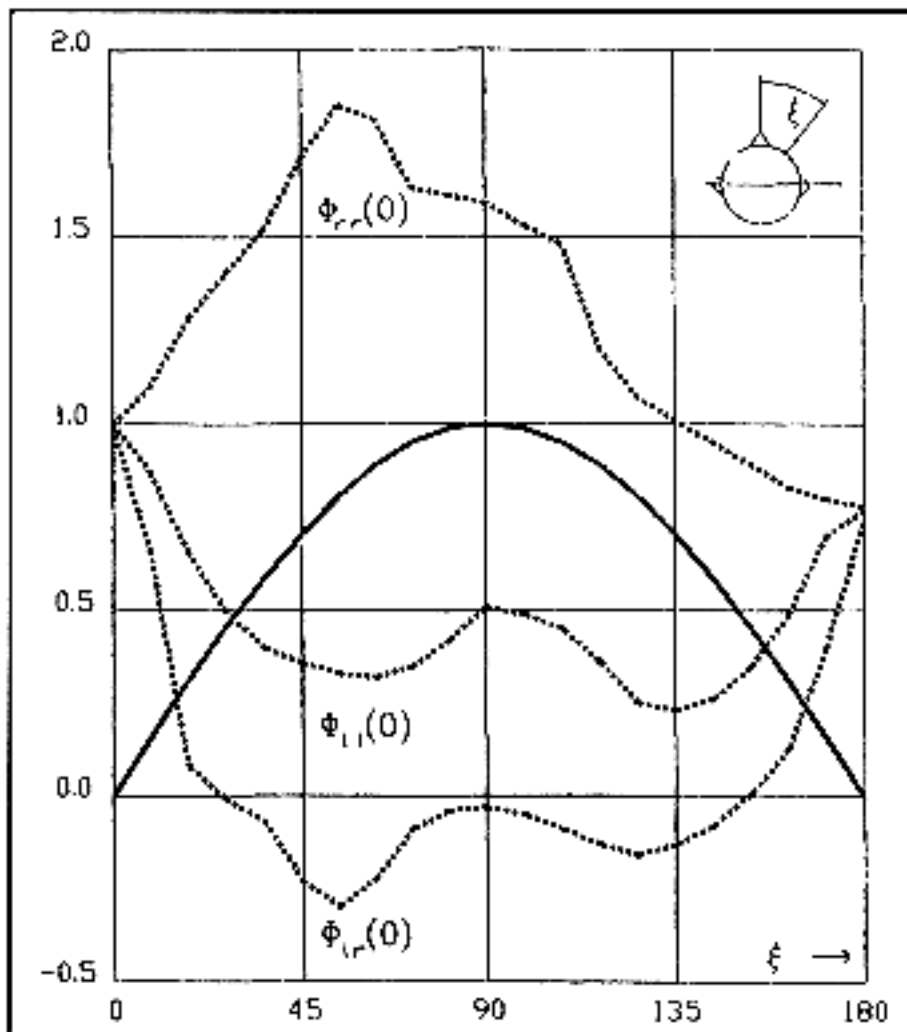
Los parámetros a la evaluación de los cuales se suelen reducir los datos obtenidos, pertenecen a tres “familias”, según la principal dimensión acústica considerada: la intensidad (nivel sonoro), el tiempo (reverberación, claridad) y la frecuencia (variación de los parámetros precedentes según las bandas de frecuencia).

La intuición que desarrollaron unos acústicos [1,2,3] es que dos salas distintas, teniendo iguales valores para todos estos parámetros, debían dar lugar a condiciones de audición muy diferentes. En efecto, quedaba hasta entonces ausente una dimensión de la audición: la espacial, que necesita el análisis de dos respuestas impulsionales correspondiendo a los dos oídos. Debido a la disposición de estos, parece preponderante la proyección horizontal del ángulo que forma cada reflexión con el sonido directo: cuanto mayor es, tanto más se diferencian las contribuciones que la reflexión da a cada una de las respuestas. Eso indica que la forma de la planta de una sala es lo que más influirá en esta dimensión.

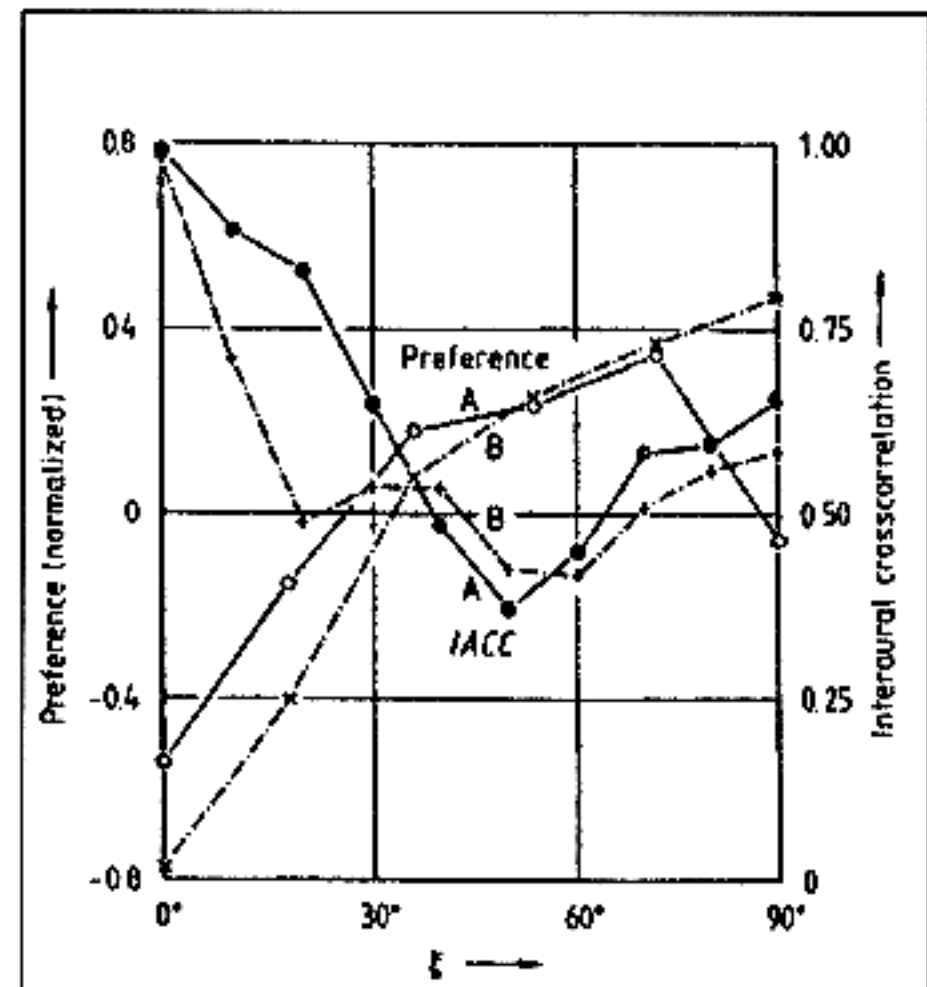
Por ejemplo, para Marshall, una planta rectangular es mejor que una planta en abanico por el hecho que las reflexiones llegan en un cono más abierto, lo cual aumenta la presencia de la sala, es decir la sensación de escuchar en un recinto. Entonces, se ha definido un primer parámetro, el LEF, para que resalte esta diferencia: es un balance entre la energía lateral (ponderada por una función cosinusoidal) y la energía total que llega en el receptor estudiado. La definición del LEF está basada en esta aserción averiguada [2]: una mayor apertura del cono formado por pares de reflexiones rodeando el sonido directo se percibe como una mayor “impresión espacial”.

La definición de IACC se basa en otra suposición [3]: una mayor incoherencia entre los dos oídos significa una mayor “difusión subjetiva”; la curva de “correlación cruzada interaural” y las de autocorrelación no presentan sus valores extremos para 90 grados porque tampoco lo hace la curva de sensibilidad direccional del oído. (fig. 1).

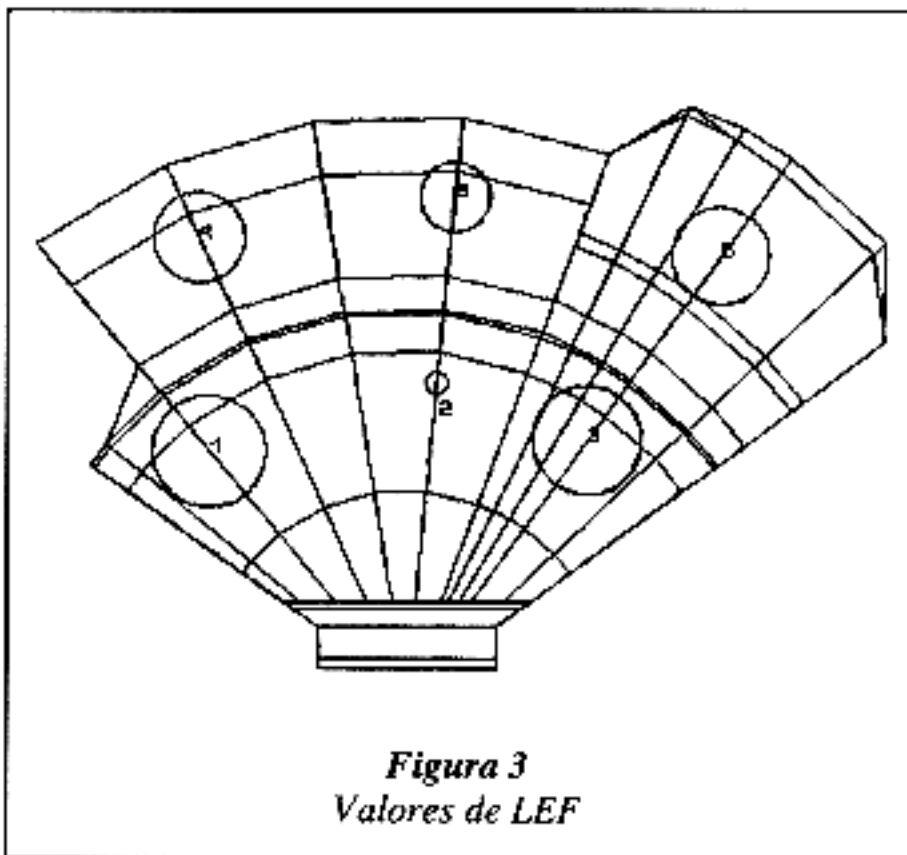
La distinción del LEF e IACC, que no están correlacionados porque no responden a la misma intuición original, parece estar en la diferencia entre sus curvas de ponderación, lo cual se evidencia cuando se imple-



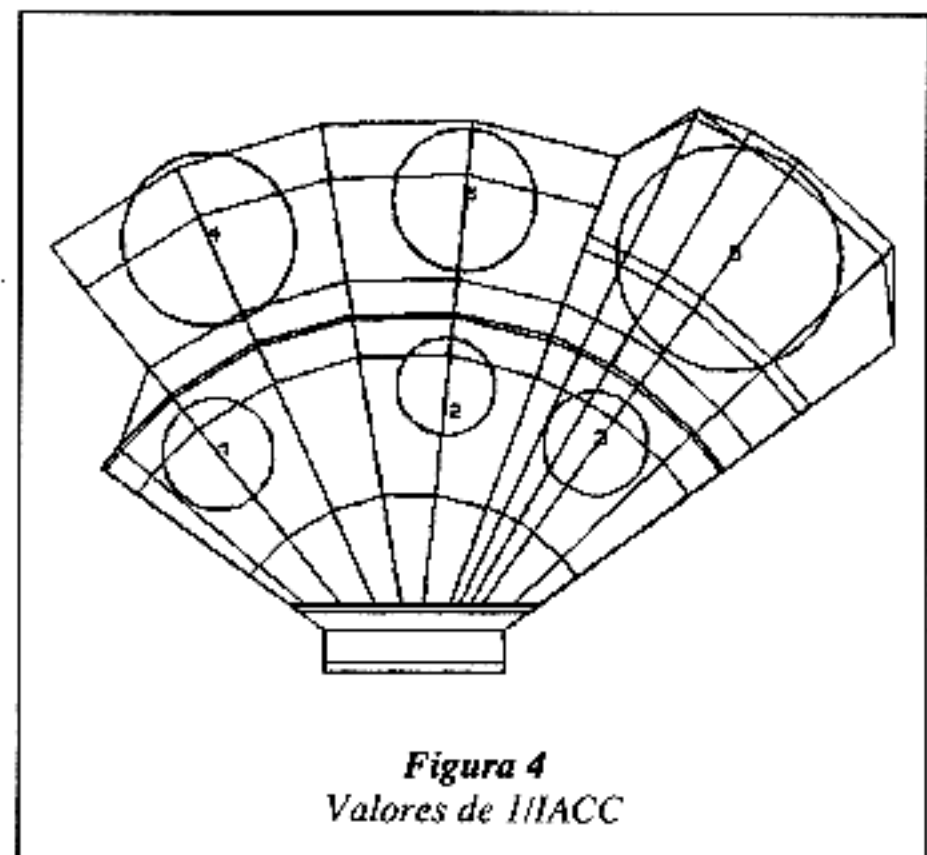
**Figura 1**  
Curvas de ponderación



**Figura 2**  
Dirección preferido de 1 reflexión y IACC correspondiente para dos motivos musicales (ando)



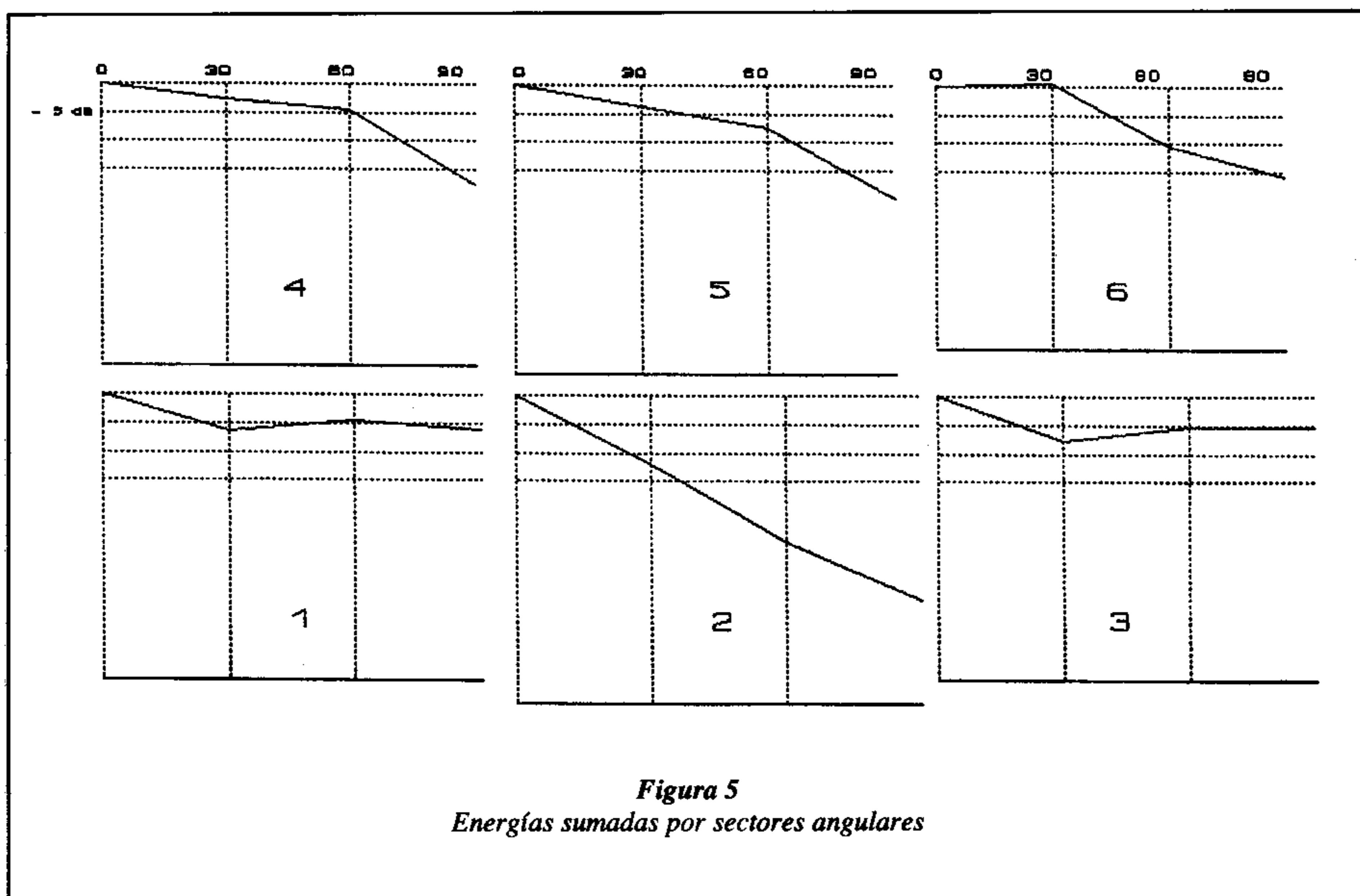
**Figura 3**  
Valores de LEF



**Figura 4**  
Valores de IACC

mentan sus respectivas evaluaciones en un programa de rayos sonoros. En este tipo de evaluación, estos parámetros son los únicos que varían cuando se intercambian las posiciones de la fuente y del receptor. Como la dirección e intensidad de las primeras reflexiones importantes predominan en la constitución del valor de ambos parámetros -que deben calcularse sin considerar las interferencias- estos métodos numéricos parecen de óptima aplicación, aunque quedan dos problemas importantes: a) la consideración del ángulo de elevación, ausente de las fórmulas originales, que constituye un gran problema en el caso del IACC, no se puede resolver sin otros tests básicos, b) habría que aclarar el sentido real, ya que varían, y muchos investigadores privilegian el IACC sin poderlo explicar.

En efecto, los tests hechos para definir este son más que discutibles (por su escasez y aparente contradicción) y, por lo menos, las siguientes constataciones se deberían aclarar: a) el propio Ando muestra en su libro (fig. 2), una buena adecuación entre el mínimo de IACC y la "dirección preferida de una reflexión lateral única" sólo en un caso, el otro -con un motivo musical más lento- presenta una mejor adecuación con la curva de ponderación cosinusoidal. Eso podría implicar una importante dependencia con el tiempo de la música interpretada, como pasa con el tiempo de reverberación. Aplicando los resultados de Barron y Marshall a estas dos curvas de preferencia, se podría pensar que, en el caso de una música de tempo rápido,



la impresión espacial preferida no es la máxima. Entonces, el desplazamiento del mínimo de IACC, dependiendo del motivo musical, sería un buen (pero insuficiente) comportamiento. Tal razón podría explicar que el IACC permita, mejor que el LEF, clasificar las cualidades acústicas de salas de concierto sinfónico.

Un resultado interesante se puede encontrar utilizando un programa de rayos sonoros (EPIDAURE) para evaluar los dos parámetros en una misma sala modelizada. Se ha escogido el KULTTUURITALO (arq. A. Aalto, Finlandia), de planta en abanico asimétrico. Como se suponía, el LEF es el parámetro que más claramente distingue la forma general: en abanico sus valores son bajos, excepto cerca de las paredes laterales (fig.3). Por otro lado, como lo muestra un análisis de las contribuciones de las diferentes reflexiones, el IACC tiene mucho más en cuenta los detalles de esta sala, como las reflexiones poco laterales producidas por la prolongación de las paredes laterales sobre el escenario (fig.4). Así, entre dos salas en abanico, el IACC, más atento a las pequeñas diferencias (mientras la forma general de la planta ya determina casi totalmente los valores de LEF), será más discriminante.

En resumen, ya está claro que una discusión basada en el aspecto "psico-fisiológico" de la audición sólo se puede realizar mediante tests, y que, en este campo, los tests faltan para lograr una conclusión definitiva. (No se hizo gran progreso con respecto a las intuiciones originales).

Pero hay otra forma de pensar el problema, posiblemente más interesante. Lo importante no es tanto que un parámetro represente un aspecto de la percepción (con una idea de optimización además muy discutible, ya que, según la cultura musical de la persona interrogada, su opinión diferirá), sino que sea discriminante en cuanto a las variaciones arquitectónicas de una sala, permitiendo calificar globalmente las diferentes posibilidades constructivas. Por eso, más que un parámetro, podría ser útil una representación gráfica simplificada hacia un estado anterior al que opone los dos parámetros discutidos, es decir sin ponderación fisiológica.

Por ejemplo, los gráficos propuestos (fig. 5), explican la diferencia de comportamiento entre LEF y IACC: cuando su curvatura es positiva, LEF tiene valores superiores a  $1/IACC$ , y vice-versa. La forma de estos gráficos se explica claramente (se relacionan visualmente con la dirección de llegada de las principales reflexiones) y, probablemente, se relaciona de una manera discriminante con la forma de la planta de la sala. Analizando varios modelos simples (planta rectangular, abanico, etc), se pueden discutir las diferencias de reparto espacial de la energía de un modo más útil para el diseño, por su facilidad de lectura.

En conclusión, la componente espacial de la distribución de las primeras reflexiones parece ser la que faltaba para dirigir el diseño de una sala en todos sus aspectos; y el camino que se propone aquí debería permitir un mejor aprovechamiento de los métodos numéricos actuales.

## REFERENCIAS

1. "Early lateral reflections in some modern concert halls", L. Cremer, J. Acoust. Soc. Am. 85 (3), March 1989.
2. "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure", M. Barron and A. H. Marshall, Journal of Sound and Vibration 77(2), 1981.
3. "Concert Hall Acoustics", Y. Ando, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1985.