

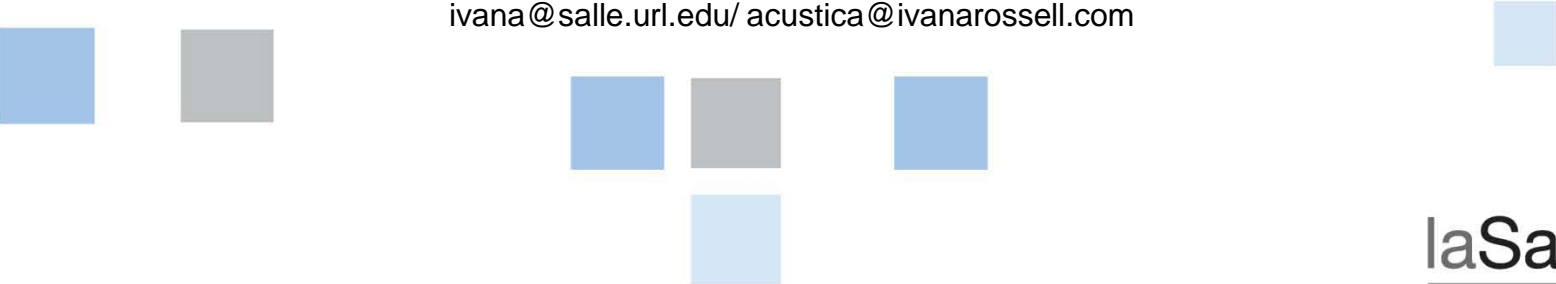


# 4.1

## TEORÍA GEOMÉTRICA

**Ivana Rossell Turull con la colaboración de Manuel Sobreira**

Directora del Máster de Acústica Arquitectónica y Medioambiental  
Gerente de Ivana Rossell - Acústica  
[ivana@salle.url.edu](mailto:ivana@salle.url.edu) / [acustica@ivanarossell.com](mailto:acustica@ivanarossell.com)



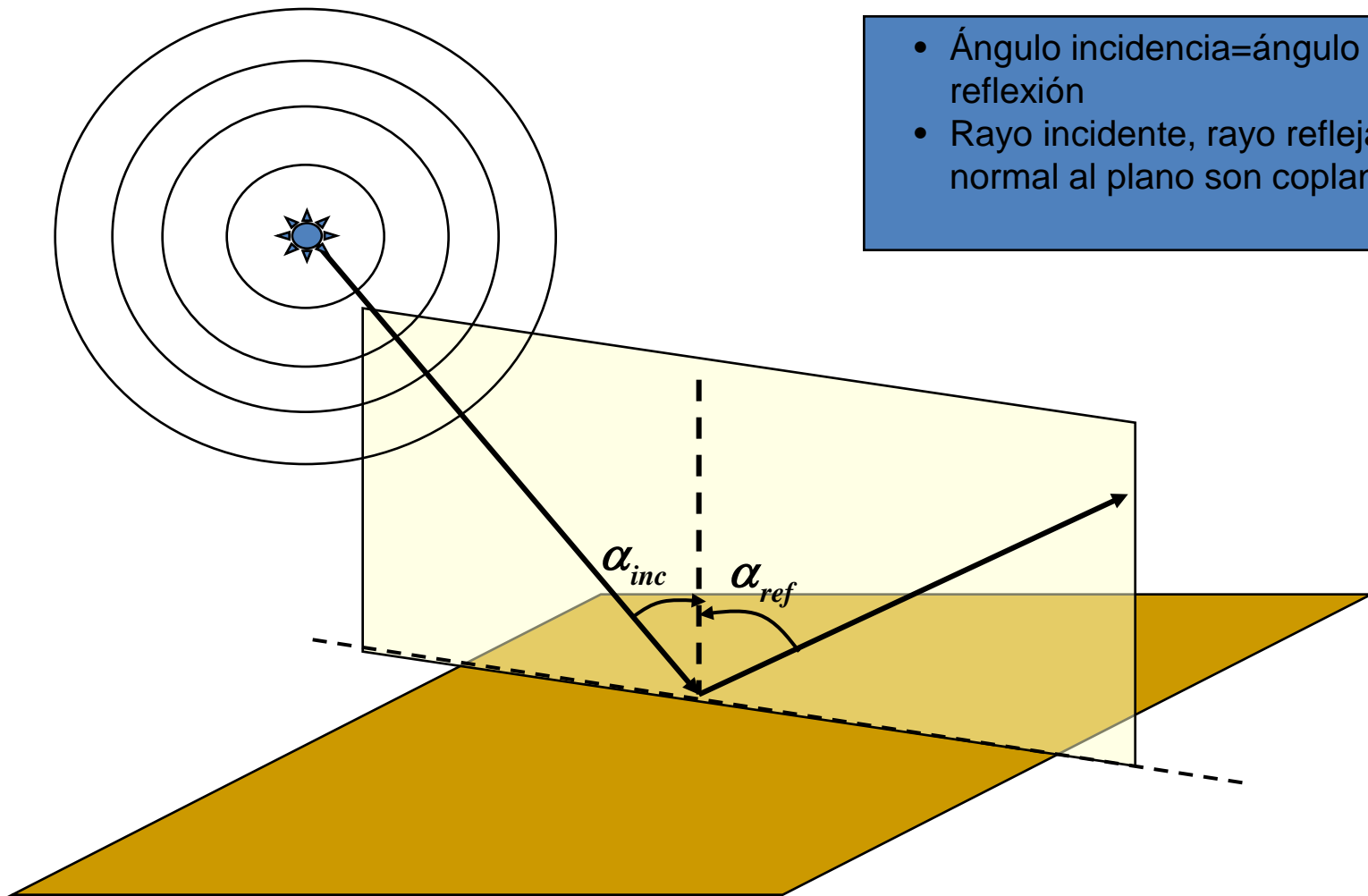
# Teoría Geométrica

La Teoría Geométrica da importancia a la trayectoria del sonido **considerándolo como una serie de rayos** (sin entidad física, debido a que son tratados como líneas que se dibujan perpendiculares al frente de onda) que se propagan por el interior del recinto en línea recta y en todas direcciones.

La Teoría Geométrica la utilizaremos para determinar puntos acústicamente conflictivos, como por ejemplo las focalizaciones del sonido producidas por una vuelta arquitectónica o una superficie cóncava. Esta Teoría también es útil para calcular los retrasos relativos entre la señal directa y las reflexiones y analizar el efecto de ecos o reflexiones problemáticas. Otra aplicación de esta Teoría es el cálculo del nivel de presión acústica que llega al receptor situado en un punto concreto del interior del recinto así como el resto de parámetros acústicos de un espacio.

Los métodos utilizados verifican la **Ley de la Reflexión de la Óptica Geométrica** que se enuncia de la siguiente manera: “Los rayos sonoros incidentes y reflejados permanecen en el mismo plano, donde el ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales.”

# Teoría Geométrica



- Ángulo incidencia=ángulo reflexión
- Rayo incidente, rayo reflejado y normal al plano son coplanarios



# Teoría Geométrica

Evidentemente esta premisa no siempre se cumplirá. **Existen dos restricciones, para poder asegurar que la reflexión sea totalmente especular:**

1-Dimensiones de las superficies  $\gg \lambda$

2-Rugosidades de las superficies  $\ll \lambda$

1- Las longitudes de onda del sonido deben ser pequeñas comparadas con las dimensiones del recinto y de obstáculos que puedan encontrarse. Si no se cumple esta condición, la onda sonora rodearía la superficie y seguiría propagándose como si el obstáculo no existiera. Este fenómeno se conoce como **difracción**.

2-Las rugosidades o relieves de las superficies tienen que ser inferiores a la longitud de onda que incide. Si estas irregularidades fueran de dimensiones comparables a la longitud de onda, la reflexión se produciría en múltiples direcciones, provocando lo que se conoce como [difusión acústica](#).

Para la aplicación de la Teoría Geométrica y la determinación de las trayectorias de los rayos existen principalmente dos métodos diferentes: **El método de las imágenes y el método de rayos**. Ambos requieren una elevada potencia de cálculo, y por esta razón se usan en herramientas informáticas.

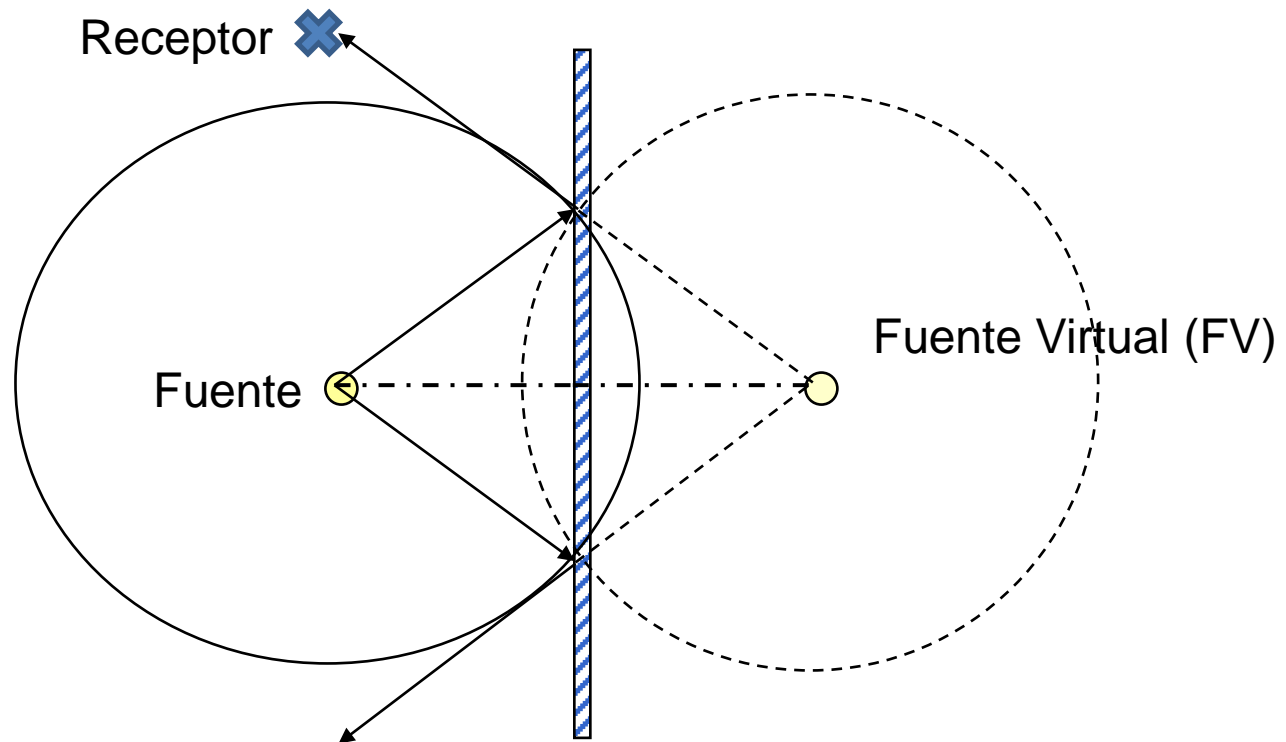
## 1.Método de las imágenes (Image Source Method (ISM)):

Debido a la aproximación de la acústica a la óptica geométrica, podemos suponer que una fuente sonora puntual colocada delante de una superficie de reflexión, producirá una fuente imagen situada sobre la línea normal de la superficie considerada, situada simétricamente respecto el punto de intersección de la perpendicular con la pared y a la misma distancia de la pared considerada que la fuente original. El rayo que produciría esta fuente imagen hacia el receptor será la reflexión de la superficie en cuestión. El rayo irá de la fuente original hacia la pared y la reflexión será desde la pared hasta el receptor, siguiendo la línea que une la fuente imagen con el receptor.

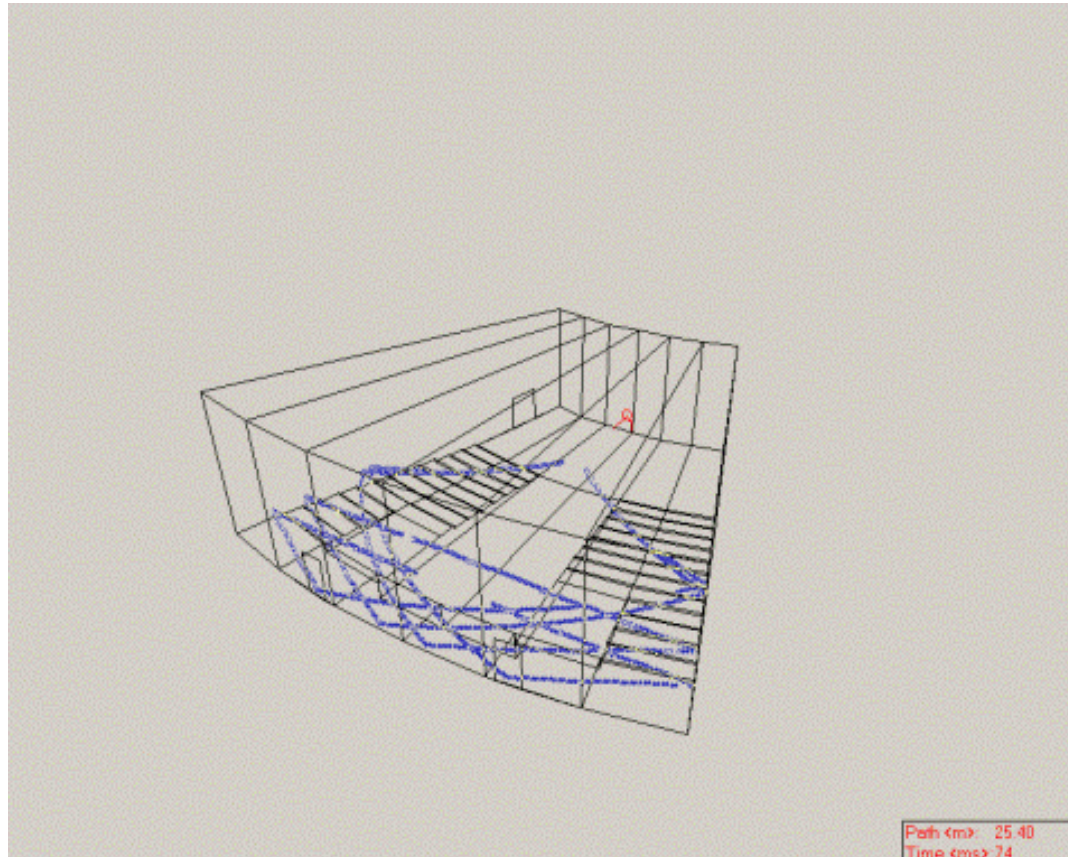
De la misma forma podremos encontrar las reflexiones de segunda generación (han sufrido dos reflexiones) buscando las fuentes imagen de las primeras fuentes imagen. Este método es iterativo y podemos llegar hasta la precisión deseada.

## Método de las imágenes:

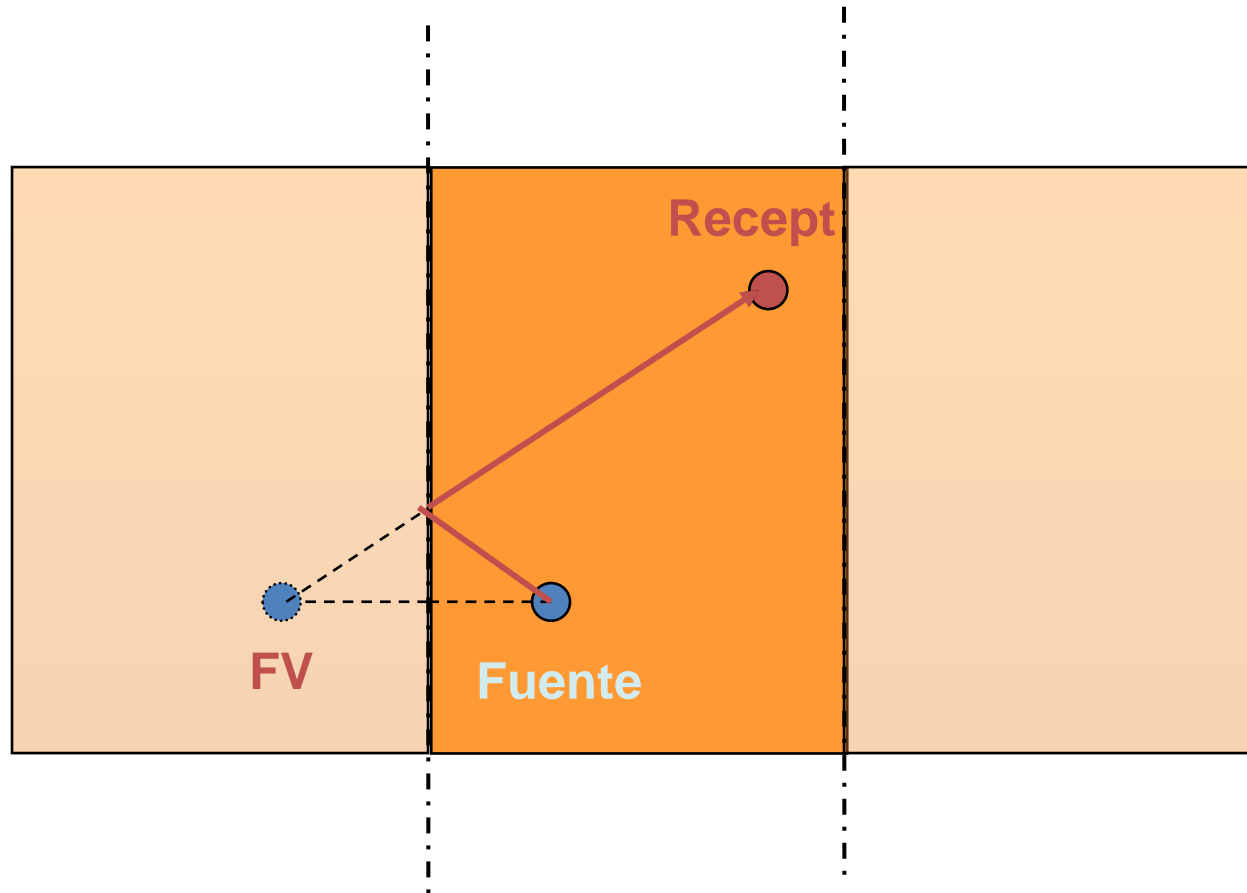
A partir del trazado de rayos desde las fuentes virtuales, podríamos reconstruir el frente de onda para cualquier instante de tiempo. Partiendo de una posición de fuente y una posición de receptor. Se dibuja la fuente virtual con la pared como plano de simetría y se une la fuente virtual con receptor. De esta forma se encuentra el punto de reflexión de la trayectoria fuente-pared-receptor.



Podemos por tanto estudiar la propagación de los frentes de onda en una sala en los instantes iniciales después de la emisión de la fuente sonora.

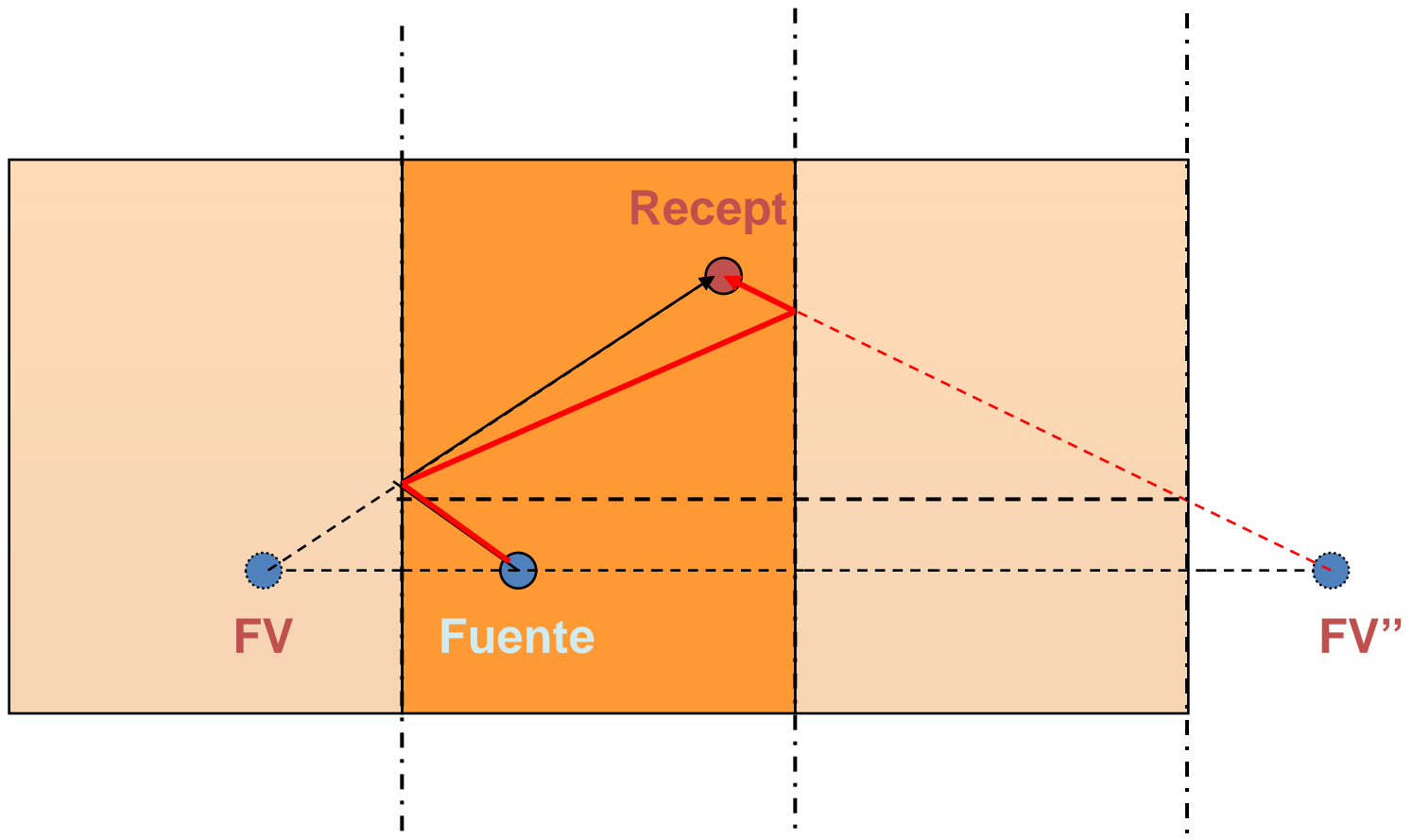


Ejemplo de utilización del método de la imagen virtual  
para reflexiones de primer orden:

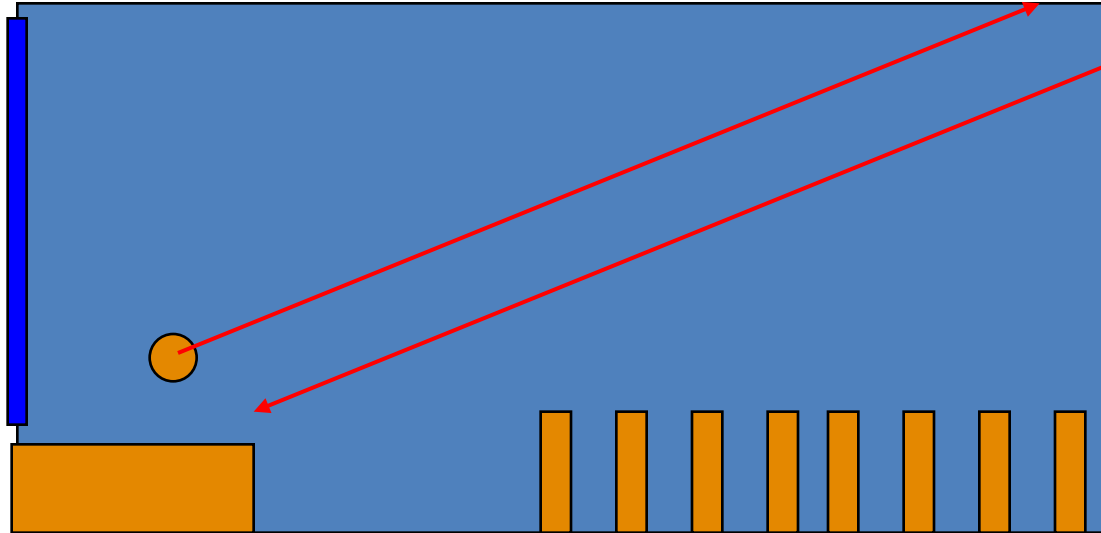




## Ejemplo de utilización del método de la FV para Reflexiones de Segundo Orden



## Aplicación a la reflexión en ángulos rectos:



Esta figura esquematiza la posibilidad de la existencia de un Eco sobre la fuente sonora cuando existe un ángulo recto opuesto a ella.

**Solución:** Tratamiento con absorbentes, o inclinación o difusión. (Normalmente en aulas, techo absorbente – Obligatorio con el nuevo CTE – DB HR).

## 2.Método de rayos (Ray Tracing Method (RTM)):

Este método parte del diagrama de reflexiones basándose en la proyección unidireccional del rayo acústico.

Clasificación de los rayos:

**Axiales** (se propagan paralelamente a los ejes que definen la sala)

**Tangenciales** (paralelos a los planos)

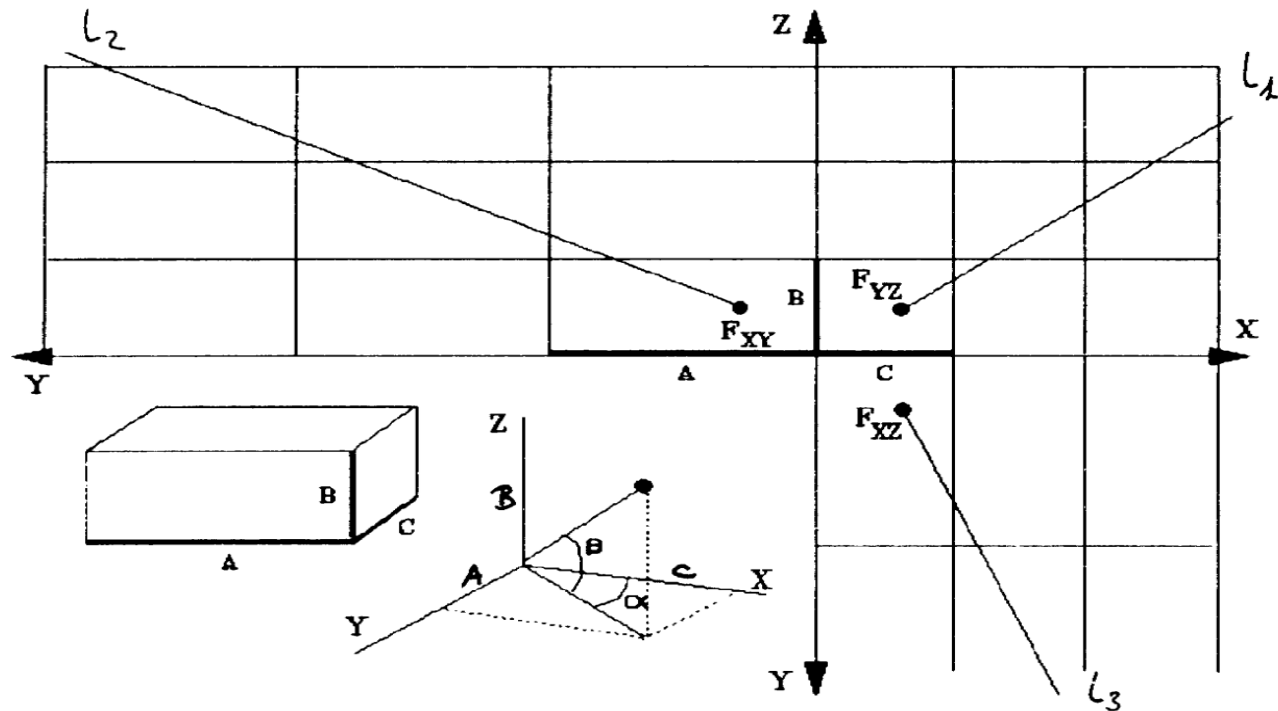
**Oblicuos** (cualquier dirección no paralela a ningún eje ni plano).

El método de rayos parte de una red cuadriculada, con las dimensiones del recinto (X,Y y Z) donde se proyecta el rayo a analizar para cada uno de los tres planos XY, XZ y YZ.

También se representará la proyección de las coordenadas de la fuente, como tres fuentes imagen que llamaremos FXY, FXZ i FYZ. Así se calcula la trayectoria y la distancia recorrida por cualquier rayo. Este procedimiento deberá repetirse para cada uno de los rayos a analizar.

## Método de trazado de rayos:

Se determinan miles de rayos y trayectorias y después se verifica las que llegan a un área receptora (no un punto).



Proyección de una trayectoria cualquiera sobre los tres ejes (X, Y i Z)

## Cálculo del Nivel de presión sonora en un punto:

Para el cálculo del nivel de presión sonora que llega a un receptor determinado, estos métodos calculan la energía del rayo directo y van sumando la contribución de cada reflexión con la energía correspondiente.

Para los rayos reflejados se calcula la pérdida de energía en cada reflexión (según el coeficiente de absorción de la superficie en la que incide la onda) y la atenuación por distancia. La suma de todas las contribuciones puede hacerse teniendo en cuenta el desfase de cada rayo por distancia referenciado al rayo directo. Por lo tanto son suma de fasores:

$$p_T = \sum p_i \cdot e^{jk(r-r_i)} + p_d$$

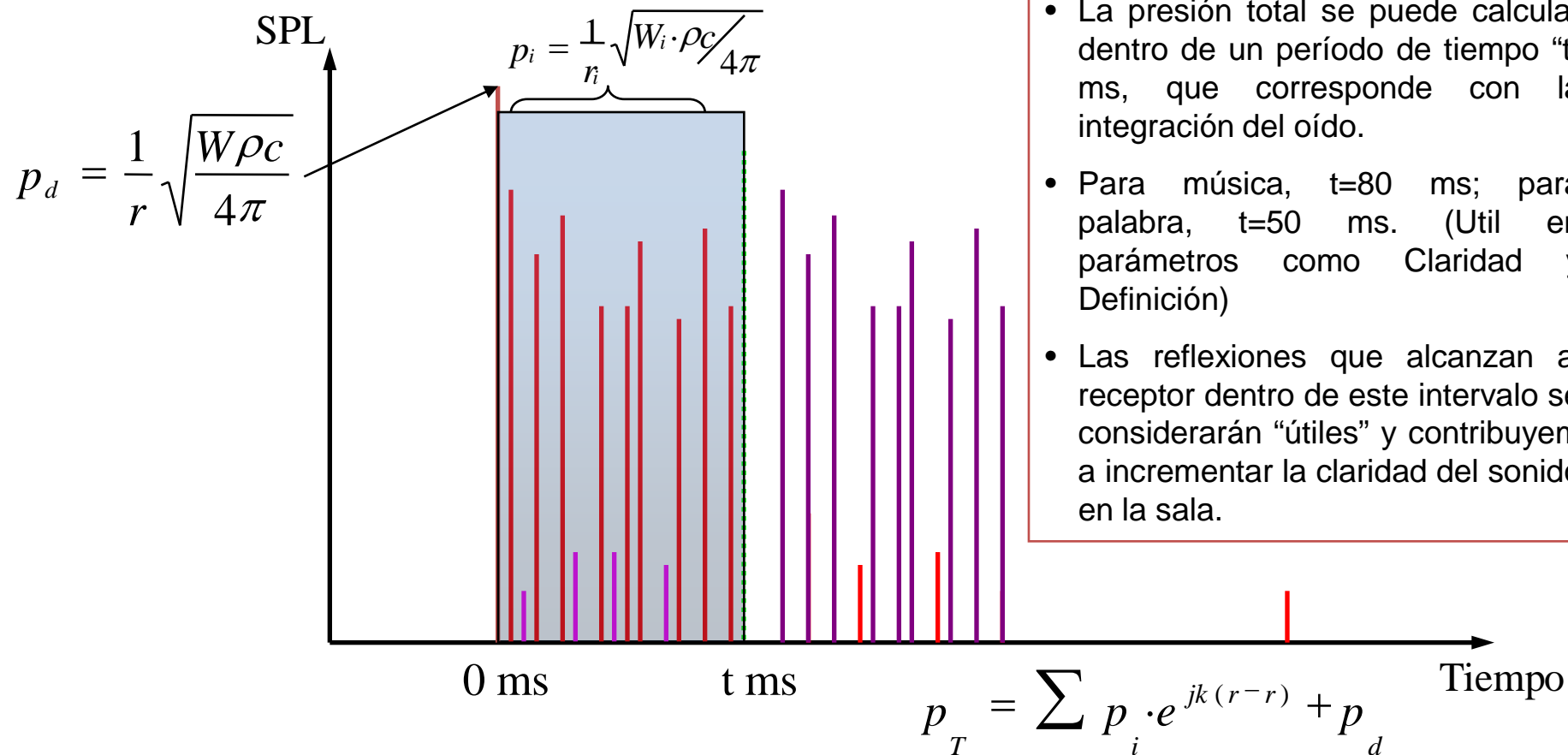
$$p_i = \frac{1}{r_i} \sqrt{\frac{W_i \cdot \rho c}{4\pi}} \quad p_d = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{W \rho c}{4\pi}}$$

$$W_i = W \prod (1 - \alpha_i)$$

$$dB_{SPL} = 20 \log \frac{p_T}{p_0} = 20 \log \frac{\sum p_i e^{jk(r_i-r)} + p_d}{p_0}$$

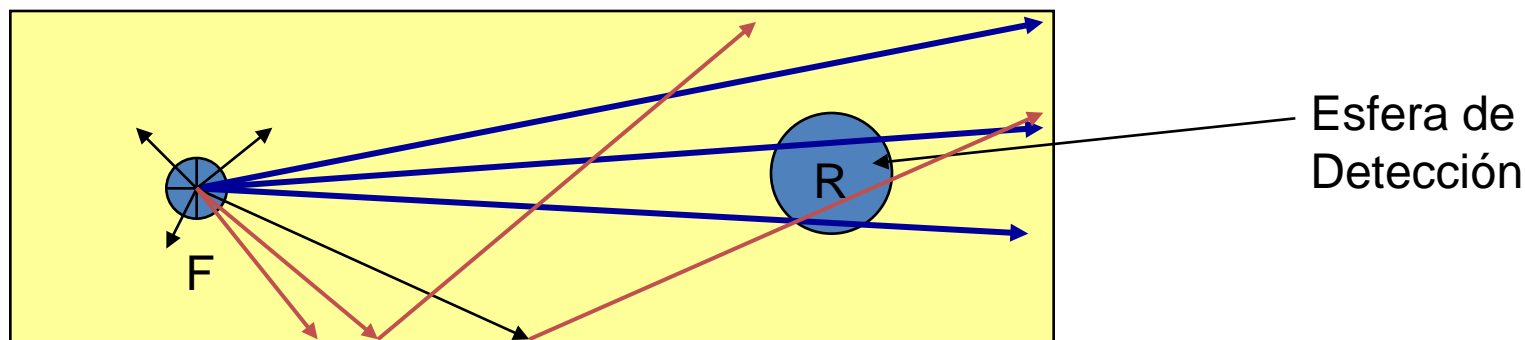
$p_i$ : es la presión correspondiente a cada rayo después de sufrir la reflexión (i). La energía que tiene es resultado del producto de la energía antes de la reflexión por el coeficiente de reflexión.

$r_i$ : trayectoria de cada rayo (i)  
Sabido que:  $I = p^2 / \rho c$  ;  $I = W / 4 \cdot \pi \cdot r^2$



Algunos comentarios sobre el método de trazado de rayos por fuerza bruta:

- Es un método mucho más rápido que la IV y con menos requerimientos de memoria.
- Se discretiza la emisión de la fuente en  $N$  rayos: para un receptor puntual, la probabilidad de detección de un rayo es muy pequeña.
- Solución: definir una “esfera de detección”.
- Problema: el número de rayos detectados por la esfera de detección depende del tamaño definido y de la distancia a la fuente. Sobreestimación de la energía en distancias próximas a la fuente y subestimación de la energía en distancias elevadas.
- Esta característica obliga a la utilización de métodos híbridos, tratando de combinar la precisión de la FV con la velocidad del trazado de rayos.



## TEORÍAS HÍBRIDAS

**CMB:** Conical Beam Method

**TBM:** Triangular Beam Method

Combinan métodos de rayos y de fuentes imágenes.

No trazan rayos si no haces de forma cónica y triangular.

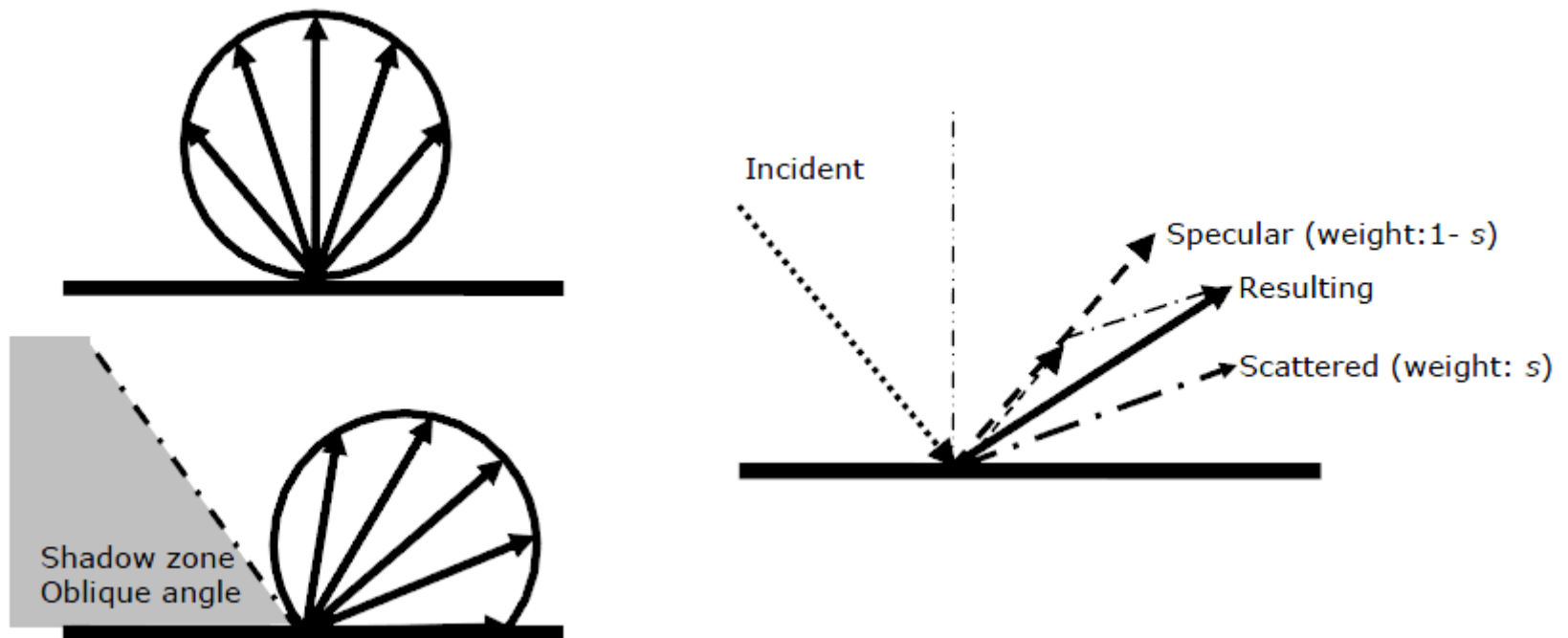
Cuando la sección del haz, que va ampliándose a medida que recorre distancia en la sala, atraviesa el punto de recepción, se contabiliza la energía por distancia (divergencia esférica), y por absorción en las reflexiones en las paredes.

Los simuladores informáticos combinan métodos híbridos, método de las imágenes y teoría estadística, sobre todo para los cálculos de la última energía (cola difusa de reverberación) (*tail correction*).



## DIFUSIÓN Y DIFRACCIÓN

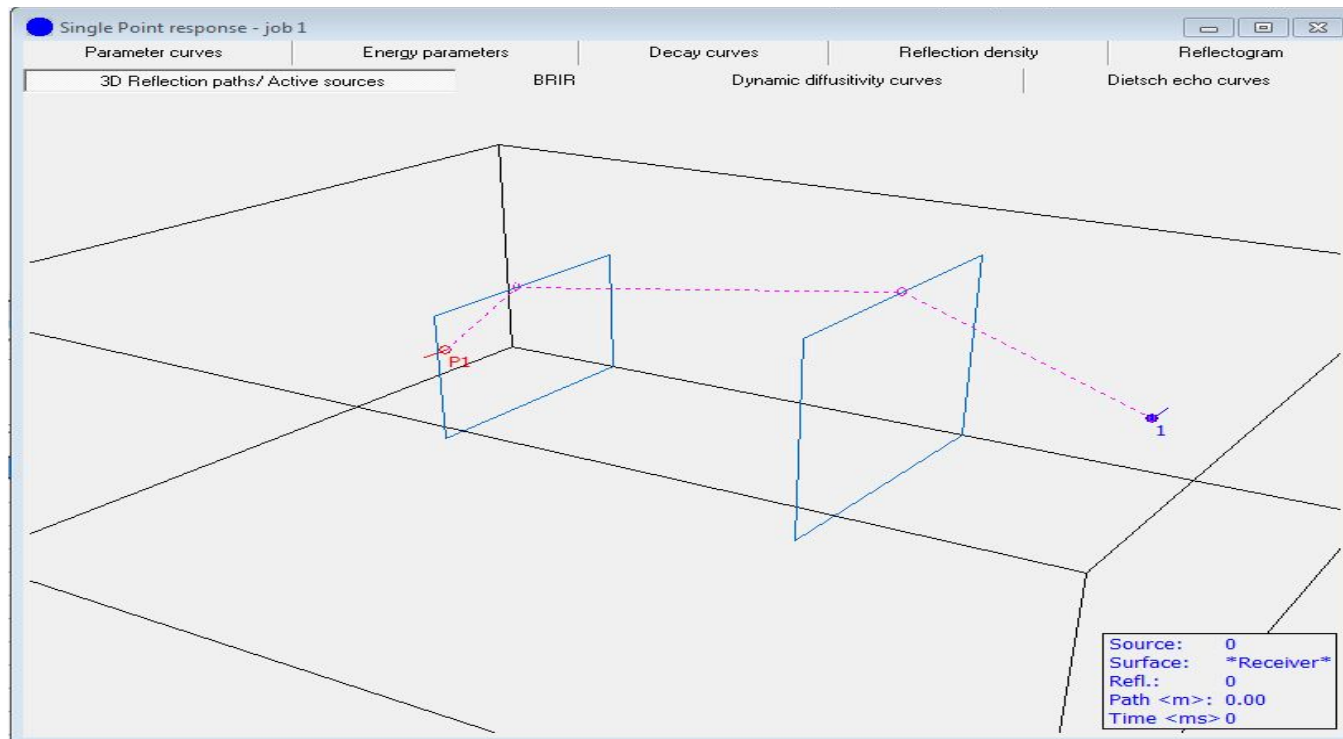
Las versiones actuales de algunos simuladores introducen algoritmos sobre la teoría geométrica para intentar simular los efectos ondulatorios de la difracción y difusión (scattering), pero el estado del arte aún no está consolidado.



Ejemplo de calculo de difusión (Lambert) para un material con 50% de scattering

# DIFUSIÓN Y DIFRACCIÓN

Ejemplo de calculo de camino de difracción para el sonido directo:



## FORMAS TÍPICAS DE SALAS DE CONCIERTOS

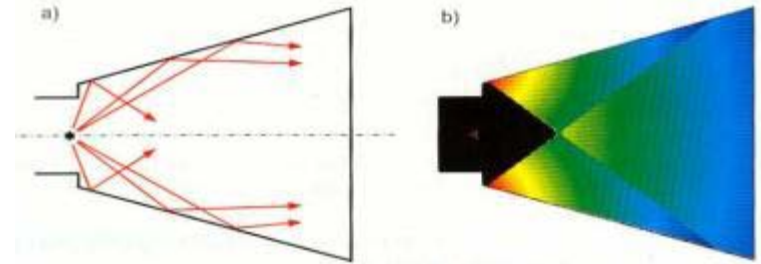
La reflexión especular ayuda a estudiar las inclinaciones adecuadas pudiendo hallar formas encaminadas a generar primeras reflexiones.

Vista en planta:

### a) Sala en forma de abanico

Ausencia primeras reflexiones laterales

Buena capacidad espectadores

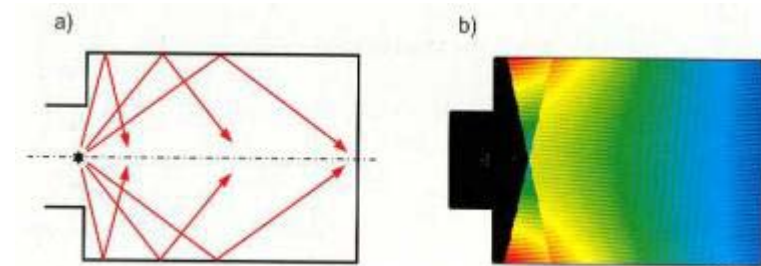


### b) Sala de planta rectangular

Es la forma más afortunada. Funciona muy bien.

Mejor EL (Eficiencia lateral)

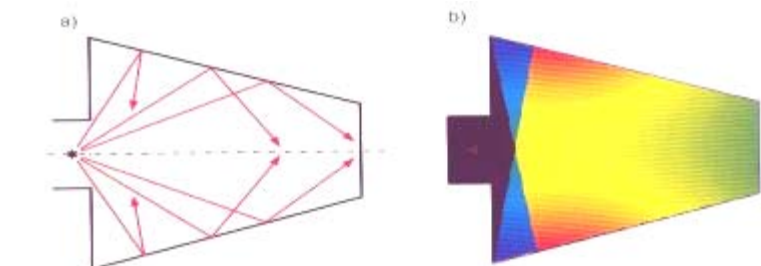
Sonoridad e impresión espacial buena



### c) Sala en forma de abanico invertido

Gran cantidad primeras reflexiones

Problema lateral 1ª filas

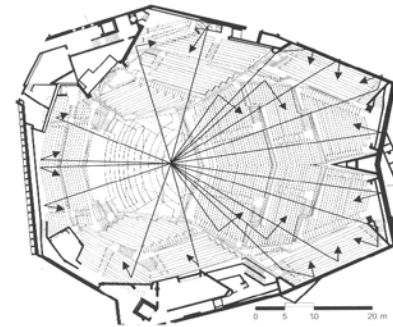


d) Sala central, con terrazas trapezoidales

Difícil diseño para EL

Buena impresión espacial

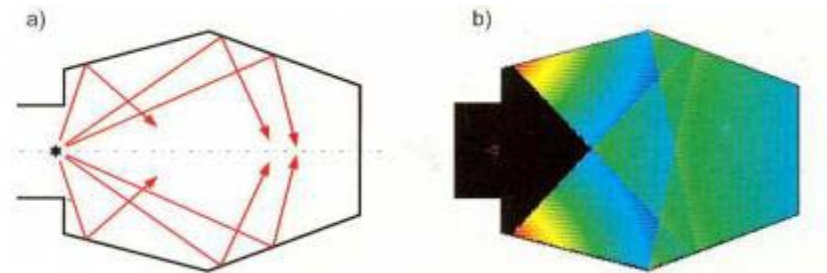
Gran aforo



e) Salas en forma de hexágono alargado

Mezcla: Abanico e abanico invertido

Salas Polivalentes



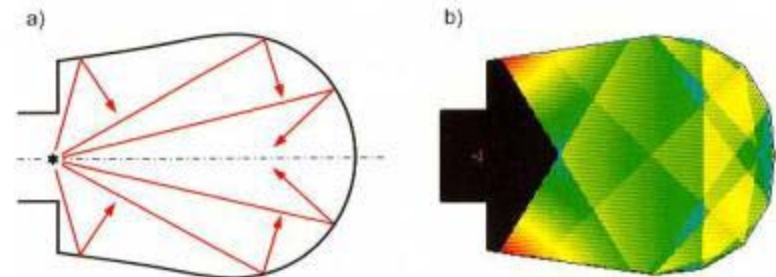
f) Salas en forma de herradura

Baja EL

Focalizaciones: concavidades

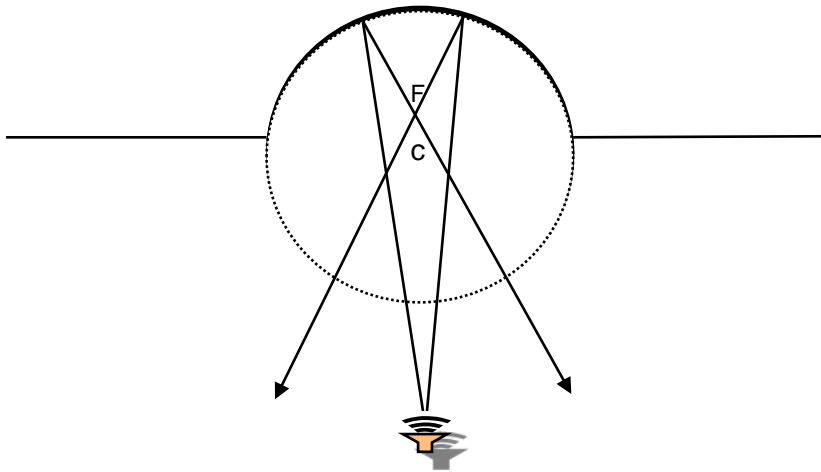
(pueden minimizarse)

Teatros y teatros ópera



## Superficies curvas

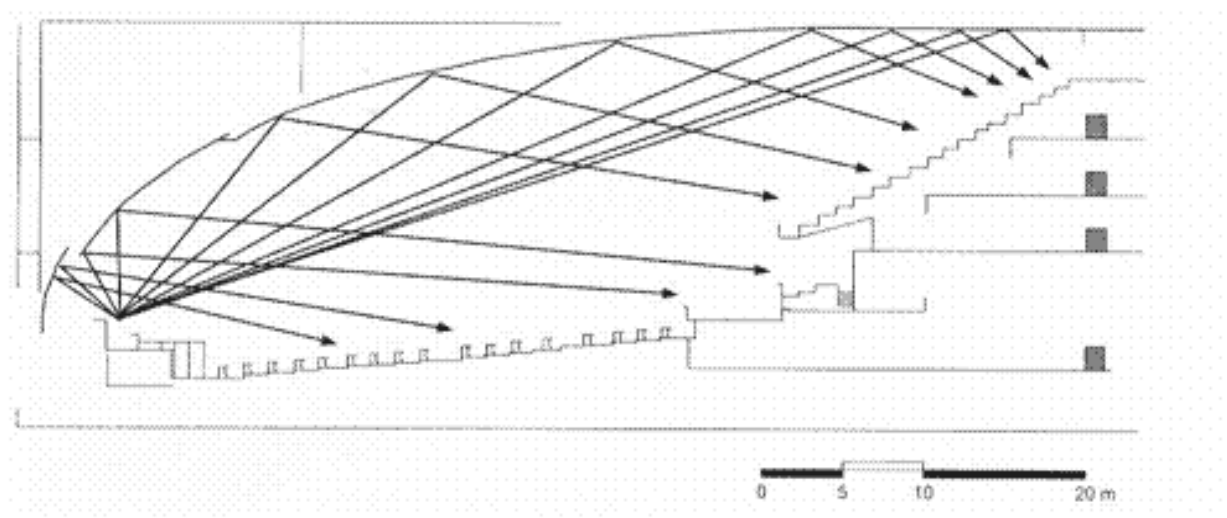
Concavidades:



Si fuente y receptor están fuera del círculo extendido de la superficie cóncava, la situación está “salvada”.

$C$  es el centro de la circunferencia y  $F$  el punto de focalización.

Superficies con curvaturas adecuadas para direccionar la energía adecuadamente (techo euipotencial):



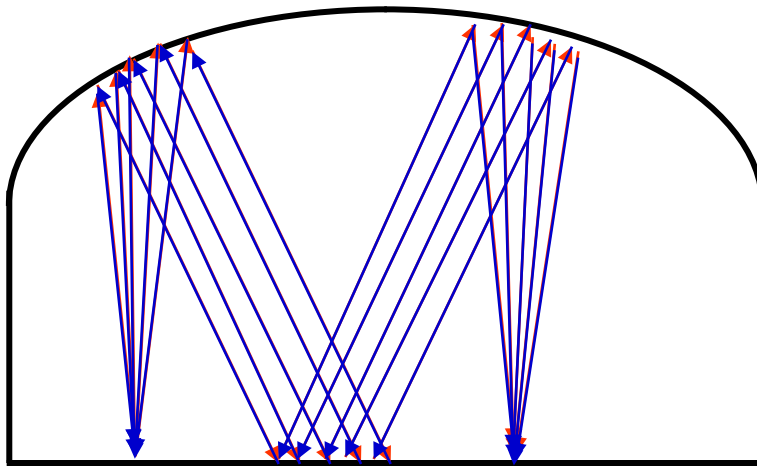
Corresponde con el método Lyon, utilizado en la sala Pleyel de París.

### Problemas:

- Mala cobertura del escenario (mala comunicación/escucha entre músicos)
- Escenario ruidoso: efecto de focalización de los ruidos generados por la audiencia. Siempre existe alguna posición para alguna posible fuente sonora en la sala en la que no se cumplirá el comportamiento esperado del techo y se producirán focalizaciones y/o ecos de aleteo).

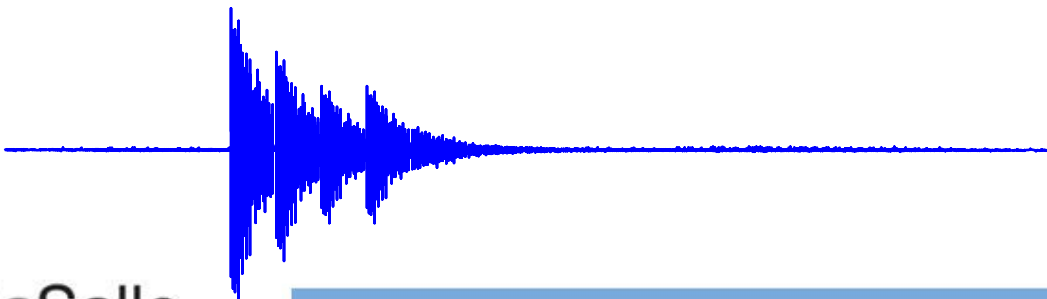
## Ejemplo de generación de ecos de aleteo (eco flotante o flutter echo) por una superficie cóncava:

Si el retardo entre llegadas consecutivas es inferior a 50 ms, se percibe como una vibración o cierta coloración metálica en el sonido de la sala.



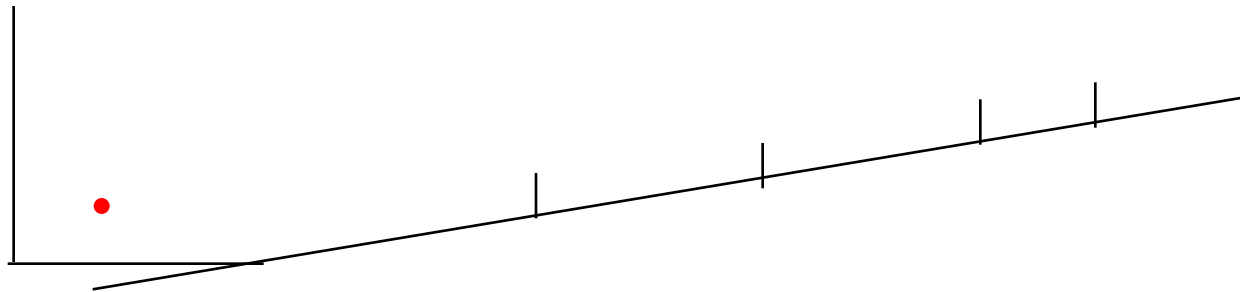
### NOTA:

*Estos efectos explican el comportamiento de algunas salas con acústicas especiales, denominadas “galerías de los susurros”, donde un susurro generado en un extremo de la sala se escucha nítidamente en algún punto en concreto de la sala, alejado del lugar donde se generó.*



## Ejemplo de Diseño de techo Equipotencial:

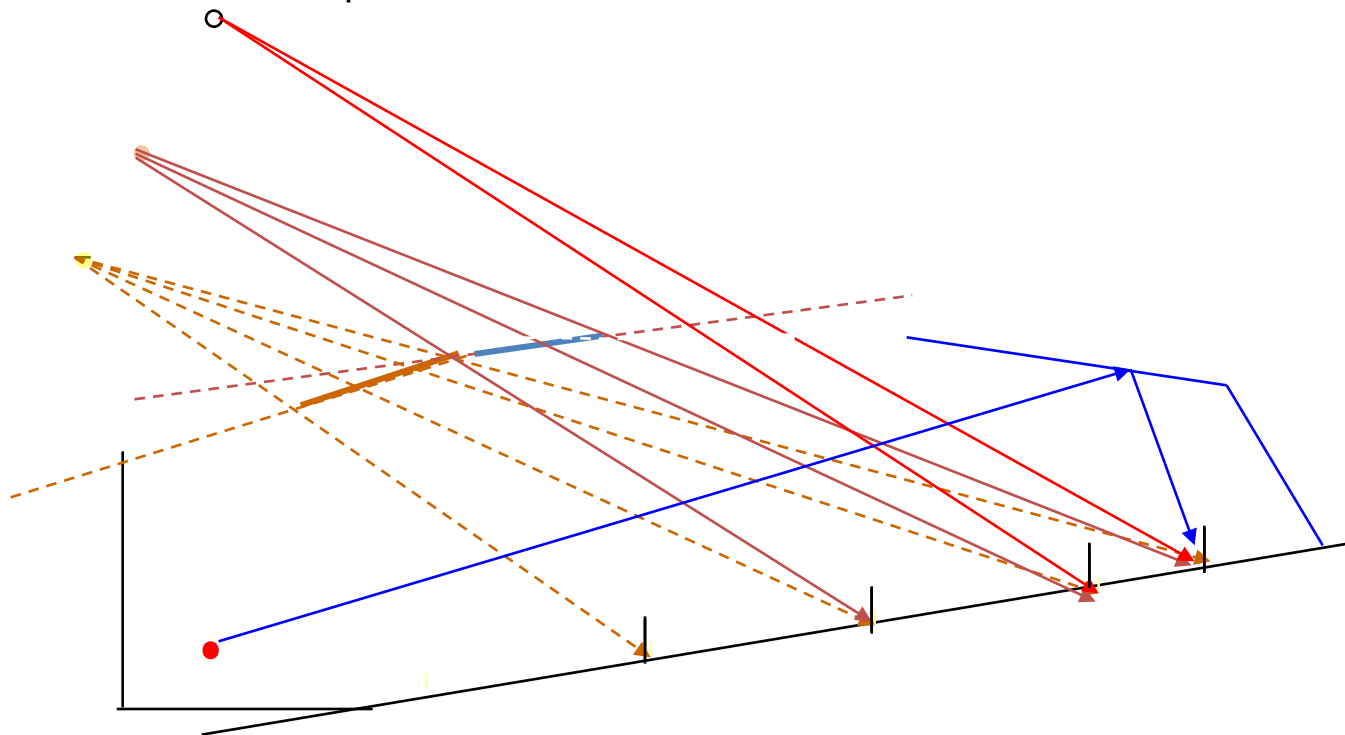
- Dividimos la audiencia en secciones, de tal forma que asignamos secciones de techo que dedicaremos a dar cobertura a esa zona.





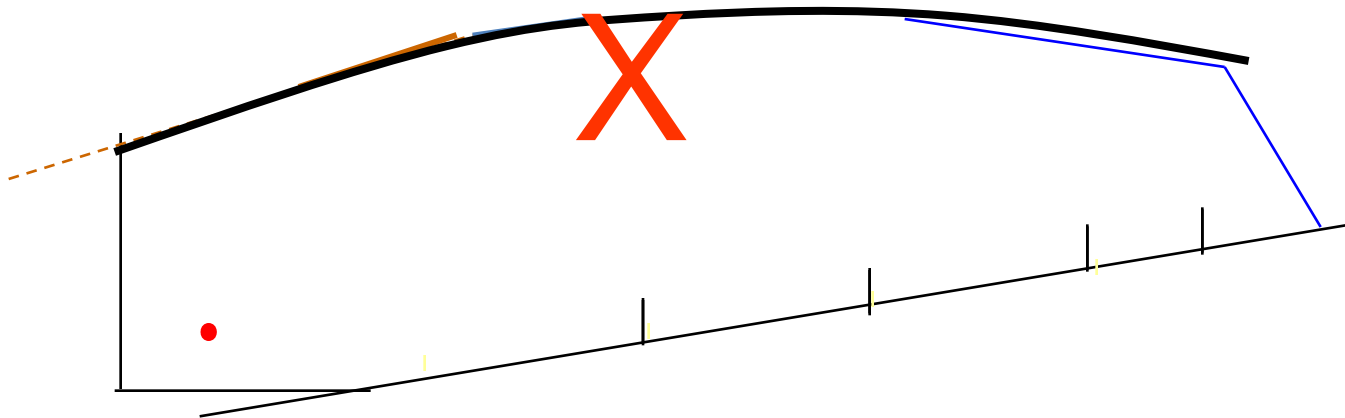
## Ejemplo de Diseño de techo Equipotencial:

- Procedemos a diseñar planos en el techo, de tal forma que a las zonas más alejadas lleguen más reflexiones que a las zonas delanteras.



## Ejemplo de Diseño de techo Equipotencial:

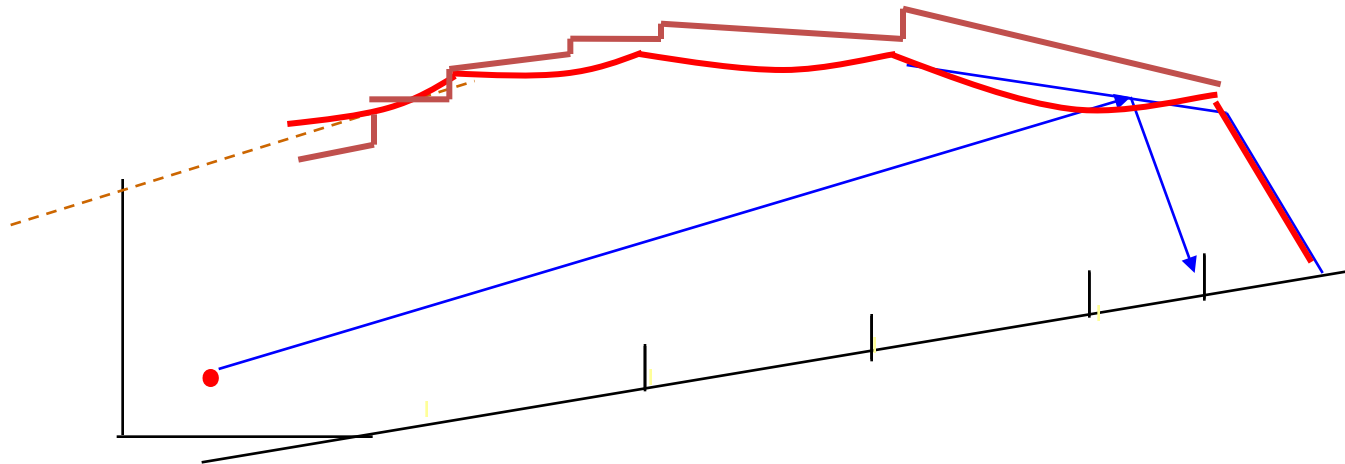
- El resultado óptimo presenta una envolvente curva, y una sala que disminuye en altura a medida que nos acercamos a las últimas filas (mejora de la sonoridad y claridad en estas).
- **¡Ojo!**: Este diseño partió del escenario, pero la curva para otras posiciones puede dar lugar (y seguramente dará) lugar a problemas.



### Ejemplo de Diseño de techo Equipotencial:

- Mejor: Soluciones que busque cierta difusión de las reflexiones procedentes del techo:
  - Formas convexas
  - Formas quebradas
  - Combinaciones de ambas.

Cuidado: La difusión del techo no debe ser excesiva



Ejemplo secciones de techo convexas: Sala de Cámara del auditorio nacional de Madrid



Ejemplo secciones de techo quebradas : Sala de Sinfónica de la Ópera de Sidney





## Ejemplo de techo difusor (moderado): Auditorio de Barcelona







## Ejemplo de Sala “surround”: Philharmonie de Berlin





# El Gran Teatre Liceu de Barcelona:







# El Gran Teatre Liceu de Barcelona:

