

## Algunas simulaciones en la acústica de recintos

RICARDO RUIZ BOULLOSA

*Centro de Instrumentos, Sección de Acústica*

*Universidad Nacional Autónoma de México*

*Apartado postal 70-186, 04510, Coyoacán, México, D.F., México*

Recibido el 28 de febrero de 1994; aceptado el 9 de junio de 1994

**RESUMEN.** La disponibilidad creciente de poderosos paquetes matemáticos para computadoras personales ha facilitado la simulación y demostración de complejos problemas en todas las ramas de la física. Se presenta un ejemplo, relacionado con la acústica, en que se usan rayos para simular la reflexión del sonido en las paredes de un recinto. Se calcula la trayectoria libre media, la frecuencia de colisión y los tiempos de reverberación para una absorción dada de las paredes y se comparan con la teoría. Para esto se utiliza un código de computadora en Matlab<sup>TM</sup> que genera una posición aleatoria y de la cual surge un rayo con dirección también aleatoria en tres dimensiones. Las reflexiones subsecuentes son seguidas hasta un número dado de reflexiones. Se grafican las trayectorias de cada rayo proyectadas en un plano.

**ABSTRACT.** The wide availability of powerful mathematical packages for personal computers has simplified the simulation and demonstration of complex physical problems. An example of such problems, in relation to acoustics, is presented in which use is made of acoustic rays to simulate the reflection of sound from the walls in a room. The mean free path and reverberation times, when different wall absorptions are given, are calculated and compared with current theory. To this aim a relatively simple computer code written in Matlab<sup>TM</sup> is given which generates a random point in a given rectangular room from which a random ray issues. The subsequent reflections at the walls are followed up to a prescribed number of collisions. The path of each ray projected in two dimensions is plotted.

PACS: 43.55.10

### 1. INTRODUCCIÓN

Modelos a escala para el estudio de la acústica de recintos han sido utilizados por muchos autores [1,2], básicamente para estudiar la distribución del sonido en un espacio cerrado. El advenimiento de las computadoras en este campo, como en muchos otros, ha favorecido un gran adelanto, ya que ha permitido nuevas formas de atacar los problemas y ha dado facilidad, flexibilidad y precisión [3] en la obtención de resultados. La disponibilidad creciente de poderosos paquetes matemáticos ha hecho accesible la simulación y la visualización de muchos de estos problemas, de tal manera que los resultados e implicaciones son vistos con mayor detalle. Con la ayuda de estas herramientas es posible investigar ahora de una manera muy sencilla el proceso de reverberación, las trayectorias libres medias, los efectos de las áreas de absorción en las paredes en el proceso de decaimiento del sonido, etc. En este trabajo no se intenta revisar estos problemas a fondo, ya que han sido tratados extensamente [4,5]. La trayectoria libre media y el tiempo de reverberación se discuten en relación al cálculo por computadora mediante la generación de rayos aleatorios radiados

de un punto dado y sus subsecuentes reflexiones en las paredes de un recinto rectangular. Se presenta un código escrito en Matlab™ que calcula estos parámetros en un recinto de dimensiones y absorciones dadas.

## 2. ACÚSTICA GEOMÉTRICA

### 2.1. Aproximación a rayos

La acústica geométrica es una disciplina basada en la aproximación de las ondas sonoras a rayos y es similar a la óptica geométrica [6]. La visualización del sonido en forma de rayos ha sido empleada por siglos: se sabe que el arquitecto romano Vitruvius utilizó esta idea al escribir sobre algunos problemas en la acústica de teatros; M. Mersenne, en su libro *Harmonia Universalis* (1547) [7], muestra grabados en donde la emisión y reflexión del sonido ocurre en forma de rayos; Rayleigh [8] utilizó una concepción geométrica para explicar diversos fenómenos de reflexión, entre ellos el que ocurre en las llamadas “galerías susurrantes”; Sabine [1] basó la derivación analítica de su famosa fórmula empírica, que da el tiempo de reverberación (tiempo para que la intensidad de un sonido en un recinto, cuando la fuente cesa de emitirlo, decaiga a un valor un millón de veces más pequeño que la intensidad inicial), en términos de la rapidez de absorción de la energía emitida por la fuente, al chocar con las paredes.

Básicamente un rayo corresponde, en términos modernos, a un paquete de ondas de energía sonora [5,9] que viaja a partir de una fuente a lo largo de una trayectoria perpendicular a un frente de onda. Si la fuente está en un espacio cerrado, cada rayo chocará con las fronteras (paredes) del recinto. En cada encuentro con una pared cualquiera, o la superficie de un objeto dentro del recinto, la energía disminuye, ya que es parcialmente absorbida y parcialmente reflejada. Algunos autores [5,9] usan “partículas de sonido” como un concepto similar en el que se tiene un conjunto de “partículas”, todas con la misma energía. Cuando esta colección de partículas choca con una pared, una fracción  $\alpha$  es absorbida y una fracción  $1 - \alpha$  es reflejada. El concepto de rayos es una aproximación a la teoría ondulatoria basada en la suposición de que conforme un frente de onda viaja por un medio, la amplitud no varía notoriamente dentro de una distancia de una longitud de onda (no hay difracción) y de que la variación de la longitud de onda en esa misma distancia es mucho menor que la longitud de onda ( $d\lambda \ll \lambda$ , esto es, no hay refracción) [10]. Para el caso de un recinto donde no hay flujo de aire y la densidad de éste es constante, la velocidad (rapidez) del sonido es constante. El requerimiento para esta aproximación se traduce a que las longitudes de onda involucradas deben ser mucho menores que las dimensiones del recinto u obstáculos en su interior.

Esta es, pues, una aproximación válida para altas frecuencias que desprecia los efectos de interferencia, difracción y los modos normales de vibración. A pesar de esto, se obtienen resultados de validez general [10] y continúa siendo una herramienta útil para el análisis de la propagación del sonido en espacios cerrados [11,12] y en el diseño de salas de concierto y teatros [13,14].

### 2.2. Trayectoria libre media y fórmulas del tiempo de reverberación

La trayectoria libre media (mfp) de un rayo es un concepto que tiene diferencias sutiles de significado entre diferentes autores [4,5,10]. La definición más aceptada es que la mfp es la distancia promedio que un ensamble de rayos viaja entre las colisiones con las fronteras cuando la fuente sonora está dentro de un recinto, o en otros términos: “la media de la densidad de probabilidad que describe la ocurrencia de una trayectoria libre entre dos reflexiones sucesivas” [5].

Considérese a un rayo en sus sucesivas reflexiones durante un tiempo largo, la distancia total recorrida en un tiempo  $t$  es  $C_0 t$  (donde  $C_0$  es la velocidad del sonido); la trayectoria libre media es esta distancia dividida entre el número total de reflexiones  $N$ ,  $(mfp)_t = C_0 t / N$ , resultando el promedio temporal para un rayo; el correspondiente al ensamble (mfp) se calcula considerando a todos los rayos. Si el proceso de reflexión es tal que el campo sonoro es difuso (la energía sonora tiene igual probabilidad de viajar en todas direcciones) o las reflexiones no son especulares (las reflexiones no cumplen con la ley de reflexión), entonces ambos promedios son iguales. La trayectoria libre media juega un papel importante en el proceso de reverberación y depende de la geometría del recinto. Para un recinto rectangular, de volumen  $V$  y área superficial interna  $S$ , la trayectoria libre media tiene un valor teórico de  $4V/S$ ; para un recinto esférico es  $6V/S$  [15]. En nuestro caso se considera un proceso de reflexión especular, por lo que el promedio se hace también sobre todos los rayos considerados.

### 2.3. Reverberación

La fórmula de Sabine [1]:

$$T = 0.161 \frac{V}{\bar{\alpha}}, \quad (1)$$

da el tiempo de reverberación  $T$  en términos del volumen del recinto y de la absorción  $\bar{\alpha} = \sum S_i \alpha_i / \sum S_i$ , donde  $S_i$  es el área de la  $i$ ésima superficie con coeficiente de absorción  $\alpha_i$ , la fracción de energía sonora absorbida (aleatoriamente incidente) en las superficies de las fronteras. El método de promediación en la absorción asigna pesos estadísticos iguales (un rayo dado tiene igual probabilidad de chocar con una u otra superficie) a los elementos de superficie y en consecuencia supone una condición difusa de densidad de energía sonora. Esta fórmula es válida para valores bajos de absorción,  $\bar{\alpha} < 0.1$ ; para valores de  $\bar{\alpha}$  mayores, el error aumenta progresivamente y para  $\bar{\alpha} = 0.2$  es del 10%; falla en el caso límite en que cada uno de los coeficientes de absorción vale la unidad (la energía reflejada en este caso es cero, por lo cual la única energía presente es la que va de la fuente a las paredes, en consecuencia el tiempo de reverberación debería ser cero pero la fórmula da un valor finito). Eyring [15] derivó una fórmula usando el concepto de imágenes que da mejores resultados cuando la absorción es relativamente alta, la absorción se define en este caso como  $a = S \ln(1 - \bar{\alpha})^{-1}$ , con  $S = \sum S_i$ . Knudsen [2] derivó esta fórmula basándose en el concepto de rayos. Esta derivación prosigue más o menos así: después de cada reflexión la densidad de energía  $D$  decrece por un factor de  $(1 - \bar{\alpha})$ , el decremento promedio de densidad de energía es  $1/(1 - \bar{\alpha})$  o, en decibeles,  $10 \log_{10}(1 - \bar{\alpha})^{-1}$ . En un

segundo el número de reflexiones es igual a  $C_0/\text{mfp} = C_0S/4V$  y en consecuencia la rapidez promedio de decaimiento ( $R$ ) es

$$R = \frac{C_0S}{V[2.5 \log_{10}(1 - \bar{\alpha})^{-1}]}, \quad (2)$$

que se transforma en

$$R = 1.0857 \frac{C_0}{V[-S \ln(1 - \bar{\alpha})]}, \quad (2a)$$

cuando se utilizan logaritmos naturales ( $\ln N = 2.30259 \log_{10} N$ ).

Si el decaimiento en la densidad de energía es de 60 dB, correspondiente a un tiempo de reverberación  $t_{60} = T$ , se obtiene  $T = 60/R$ , que es la Ec. (1) cuando  $\bar{\alpha} < 0.1$ , ya que en este caso  $\ln(1 - \bar{\alpha})^{-1} \cong \bar{\alpha}$ .

### 3. SIMULACIÓN

#### 3.1. Trayectoria libre media

El propósito del código de computadora es obtener la trayectoria libre media, la frecuencia de colisión con las paredes de un recinto rectangular cuyas dimensiones son dadas por el usuario, y el tiempo de reverberación cuando se introduce absorción en las paredes. El procedimiento general está basado en Allred *et al.* [16,17], quienes usaron un método de Monte Carlo para determinar las características acústicas de un recinto (trayectoria libre media y las frecuencias relativas de colisión con las paredes). El código de computadora sigue continuamente las reflexiones de un rayo con dirección aleatoria, que sale de un punto de posición también aleatoria, que representa a una fuente puntual. Las coordenadas de cada punto de colisión se guardan en un vector. Se genera un lazo de  $M$  posiciones de la fuente y de cada posición sale un rayo, al cual se le permiten  $N$  reflexiones con las paredes en un lazo de reflexiones correspondiente. Así habrá  $MN$  reflexiones en total. La parte fundamental del método, repetido aquí para mayor claridad, es la siguiente: se considera un recinto rectangular con paredes en  $x = 0, y = 0, z = 0, y = Y, x = X, z = Z$ ; se generan tres números para formar las coordenadas de la fuente sonora:  $\mathbf{A} = \text{rand}(1,3)$ ,  $\mathbf{R1} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{W}$  (en código de Matlab) donde  $\mathbf{W}$  es el vector de posición de las paredes  $\mathbf{W} = [X \ Y \ Z]^T$ ; se generan otros tres números:  $\mathbf{e} = 2 * (\text{rand}(1,3) - 0.5)$  para formar un vector unitario, normalizando:  $\mathbf{E} = [\mathbf{e}] / \text{norm}$ , donde  $\text{norm} = 1 / \text{sqrt}(\text{sum}(\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}))$ . El punto de colisión se calcula resolviendo para el mínimo de  $\lambda_i$  en un conjunto de ecuaciones  $q_0 + \lambda_i e_i = X_i$  ( $\lambda = \mathbf{E} \setminus (\mathbf{W1} - \mathbf{R1})$ ), donde  $q_0$  es la posición de la fuente y  $X_i$  es 0 ó  $X_i$ , según el signo de  $e_i$  sea negativo o positivo (véase la Fig. 1). Esto se entiende más claramente si se considera que  $\mathbf{E}$  es un vector proporcional a la velocidad del sonido. Las componentes de  $\mathbf{E}$  son las componentes de velocidad y  $\lambda_i$  son los tiempos requeridos para viajar (las distancias perpendiculares) de la fuente a la pared. Obviamente el tiempo mínimo para la próxima colisión es la lambda mínima ( $\lambda_{\min}$ ). Ahora bien, dado que  $\lambda_{\min} \mathbf{E}$  es la distancia de la fuente al punto de colisión, se obtiene:  $|\lambda_{\min} \mathbf{E}| = \lambda_{\min}$ , es decir, la distancia de la

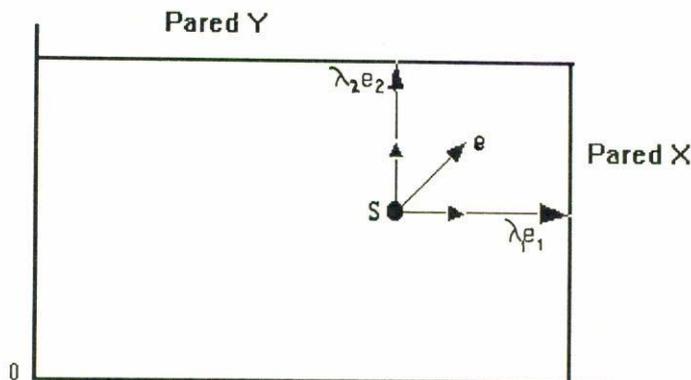


FIGURA 1. Un rayo que sale de la fuente puntual  $S$  con componentes  $e_1$ ,  $e_2$ . El valor mínimo de  $\lambda_i$  en  $\lambda_i e_i$  determina cual pared será tocada primero.

fuelle al punto de colisión es simplemente  $\lambda_{\min}$ . Después el signo de la componente de  $E$  correspondiente a la pared colisionada es invertido. Para el cálculo de la trayectoria libre media se descarta la primera  $\lambda$  y todas las  $\lambda$  subsecuentes, correspondientes a las distancias entre colisiones con las paredes, se suman. En cada colisión se calculan las coordenadas del punto de reflexión mediante el producto de  $\lambda_{\min}$  con la componente de  $E$  correspondiente y se suman con el valor previo de esa coordenada.

### 3.2. Tiempo de reverberación

Para el tiempo de reverberación se suman todas las distancias, incluyendo la inicial de la fuente a la primera colisión. El tiempo de reverberación se calcula a partir de la distancia total que un rayo, con una densidad de energía inicial de  $10^6$ , recorre hasta que su densidad de energía decae a un valor igual o menor que la unidad.

### 3.3. Códigos de computadora

Los códigos correspondientes para la trayectoria libre media y el tiempo de reverberación (Apéndices A y B), fueron escritos en 386-Matlab<sup>TM</sup> para microcomputadoras PC-compatibles. Nótese que se escribieron varias instrucciones (permitido en Matlab) para reducir espacio de presentación.

La trayectoria libre media (Apéndice A) se obtiene calculando primero la distancia total acumulada en  $N$  reflexiones para una posición de fuente dada: `avdist=avdist + lambda_min` y formando un vector `avdistance(M)=avdist/(N-2)`, de distancias promedio para cada posición de fuente. Este vector tiene longitud  $M$ . La trayectoria libre media (mfp) es `mfp=mean(avdistance)`.

Para la simulación del tiempo de reverberación (Apéndice B), el usuario puede considerar la absorción de tres pares de paredes; por supuesto, esto se puede cambiar al considerar absorciones diferentes en cada pared, pero complicando un poco más el código. Las líneas que faltan (puntos en lugar de líneas de código) son las mismas que las del Apéndice A. El tiempo de reverberación promedio se obtiene formando un vector de tiempos de re-

TABLA I. Valores para la trayectoria libre media y frecuencias de colisión con las paredes obtenidos para 1000 reflexiones (100 posiciones de la fuente, 10 reflexiones cada una), para recintos de dimensiones diferentes.

Dimensiones (m) X:Y:Z	mfp (m)	$4V/S$ (m)	Colisiones relativas			Áreas relativas de las paredes		
10:10:10	6.519	6.667	0.342	0.339	0.319	0.333	0.333	0.33
10:10:4	4.449	4.444	0.251	0.234	0.515	0.222	0.222	0.55
10:6:4	3.946	3.871	0.250	0.327	0.423	0.194	0.323	0.48
10:6:2	2.802	2.061	0.171	0.247	0.582	0.130	0.217	0.65
10:4:2	2.543	2.353	0.145	0.335	0.920	0.118	0.244	0.58
10:2:2	1.939	1.818	0.120	0.409	0.479	0.091	0.455	0.45

verberación correspondientes a cada posición de fuente y calculando el promedio de estos tiempos.

El código se usó tal y como se muestra. No pretende ser el óptimo o más rápido posible, ya que no se hizo un esfuerzo especial para este fin. Constituye un ejemplo que puede ser la base de otro más eficiente. El tiempo de ejecución depende del número ( $M$ ) de puntos fuente y del número de reflexiones permitidas o deseadas ( $N$ ) para un rayo dado. En una 386 PC el tiempo de cómputo para un total de 1000 reflexiones (100 posiciones de fuente y 10 reflexiones por rayo) fue de aproximadamente 36 segundos.

#### 4. RESULTADOS

En la Tabla I se muestran algunos resultados para la frecuencia de colisión (número de colisiones con una pared entre el total de colisiones), las trayectorias libres medias en recintos de diferentes dimensiones y las áreas relativas de las paredes. Los valores para las trayectorias libres medias, cuando se elige un número relativamente grande de reflexiones ( $\cong 400$  o más), son en general menores que los valores teóricos para el caso del recinto cúbico; para dimensiones que se alejan de la forma cúbica las discrepancias no siguen, aparentemente, una regla fija. Estos resultados concuerdan razonablemente con los dados en las Refs. [5] y [17]. Se observa en la misma tabla que los valores de las frecuencias de colisión relativas difieren apreciablemente de los valores de la última columna, correspondiente a la áreas relativas de las paredes (que son iguales, por otro lado, a la probabilidad de colisión de los rayos sonoros con las paredes, si el campo sonoro fuera difuso) cuando el recinto no es cúbico. La frecuencia de colisión es en todos los casos mayor que lo que se esperaría, con base en las áreas, para las paredes más pequeñas del recinto; en consecuencia, de la simulación se concluye que en realidad tienen más efectividad absorbente.

La Fig. 2 muestra una gráfica, proyectada en el plano XY, de todas las trayectorias para diez posiciones de fuente y diez reflexiones, de cada rayo generado.

La Tabla II muestra algunos resultados para el tiempo de reverberación (20 posiciones de la fuente), comparadas con las fórmulas clásicas. En general, para muchas posiciones de la fuente ( $> 30$ ) y recintos de dimensiones normales (con dimensiones no muy diferentes

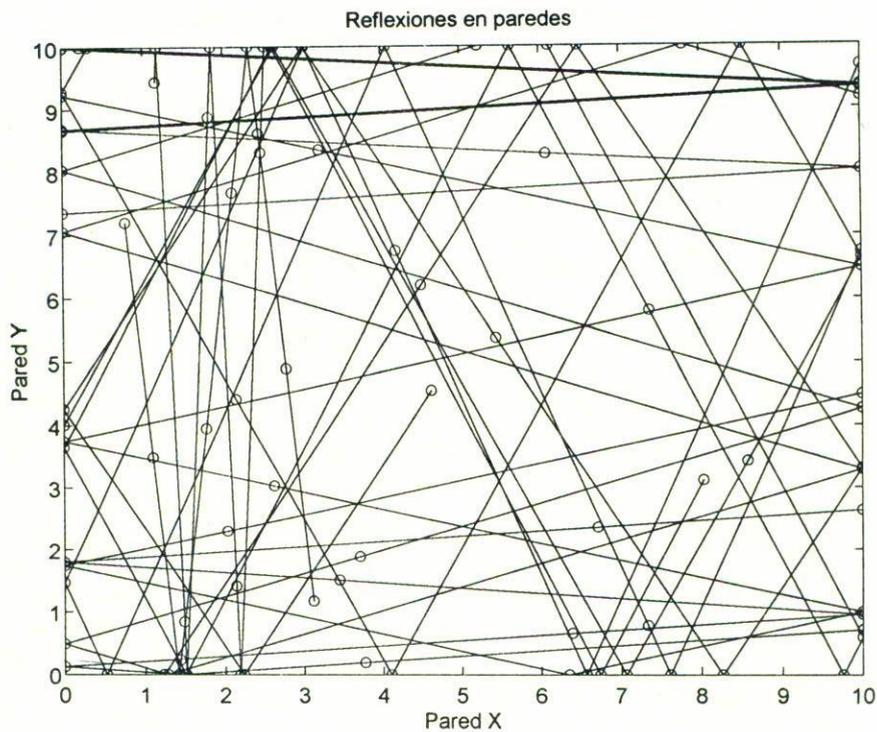


FIGURA 2. Trayectorias de los rayos para diez posiciones de la fuente y diez reflexiones de cada rayo proyectadas en el plano XY. La "o" indica el punto donde un rayo toca a una pared dada (incluyendo puntos donde empieza y termina su recorrido).

TABLA II. Tiempos de reverberación obtenidos para 20 posiciones cada una para recintos de dimensiones y absorciones diferentes.

Dimensiones relativas X:Y:Z	Absorción (pares de paredes opuestas)			TR (s/60 dB)	Eyring (s/60 dB)	Sabine (s/60 dB)
10:10:10	0.05	0.05	0.05	5.269	5.281	5.418
10:10:10	0.25	0.25	0.05	1.346	1.338	1.478
10:10:4	0.25	0.25	0.05	1.096	0.785	0.879
10:10:2	0.05	0.05	0.25	0.777	1.419	1.478
5:4:3	0.10	0.10	0.10	0.894	0.908	0.956
2:2:10	0.05	0.05	0.50	0.629	0.252	0.290

entre sí), los valores obtenidos por simulación son menores que los calculados por la fórmula de Eyring y a su vez éstos son menores que los correspondientes a la fórmula de Sabine.

## 5. DISCUSIÓN

La efectividad del método utilizado en la simulación se discute en las Refs. [16,17]. Al comparar la distribución de las frecuencias de colisión observadas con la probabilidad teórica, se menciona que para el único caso en que se tiene información a priori es para el recinto cúbico; en este caso la simetría impone que las frecuencias de colisión sean iguales (lo que en nuestro caso se confirma: Tabla I, columnas 4 y 5). Estos autores hicieron varias pruebas con 1 500 reflexiones cada una y obtuvieron estadísticas cuyos resultados son consistentes con una distribución normal; para 90 000 colisiones, la desviación promedio para el valor calculado de la trayectoria libre media fue del 0.9%. También se discute la influencia que puede tener el hecho de que en una computadora los números aleatorios usados son en realidad pseudoaleatorios.

Se debe resaltar también, que las fórmulas de reverberación están basadas en las suposiciones siguientes: en el recinto existe un campo sonoro difuso, la absorción es uniforme en todas las paredes del recinto y la derivación de ellas ocurre en términos de la acústica geométrica. La computadora es un instrumento excelente para el estudio de estos problemas basándose en la aproximación a rayos, pues hay suficiente evidencia de que las fórmulas anteriores fallan, como ya se mencionó, cuando existen condiciones de gran absorción o ésta no es uniforme; incluso algunas suposiciones en sus derivaciones son incorrectas [18]. Las discrepancias han sido atribuidas a diversos factores, como la difracción, la falta de difusión, la trayectoria libre media, la dependencia del tiempo de reverberación con la forma del recinto [2,3,5,6] y otras. Parece ser que las discrepancias son debidas más que nada a la dependencia del tiempo de reverberación con la forma del recinto y a la suposición, implícita en la derivación, de que la distribución de los intervalos de tiempo entre reflexiones es binomial [5]. Esta distribución implica que la probabilidad de que un rayo choque con una pared es independiente de la pared tocada previamente; esto no puede ser cierto ya que un rayo no puede tocar a la misma pared en sucesión. Considerando al proceso de reverberación como un proceso de Markov, se considera la historia previa de cada rayo y en consecuencia la forma del recinto (y la posición de los absorbedores si la absorción no está distribuida en toda la pared) influye en el proceso de reverberación.

No se tienen referencias en la literatura sobre el tema del cálculo del tiempo de reverberación por simulación en recintos cúbicos con los cuales comparar los valores obtenidos en este trabajo (menores que los dados por las fórmulas clásicas), sin embargo, éstos confirman resultados experimentales, simulaciones anteriores para "recintos" de dos dimensiones [19] y los resultados teóricos considerando al proceso como markoviano [20].

## 6. CONCLUSIONES

La simulación de algunos problemas complejos en acústica se facilita para cualquiera que tenga acceso a computadoras PC con la ayuda de paquetes matemáticos poderosos, como el citado en este trabajo. Un ejemplo es la simulación de las reflexiones de rayos emitidos por una fuente sonora en un recinto rectangular para calcular la trayectoria libre media de dichos rayos y los tiempos de reverberación en recintos cuyas paredes son absorbentes.

La longitud de estos códigos es muy pequeña y el cambio de parámetros, gráficas, etc., es una cuestión relativamente sencilla.

#### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece comentarios y la revisión final del manuscrito a la Srita. Clara Alvarado Z.

#### APÉNDICE A

```

clc;clear
hold off
W=input('Paredes en [XYZ],(metros)?');
M=1;N=1;avdist=0,nx=0;ny=0;nz=0;
mfp=0;lambda=0;vdist=0;s=1;
L=input('numero de fuentes?');
LL=input('numero de reflexiones permitidas?');
while M <L+1          %lazo de fuentes
avdist=0;E=0;lambda=0;R1=0;
A=rand(1,3);R1=A.*W; % vector de posicion/fuente
e=2*(rand(1,3)-0.5);
norm=1/sqrt(sum(e.*e));e=norm*e;E=diag(e); % vector unitario
for j=1:3,           %checa signo de ei y ajusta pared
    ifE(j,j)<0,
        W(1(j))=0 ; %pared
    elseif E(j,j)>0,
        W1(j)=W(j); % si positivo igual a la coordenada original
    end
end
N=1;
while N<LL+1, % lazo de distancias y puntos de reflexion
distance=0;c1=W1-R1;C1=diag(c1);
lambda=E\C1; % solucion de {xi}+{ei}*{lambdai}={Wi}
l=find(lambda(:)~=0);lamb=lambda(l) ;
i=find((lam)==min((lam))); % min lambda entre paredes
lambda_min=min((lam)); %distancia a reflexion proxima
% punto de interseccion con la pared i
R1(i)=W1(i);
if i==1
R1(2)=R1(2)+lambda_min*E(2,2);
R1(3)=R1(3)+lambda_min*E(3,3);
nx=nx+1 ; % cuenta de reflexiones
end
if i==2
R1(1)=R1(1)+lambda_min*E(1,1);
R1(3)=R1(3)+lambda_min*E(3,3);
ny=ny+1 ;
end
if i==3

```

```

R1(1)=R1(1)+lambda_min*E(1,1);
R1(2)=R1(2)+lambda_min*E(2,2);
nz=nz+1 ;
end

E(i,i)=-E(i,i);
    if E(i,i)<0,
        W1(i)=0 ; % pared tocada
    elseif E(i,i) > 0,
        W1(i)=W(i);
    end
reflection(:,s)=R1'; % coordenadas
    if N>1
avdist=avdist+lambda_min;
    end
    N=N+1;
s=s+1;
    end
avdistance(M)=avdist/(N-2);
    M=M+1 ;
    end
    % Calculos y graficas
format short
mfp=mean(avdistance); clc;
disp('----m.f.p. -----4v/s----');
v=W(1)*W(2)*W(3); S=2*(W(1)*W(2)+W(1)*W(3)+W(2)*W(3)); p=(4*v/S);
NR=(M-1)*(N-1);
results=[mfp p]; resultsn=[nx ny nz NR] ;
disp(results);
disp('Frecuencias relativas de reflexion');
disp('-----fx-----fy-----fz');
relative=[(nx/NR) (ny/NR) (nz/NR)];
disp(relative);
disp('Areas de pared relativas');
disp('-----yz-----xz-----xy');
areas=2*[(W(2)*W(3))/S (W(1)*W(3))/S (W(1)*W(2))/S]; disp(areas);
pause % grafica de trayectorias proyectadas en XY
axis([0W(1) 0W(2)]);
c1=[0;0]; c2=[W(1);9]; c3=[W(1);W(2)]; c4=[0;W(2)]; % esquinas
tx=[c1(1) c2(1) c3(1) c4(1)]; ty=[c1(2) c2(2) c3(2) c4(2)];
plot(tx,ty); hold on;
for j=1:LL:length(reflection);
x=reflection(1,j:j+(LL-1)); y=reflection(2,j:j+(LL-1));
plot(x,y,'g',x,y,'ow'); end;
ylabel('Pared Y'); xlabel ('Pared X'); title ('Reflexiones en
paredes');

```

## APÉNDICE B

```

...
...
Co=340; % m/s;decay=0;
alpha=input('coeficientes de absorcion de las paredes [xyz]?');
LL=2000 ;ref=1 alpha; % numero de reflexiones permitidas
while M < L=1 % lazo de fuentes
e=1.0e06; % energia inicial
...
...
% punto de interseccion con la pared i
R1(i)=W1(i);
if i==1
R1(2)=R1(2)+lambda_min*E(2,2);
R1(3)=R1(3)+lambda_min*E(3,3);
nx=nx+1 ; % cuentas
ee=ee*ref(1);
end
...
...
if N==1,
initial_distance=lambda_min; % conserva distancia
elseif N>1,
avdist=avdist+lambda_min; % distancia acumulada despues 1a
reflxion.
end
if M==1, decay(N,M)=ee; time(N,M)=lambda_min/Co;end % si 1 sigue
el decaimiento
if ee<=1, break,end; % si la energia es menor que 10e-6 sale del
lazo
nt=nx+ny+nz;
N=N+1;s=s+1;
end
avdistance(M)=avdist/(N-2);
revtimei(M)=(avdist+initial_distance)/(Co)
M=M+1 ;
end
% calculos y graficas
...
...
% formulas de reverberacion
time=cumsum(time);avrevtime=mean(revtimei);
av_alpha=(alpha(1)*s3+alpha(2)*s1+alpha(3)*s2)/S;
A=S*(log(1/(1-av_alpha)));a=S*av_alpha;Sabine=60*V/(1.08573*Co*a);
Eyring=60*V/(1.08573*Co*A);
disp('-----Rt-----Eyring-----Sabine');
disp('-----Seconds-----');
rtimes=[avrevtime Eyring Sabine];disp(rtimes);pause
holf off;
if M-1==1,plot(time,10*log10(decay));title('Decaimiento de un rayo');
xlabel('Tiempos s');ylabel('Energia');grid;end

```

## REFERENCIAS

1. W.C. Sabine, *Collected Papers on Acoustics*, Dover, New York (1964).
2. V.O. Knudsen, *Acoustical Designing in Architecture*, American Institute of Physics (1978).
3. M.R. Schroeder, *American Journal of Physics* **41** (1973) 461.
4. L.E. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York (1980).
5. H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Applied Science Publishers Ltd, London (1979).
6. E. Hecht y A. Zajac., *Optics*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading (1974).
7. F.V. Hunt, *Origins in Acoustics*, Yale University Press, New Haven (1978).
8. J.S. Rayleigh, *The Theory of Sound*, Vol. 2, Dover, New York (1945).
9. L. Cremer, H.A. Müller y T.J. Schultz, *Auditorium Acoustics*, Applied Science Publishers, London (1978).
10. A.D. Pierce, *Acoustics An Introduction to its Physical Principles and Applications*, Mac Graw Hill, New York (1981).
11. A. Krokstad, S. Strom y S. Sorsdal, *J. Sound Vib.*, **8** (1), (1968) 118.
12. A.M. Ondet y J.L. Barbry, *J. Acoust. Soc. Am.* **85** (2), (1989) 787.
13. Andrzej Kulowski, *Applied Acoustics* **18**, (1985) 449.
14. S.J. Bradley, *Sound and Vibration*, Jan. (1991) 22.
15. C.F. Eyring, *J. Acoust. Soc. Am.*, **1**, (1930) 217.
16. J.C. Allred y A. Newhouse, *J. Acoust. Soc. Am.*, **30** (1958) 1.
17. J.C. Allred y A. Newhouse, *J. Acoust. Soc. Am.*, **30** (10) (1958) 903.
18. C.W. Kosten, *Acustica*, **10** (1960) 245.
19. M.R. Schroeder, *J. Acoust. Soc. Am.* **47** (2), (1970) 424.
20. R. Gerlach, *Auditorium Acoustics*, Robin Mackenzie (Editor), Applied Science Publishers Ltd, London (1975).