

# IDENTIFICACION, ANALISIS Y CONTROL DEL ECO FLOTANTE

HUGO C. LONGONI<sup>1</sup> y BRUNO TURRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC), Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.  
38566@electronica.frc.utn.edu.ar, 57841@electronica.frc.utn.edu.ar

Resumen – El eco flotante (*flutter echo*) es una vibración transitoria excitada por un pulso sonoro de corta duración entre dos paredes reflectantes sonoras paralelas. Habitualmente, en la bibliografía nacional como internacional se analiza el eco flotante de manera breve e indirecta al describir diferentes temas de la acústica de recintos. En este trabajo se analizan las características físicas del fenómeno, efectos subjetivos en seres humanos y métodos de control utilizados en el diseño de espacios arquitectónicos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Habitualmente, en la bibliografía nacional como internacional se analiza el eco flotante de manera breve e indirecta al describir diferentes temas de acústica de recintos.

El objetivo de este trabajo es analizar las características físicas del fenómeno, efectos subjetivos en seres humanos y métodos de control utilizados en el diseño de espacios arquitectónicos.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En primer lugar se define el eco flotante y se analizan sus características. En segundo lugar, se analizan los efectos perceptuales relacionados con la localización de la fuente sonora. En tercer lugar, se analizan las condiciones físicas que pueden producir riesgo de ecos en recintos utilizando técnicas de la acústica geométrica. Finalmente se presentan diferentes métodos empleados para evitar el fenómeno.

## 2. DEFINICIONES

El eco flotante (*flutter echo*) es una vibración transitoria excitada por un pulso sonoro de corta duración entre dos paredes reflectantes sonoras paralelas [1]. Por lo tanto, se puede afirmar que el eco flotante ocurre si el sonido se refleja en repetidas ocasiones de una pared a otra. Los ecos flotantes pueden percibirse claramente en pasillos alargados con paredes extremas reflectantes con techo y piso absorbentes [2]. En teoría, con paredes perfectamente reflectantes y despreciando la atenuación del aire habría un número infinito de fuentes imágenes. El efecto acústico es similar al que se produce en óptica al ubicarse una fuente luminosa entre dos espejos paralelos. En la práctica, las reflexiones sonoras sucesivas son atenuadas debido a la absorción o difusión de las paredes [3]. Además, debe considerarse que la intensidad del sonido disminuye inversamente proporcional al cuadrado de la distancia [2]. En la Figura 1 se representa el concepto del eco flotante.

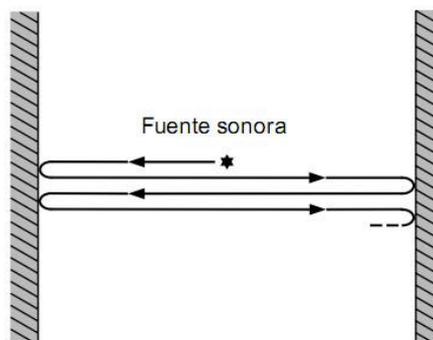


Figura 1: Eco flotante que se genera al colocar una fuente sonora entre dos paredes reflectantes sonoras paralelas

## 3. EFECTOS PERCEPTUALES DEL ECO FLOTANTE.

La respuesta impulsiva de un recinto (RIR) se compone del sonido directo seguido de una serie de reflexiones tempranas y tardías. Para analizar los efectos subjetivos de las reflexiones, se considerara la existencia del sonido directo y una única reflexión.

Debido al fenómeno de enmascaramiento, la reflexión será inaudible si ésta llegara inmediatamente después del sonido directo y/o si su nivel es bajo relativo al mismo del sonido directo. De esta manera, habrá un nivel umbral de audición dependiendo del retardo y dirección de incidencia relativo al sonido directo. Solamente si el nivel de la reflexión está por encima de dicho umbral, tendrá ésta un efecto audible, el cual dependerá de su nivel, retardo y dirección de incidencia.

Algunos de sus posibles efectos son:

- Mayor nivel, refuerzo del sonido directo.
- Mayor claridad, para un retardo de 50 a 80 ms referido a la llegada del sonido directo.
- Mayor espacialidad.
- Eco, para retardos mayores a 50 ms y altos niveles de reflexión. A mayor

retardo el eco será detectado también con niveles bajos.

- Coloración.
- Cambio en la dirección de localización de la fuente, cuando la reflexión llega con un nivel mayor que el sonido directo. Esto puede ser debido a: una excesiva atenuación del sonido directo (obstáculos); o una amplificación del sonido reflejado a través de una superficie cóncava (focalización).

Umbrales de audición, riesgo de eco y otros efectos dependen de las propiedades espectrales y temporales de la señal. Así, para el caso de la palabra hablada (señal acústica de amplio espectro, con rápidas y múltiples variaciones en función del tiempo), el eco se detecta más fácilmente que en otras señales como la música (de amplio espectro con lentas variaciones temporales según el estilo). Por otro lado, las señales lentas son más sensibles para la detección de efectos de coloración [4].

Retardo [ms]	Diferencia de espacio recorrido [m]
50	17,17
80	27,47
100	34,34

Tabla 1: Diferencia de espacio recorrido.

En la Tabla 1 se muestran valores de diferencia de espacio recorrido para distintos retardos de tiempo entre el sonido directo y el reflejado. En la misma se considera una velocidad del sonido de 343,4 m/s, correspondiente a 20°C de temperatura atmosférica.

### 3.1. Efectos direccionales del eco flotante.

En la Figura 2 se muestran dos paredes paralelas, (ligeramente absorbentes, o altamente reflectantes), la pared 1 ubicada en el origen del eje  $x$  (horizontal) y la pared 2 ubicada a una distancia  $l$  de la primera. A una distancia  $s$  del origen, tal que  $s = l/2$ , una fuente produce un sonido impulsivo en el instante  $t_0$ , tal que el ancho  $T_p$  de la señal es despreciable con relación a la separación de las paredes, es decir

$$T_p \ll \frac{l}{c} \quad (1)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido.

Además, se consideran dos pulsos, el pulso 1 que en el instante inicial viaja en el sentido positivo de  $x$  y el pulso 2 que hace lo mismo en el sentido negativo de  $x$ . Dadas estas condiciones, se producirá eco flotante entre las paredes mencionadas.

Considérese también que un observador humano binaural se ubica sobre el camino de los pulsos, a una distancia  $\varepsilon$  de la pared 1, tal que  $\varepsilon < s$ .

En el instante de tiempo

$$t_0 + \frac{l - \varepsilon}{c} \quad (2)$$

se produce el primer arribo, cuando el pulso 2 alcanza la posición del observador, proveniente de la pared 2, ver Figura 3.

El segundo arribo se produce en el instante

$$t_0 + \frac{l - \varepsilon}{c} + \frac{2 \cdot \varepsilon}{c} \quad (3)$$

cuando el pulso 2 vuelve a alcanzar la posición del observador, luego de haberla atravesado y haberse reflejado en la pared 1 cambiando su dirección de propagación, ver Figura 4.

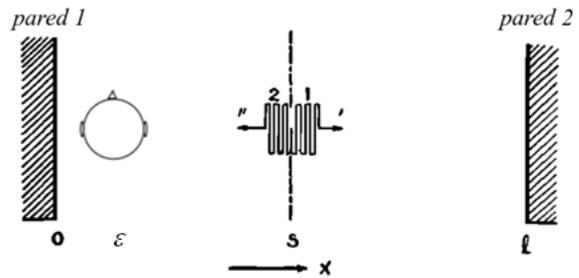


Figura 2: Pulso iniciales [1].

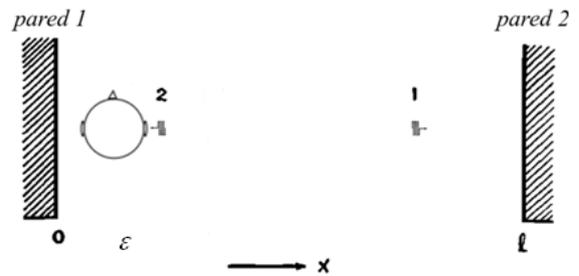


Figura 3: Primer arribo. El pulso 2 llega hasta la posición del observador, sentido negativo de  $x$  [1].

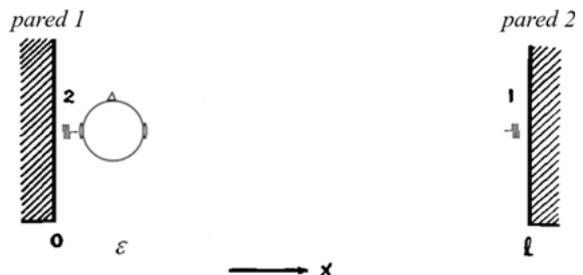


Figura 4: Segundo arribo. El pulso 2 llega hasta la posición del observador, sentido positivo de  $x$  [1].

El intervalo de tiempo entre el primer arribo y el segundo es

$$\frac{2 \cdot \varepsilon}{c} \quad (4)$$

y si se cumple que el mismo sea menor que 5 ms (para sonidos de corta duración,  $\ll 5$  ms) [5].

$$\frac{2 \cdot \varepsilon}{c} < 5ms \Leftrightarrow \varepsilon < 0.85m$$

el observador oye un único sonido, cuya dirección de procedencia la determina el primer sonido en llegar, tal como se observa en la Figura 5.

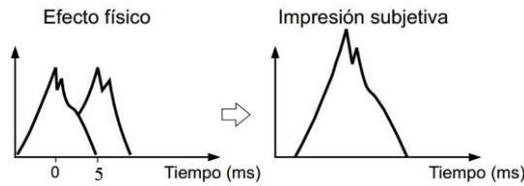


Figura 5: Retardo hasta 5 ms. Se oye un único sonido, y la dirección la determina el primer sonido en llegar.

En el instante de tiempo

$$t_0 + \frac{l - \varepsilon}{c} + \frac{2 \cdot \varepsilon}{c} + \frac{l - 2 \cdot \varepsilon}{c} \quad (5)$$

se produce el tercer arribo, cuando el *pulso 1* alcanza la posición del *observador*, proveniente de la *pared 2* (Figura 6).

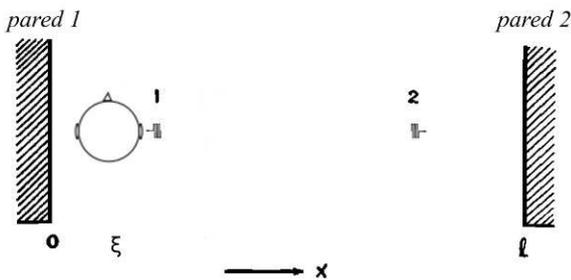


Figura 6: Tercer arribo. El *pulso 1* llega hasta la posición del *observador*, sentido negativo de  $x$ .

El intervalo de tiempo entre el segundo arribo y el tercero es

$$\frac{l - 2 \cdot \varepsilon}{c} \quad (6)$$

y si se cumple que el mismo sea mayor que 10ms (para sonidos de corta duración,  $\ll 5\text{ms}$ ) [5]

$$\frac{l - 2 \cdot \varepsilon}{c} > 10\text{ms} \Leftrightarrow l - 2 \cdot \varepsilon > 3.43\text{m} \quad (7)$$

el *observador* discrimina ambos sonidos, el *pulso 1* y el *pulso 2*, tal como puede verse en la Figura 7.

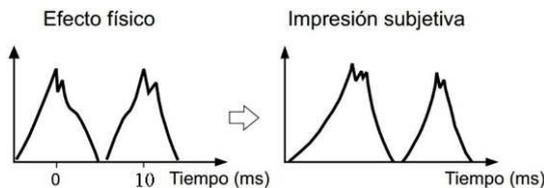


Figura 7: Retardo superior a 10 ms: Se discriminan ambos sonidos.

El *observador* percibirá la llegada del *pulso 1* proveniente de la *pared 2*, seguido del mismo *pulso 1* que al atravesar la posición del *observador*, se reflejó en la *pared 1* cambiando su dirección de propagación, y así sucesivamente.

Los ecos flotantes viajan en ambas direcciones. El hecho de que aparezca como direccional para un *observador humano* debe ser únicamente por razones psicoacústicas más que físicas [1]. Si  $\varepsilon$  es pequeña ( $< 0.85\text{m}$ ), cada pulso que llega al *observador* desde la *pared 2* es seguido de cerca por un pulso desde la

*pared 1*. El intervalo es solamente  $2 \varepsilon/c$ . Después de un intervalo mayor,  $(l - 2\varepsilon)/c$ , llega otro pulso desde la *pared 2* seguido de cerca por otro pulso desde la *pared 1*, y así sucesivamente. Los pulsos que viajan en la dirección negativa de  $x$  siempre son seguidos de cerca por un pulso que viaja en la dirección positiva de  $x$ , para el *observador*, en este caso en particular.

Esta relación hace que los oídos del *observador* sientan que todos los pulsos están llegando desde la *pared 2* (viajando en la dirección negativa de  $x$ ), a causa del enmascaramiento u otro mecanismo similar que permite la localización binaural por diferencia temporal.

Si  $\varepsilon < 0.85\text{m}$ , tanto el *pulso 1* como el *pulso 2* suenan provenientes de la *pared 2*.

Si la separación entre paredes es menor que 3 m [1], el arribo de los pulsos es tan cercana que un tono continuo es percibido por los oídos del sujeto, como resultado de la persistencia de la sensación auditiva.

Desde el punto de vista de la psicoacústica, el eco flotante siempre se origina en la pared más lejana a cualquier *observador*.

Las consideraciones anteriores se basan en asumir que los pulsos son tan cortos que no hay interferencia entre ellos, es decir:

$$T_p \ll \frac{l}{c}$$

De lo contrario, la interferencia de los pulsos reforzará los modos propios de vibración entre las paredes y no se percibirán pulsos distintos por el *observador*. Es por ello, que el eco flotante es excitado por sonidos impulsivos, un sonido de mayor duración sólo excitará los modos propios del recinto.

#### 4. RIESGO DE ECO EN RECINTOS

Si el retardo de la primera reflexión es mayor que 50 ms, ésta será percibida como un eco incómodo cuando la fuente emite sonidos impulsivos.

En salas grandes, el desafío es configurar las superficies reflectantes para lograr que la primera reflexión llegue dentro de los primeros 50 ms a todos los asientos. Es posible determinar cuales son las superficies capaces de producir ecos mediante un simple análisis geométrico del plano y dibujos de secciones de la planta. Se dibujan elipses tal que la fuente y las posiciones de recepción se colocan en los puntos focales y la suma de las distancias de los puntos focales a cualquier punto de la elipse es igual a la distancia entre los focos más 17 m tal como se muestra en la Figura 8.

Luego, si una superficie reflectante que se encuentra fuera de la elipse marcada "m" en la Figura 8, dirige el sonido hacia asientos cercanos al punto M, ésta deberá ser hecha absorbente, difusora o redireccionada de forma tal que el sonido reflejado sea dirigido a una zona más lejana de la fuente que el punto M [4].

Obsérvese en la Figura 8 que el escenario fue dispuesto de forma tal que sus superficies potencialmente reflectantes están dentro de las elipses de eco. Esto significa que un sonido reflejado en ellas

y dirigido a cualquiera de los puntos de recepción K, L, M o N llegará con un retardo menor que 50 ms.

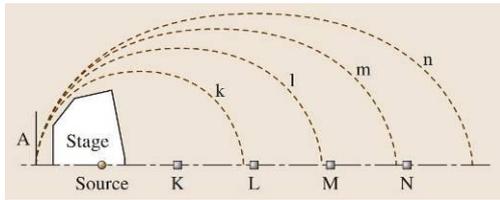


Figura 8: Elipses de eco [4].

#### 4.1. Configuraciones de recintos que producen riesgo de eco flotante.

Como se menciona anteriormente, el eco flotante, se produce entre paredes paralelas, lisas y reflectantes de un recinto, tal como se muestra en la Figura 9.

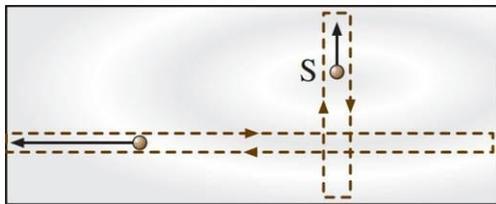


Figura 9: Recinto con eco flotante [4].

El eco flotante también se produce, debido a la forma del recinto, el camino de la reflexión es tal que se puede repetir, pasando el sonido reflejado repetidas veces por el mismo punto de recepción, esto se ilustra en la Figura 10.

En recintos pequeños, tales reflexiones producen una fuerte coloración del sonido, mientras que en recintos grandes se perciben como una serie de ecos uniformemente espaciados en el tiempo [4].

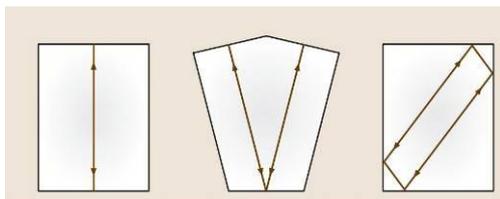


Figura 10: Configuraciones de recintos que causan riesgo de eco flotante [4].

### 5. CONTROL DE ECO FLOTANTE

Como el eco flotante se produce entre dos paredes paralelas, una solución es inclinar las paredes o una de ellas un ángulo entre  $5^\circ$  a  $10^\circ$ , pero esta solución suele ser costosa e impracticable. Si se dispone en colocar materiales absorbentes en las paredes paralelas, esto puede degradar la calidad acústica del recinto. Para salvar dichos inconvenientes, se utilizan difusores sonoros [3], estos pueden reducir las reflexiones por dispersión en lugar de absorberlos. En la Figura 11 se muestra un difusor comercial propuesto por F. Alton Everest, de 2,44 m de largo. Dicho elemento puede fijarse en las paredes paralelas, juntas o separadas, horizontal o

verticalmente. Si se colocan verticalmente, las reflexiones son controladas en el plano horizontal y si se disponen horizontalmente, las reflexiones son controladas verticalmente.

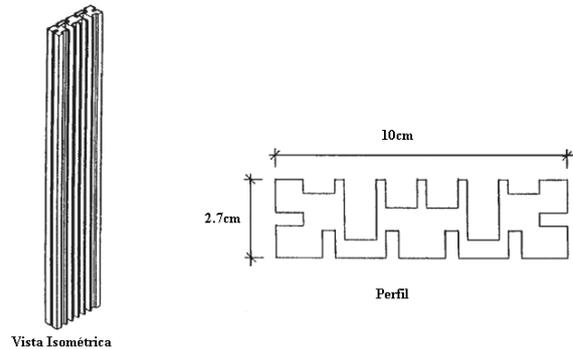


Figura 11: Difusor propuesto por F. Alton Everest (D'Antonio, RPG Diffusor Systems, Inc.)

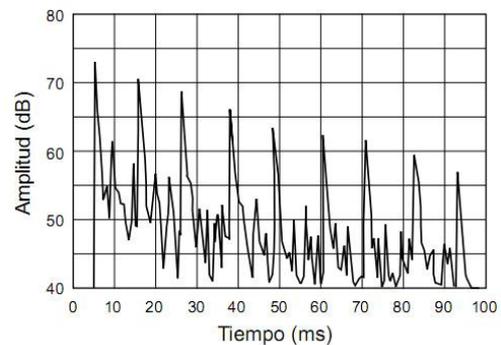


Figura 12: Curva energía-tiempo de un recinto con eco flotante [6].

Como ejemplo de tratamiento acústico en un recinto donde existe eco flotante, recurrimos al ejemplo planteado por Antoni Carrión Isbert [6], donde se presentan tres curvas de energía-tiempo. En la Figura 12 se observa una medición de respuesta impulsiva practicada en una habitación donde hay eco flotante. En la Figura 13 es la misma habitación, pero con un tratamiento acústico en una de las dos paredes. En la Figura 14 se presenta la curva con un tratamiento en las dos paredes.

Se comprueba que al tratar las paredes se produce una evidente atenuación de energía sonora asociada con las reflexiones conflictivas.

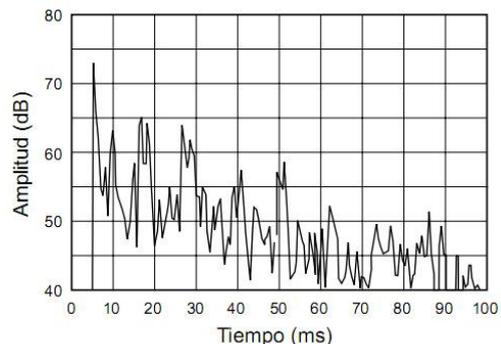


Figura 13: Curva energía-tiempo de un recinto con eco flotante y tratamiento acústico (mayor coeficiente de absorción sonora) en una de las paredes [6].

El eco flotante también puede producirse cuando las superficies que conforman el techo y el piso de un recinto, son paralelos, reflectantes y se encuentran distanciados de manera tal que los retardos temporales entre el sonido directo y reflejado superan el valor crítico [3].

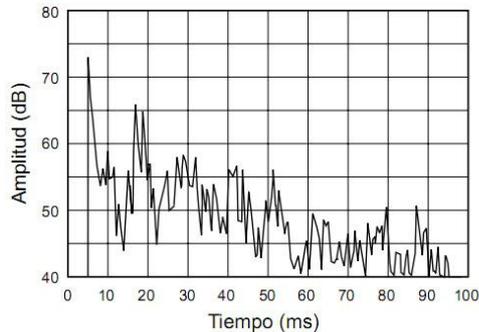


Figura 14: Curva energía-tiempo de un recinto con eco flotante y tratamiento acústico (mayor coeficiente de absorción sonora) en ambas paredes [6].

## 6. CONCLUSION

El eco flotante se produce entre dos paredes paralelas con bajo coeficiente de absorción sonora. También ocurre en recintos cuya geometría permite que un sonido impulsivo viaje repetidas veces por el mismo camino por medio de sucesivas reflexiones en superficies reflectantes.

En cuanto a efectos psicoacústicos en el ser humano, el eco flotante se percibe como un tono cuando las superficies paralelas se encuentran a una distancia menor a 3 m, o como una serie de pulsos para distancias mayores.

Utilizando conceptos de la acústica geométrica es posible analizar y predecir en la etapa de diseño de recintos, las superficies que generan riesgo de aparición de ecos y eco flotante.

Cuando el eco flotante se presenta en un recinto, éste puede ser eliminado por medio de la aplicación de difusores en las superficies del recinto, sin degradar la calidad acústica del mismo.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Maa D.Y. "The Flutter Echoes". Journal of Acoustical Society of Americas. 13, n°2, 170, 1941.
- [2] Kuttruf H. *Room Acoustics*. Spon Press 2000.
- [3] Everest F. A. *Master Handbook of Acoustic*. Fifth Edition. Mc Graw Hill. 2001.
- [4] Gade, A. C. "Acoustics in Halls for Speech and Music". Springer Handbook of Acoustics. Springer Science+Business Media, LLC New York. 2007.
- [5] Ruth Y. Litovsky et al – "The precedence effect". Journal of Acoustical Society of Americas, 106, 1633, 1999.
- [6] Carrión Isbert A. *Diseño Acústico de espacios arquitectónicos*. Primera Edición. Edicions UPC. 1998.

## 8. DATOS BIOGRAFICOS

**Hugo Longoni**, nacido en Córdoba el 08/11/1979. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: acústica de recintos, procesamiento digital de señales, realidad acústica virtual y electroacústica. E-mail: [38566@electronica.frc.utn.edu.ar](mailto:38566@electronica.frc.utn.edu.ar)

**Bruno Turra**, nacido en Rosario el 13/02/85. Estudiante de ingeniería electrónica, cursando los primeros tres años en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Rioja y actualmente en Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Sus intereses son: electroacústica, procesadores de audio y sistemas de sonido. E-mail: [brunoturra@gmail.com](mailto:brunoturra@gmail.com)