



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A076

## **Desfasador variable para la terapia acústica del acúfeno tonal**

David González Calleja<sup>(a)</sup>,  
Pedro Cobo Parra<sup>(b)</sup>,

Instituto de Acústica, CSIC. Serrano 144, 28006 Madrid, España

(a) E-mail: david.gonzalez.calleja@alumnos.upm.es

(b) E-mail: pcobo@ia.cetef.csic.es

### **Abstract**

Tinnitus is the perception of a sound which results exclusively from activity within the nervous system, without any corresponding mechanical activity within the cochlea. Damages in the peripheral auditory system, such as acoustic trauma, hear infection, ototoxicity, acoustic neuroma, vestibular compression, Meniere disease, etc., produce some de-afferentiation to the central auditory system, which can arise tinnitus. When the normal input to brain is reduced or altered in some way, plastic changes are triggered in the neural excitability at central levels of the system. The explanation of tinnitus as a plastic change predicts that it is possible to revert it by proper stimulation of the auditory way. These plastic changes can produce habituation and/or residual inhibition. Residual inhibition is the decreasing, or removing, of the tinnitus perception when the stimulus is ceased. Several sound therapies have been proposed for the treatment of tinnitus, such as masking, tinnitus re-training therapy (TRT), auditory discrimination training (ADT), or the phase-out therapy. The aim of this paper is to revise all these therapies, with special emphasis in the phase-out one, proposing some improvements to increase its efficiency.

### **Resumen**

El acúfeno es la percepción de un sonido que resulta exclusivamente de la actividad dentro del sistema nervioso, sin ninguna actividad mecánica vibratoria correspondiente dentro de la cóclea. Los daños en el sistema periférico, tales como los causados por un trauma acústico, infección del oído, ototoxicidad, neuroma acústico, compresión vestibular, mal de Meniere, etc., dan lugar a cierto grado de de-afereciación del sistema auditivo central originando acúfenos. Cuando la entrada normal al cerebro ha sido reducida o alterada de alguna forma, se disparan cambios plásticos en la excitabilidad neural en los niveles centrales del sistema. La explicación del acúfeno como un fenómeno plástico predice que es posible revertirlo estimulando adecuadamente la vía auditiva. Estos cambios plásticos pueden dar lugar a habituación y/o a inhibición residual. La inhibición residual es la disminución, o desaparición, de la sensación del acúfeno cuando cesa el estímulo. Se han propuesto diferentes terapias sonoras, tales como el enmascaramiento, la terapia de re-entrenamiento (TRT), la terapia discriminatoria auditiva (ADT), o la estimulación con una señal tonal, a la frecuencia del acúfeno, con desfase variable. El objetivo de este trabajo es revisar estas terapias, poniendo especial énfasis en la mejora de la terapia por cambio de fase.

## 1 Introducción

El acúfeno es la percepción de un sonido que resulta exclusivamente de la actividad dentro del sistema nervioso, sin ninguna actividad mecánica vibratoria correspondiente dentro de la cóclea. El acúfeno es una manifestación de la *plasticidad cerebral*. Cuando se produce una alteración de la entrada normal al sistema auditivo (una pérdida de audición, por ejemplo), éste se reorganiza de alguna manera para compensar esta alteración.

La explicación del acúfeno como un fenómeno plástico predice que es posible revertirlo estimulando adecuadamente la vía auditiva. Esto ha dado lugar a diferentes terapias sonoras, tales como el enmascaramiento, la terapia de re-entrenamiento (TRT), la terapia discriminativa (ADT), y la terapia por cambio de fase.

El objetivo de las terapias sonoras es producir en los pacientes cambios plásticos que puedan dar lugar a *habituaación* y/o a *inhibición residual*. La habituación actúa más sobre los sistemas límbico y autónomo, de tal modo que, aunque el paciente percibe su acúfeno, es capaz de convivir con él, eliminando las connotaciones que inciden negativamente sobre su calidad de vida. La inhibición residual es la disminución, o desaparición, de la sensación del acúfeno cuando cesa el estímulo. La inhibición puede durar desde unos pocos segundos hasta días. No se entiende todavía bien la dependencia de la inhibición con los parámetros del estímulo, tales como espectro, intensidad y duración. Es por eso que han surgido tantas terapias sonoras.

El objetivo de este trabajo es hacer una revisión de las terapias sonoras más conocidas, enfatizando en los fundamentos acústicos de la terapia por cambio de fase. En la Sección 2 se revisan las terapias por enmascaramiento, por re-entrenamiento (TRT) y por discriminación auditiva. En la Sección 3, se analiza la terapia por cambio de fase, se discuten los fundamentos en los que se basa su funcionamiento, e incluso se proponen algunas mejoras.

## 2 Terapias sonoras del acúfeno

### 2.1 Enmascaramiento

La aplicación del enmascaramiento sonoro para paliar los acúfenos se remonta a Vernon en la Universidad de Oregon a mediados de los 70. Aunque el primero en aplicar el enmascaramiento al tinnitus fue Jean Marie Gaspar Itard en 1825. Itard sugería a los pacientes sentarse ante un fuego de madera verde para paliar su acúfeno. Itard también reconocía que el ruido que produce una cascada de agua es un enmascarador muy efectivo. Vernon concibió la idea de incluir circuitos generadores de ruido de banda ancha en los audífonos, lo que dio lugar al primer enmascarador comercializado por Zenith. Después han surgido enmascaradores más sofisticados que incluyen el ajuste de la banda de frecuencias al acúfeno del paciente, e incluso la cancelación de fase.

El enmascaramiento convencional se refiere al fenómeno de la eliminación de la percepción del acúfeno en presencia de un segundo estímulo sonoro. Típicamente, el enmascarador ha de tener un contenido frecuencial similar al del acúfeno para mantener su intensidad baja. Este era un requisito fundamental en los primeros enmascaradores debido a las restricciones en el consumo de las baterías. El oído interno está dividido en filtros de bandas críticas. Si el sonido enmascarador y enmascarado están dentro de la misma banda crítica, la intensidad del enmascarador puede ser mantenida relativamente baja. La capacidad de filtrado de la membrana basilar se maximiza cuando un tono aplicado externamente cae dentro de la misma banda crítica que el sonido asociado al acúfeno. Haciendo un barrido en la frecuencia del tono enmascarador se puede obtener la curva de sintonización psicofísica del

acúfeno, similar a la respuesta esperada de la fibra del nervio auditivo asociada con la banda crítica.

Por desgracia, el enmascaramiento del acúfeno parece diferir bastante de la curva de sintonización psicofísica. Se ha demostrado que el tinnitus no se puede enmascarar como un tono cualquiera. En realidad, hay que usar una banda ancha de frecuencias. Estas curvas de banda ancha sugieren que el acúfeno no es procesado como un tono puro. El acúfeno y el enmascarador interactúan en el sistema auditivo central. Esta idea es reforzada por el hecho de que en muchos pacientes, el enmascaramiento ipsilateral sea tan efectivo como el contralateral, sugiriendo una interacción a nivel cortical.

## **2.2 Terapia de re-entrenamiento (TRT)**

La terapia de reentrenamiento del acúfeno (TRT) está basada en el modelo neurofisiológico de Jastreboff. El objetivo final de cualquier tratamiento del tinnitus es que este cese de tener un impacto negativo en la vida del paciente.

La habituación puede conseguirse mediante varias aproximaciones, incluyendo el consejo médico y psicológico, la medicación, la hipnosis, etc. Sin embargo, la terapia de habituación más simple incluye la combinación del consejo médico con la terapia sonora (TRT). El consejo médico actúa disminuyendo el nivel de estimulación de las áreas corticales del cerebro a los sistemas límbico y autónomo. Esto requiere que el paciente acepte las siguientes ideas (Jastreboff y Jastreboff, 2000):

- La percepción del tinnitus resulta de una compensación del sistema auditivo.
- El tinnitus es un problema debido a la activación de los sistemas límbico y autónomo.
- Es posible habituarse a las reacciones y a la percepción del acúfeno usando la plasticidad del sistema nervioso.

Es muy importante ser consciente de que las reacciones inducidas por el acúfeno están gobernadas por el principio del reflejo condicionado, requiriendo por tanto un periodo de tiempo largo para su extinción gradual.

La terapia sonora proporciona una ayuda significativa en el proceso de habituación, reduciendo la intensidad de la actividad neuronal inducida por el acúfeno dentro del sistema auditivo, y la que relaciona los sistemas auditivo, límbico y autónomo. Específicamente, la terapia sonora actúa proporcionando al sistema auditivo un estímulo de bajo nivel para:

- Reducir el contraste entre la actividad neural de fondo y la actividad neural relacionada con el acúfeno.
- Interferir con la detección de la señal del acúfeno.
- Reducir la ganancia patológica debida al acúfeno dentro de la vía auditiva.

Todos nuestros sentidos actúan por el principio del gradiente, o de la diferencia entre una señal y su fondo. El mismo sonido parece más fuerte en ausencia de otros sonidos (de noche, por ejemplo). Entonces, ya que no se puede reducir la actividad neural del acúfeno, se puede incrementar la actividad neural relacionada con el ruido de fondo, exponiendo al paciente a estímulos de intensidad baja, haciendo más fácil la habituación.

Para intensificar el ruido de fondo se pueden usar audífonos o generadores de sonido especialmente diseñados. En este sentido, el enmascaramiento es contraproducente, ya que para que el paciente se habitúe al acúfeno tiene que percibirlo. Por eso, el enmascaramiento

no produce ninguna habituación ni inhibición residual: cuando cesa el sonido enmascarador, el paciente vuelve a oír su acúfeno.

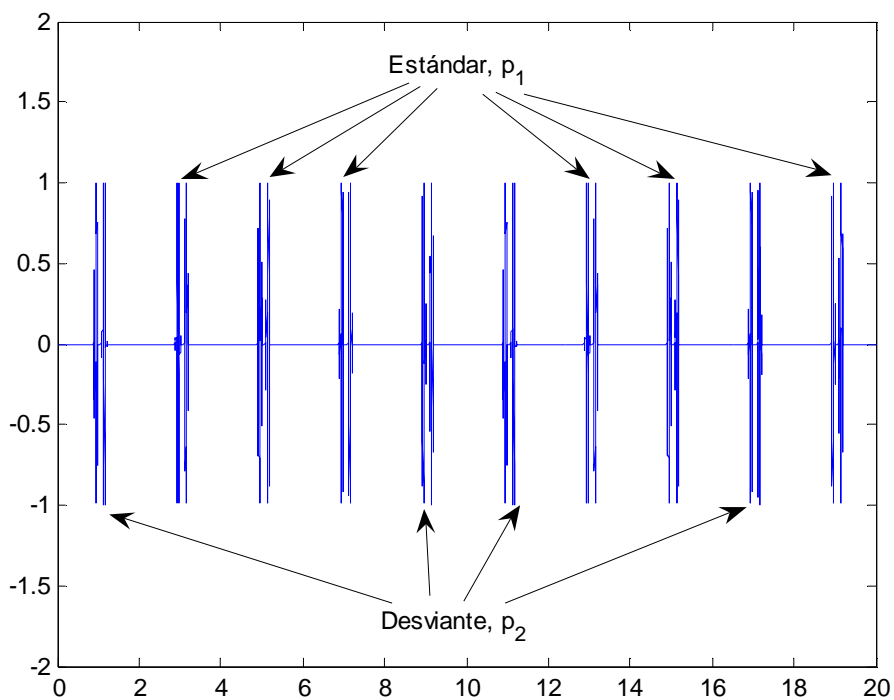
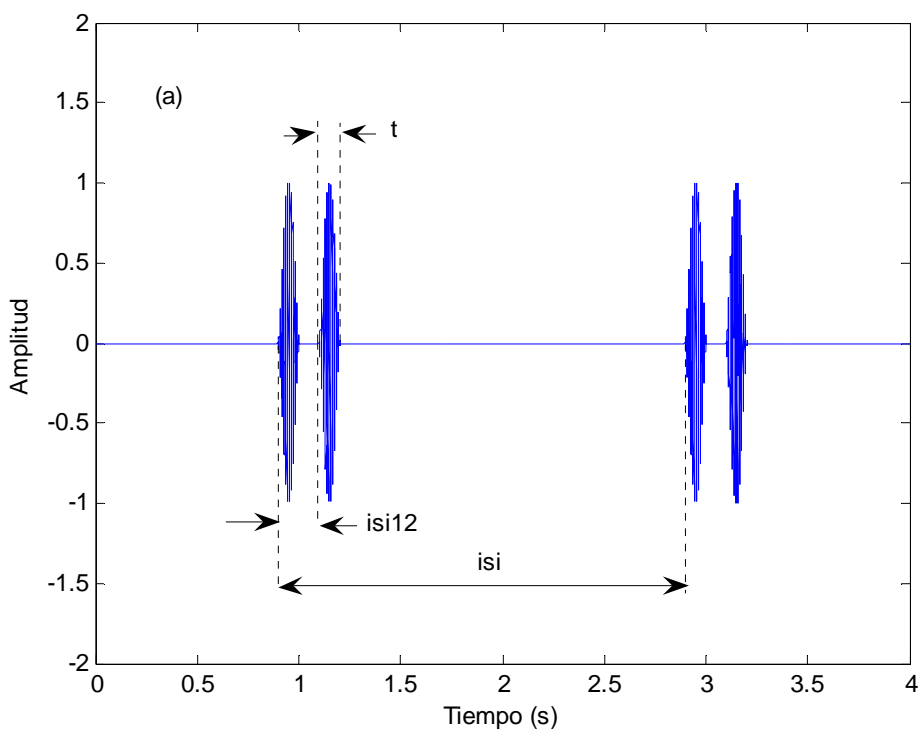
### 2.3 Terapia de discriminación auditiva (ADT)

Al contrario que la TRT, que no requiere la realización de ninguna tarea relacionada con el estímulo por parte de los pacientes, la terapia de discriminación auditiva (ADT) necesita la atención del paciente al estímulo, y la discriminación de alguna de sus características. La gran mayoría de los trabajos publicados sobre ADT usan paradigmas *oddball* como estímulos. Estos paradigmas consisten en estímulos sonoros compuestos de pulsos estándar y desviantes, presentados de manera aleatoria. El paciente ha de anotar de qué tipo de pulso se trata (estándar o desviante). La Figura 1 muestra un ejemplo de estos estímulos en los que tanto la duración del impulso,  $t$ , la interlatencia entre impulsos de cada par,  $isi$ , la interlatencia entre pares de impulsos,  $isi/2$ , y las probabilidades de aparición de pares de impulsos estándar,  $p_1$ , y desviantes,  $p_2$ , son parámetros variables.

Flor *et al.* (2004) aplicaban la ADT a un grupo de 12 pacientes de acúfenos. El tratamiento se llevaba a cabo durante 4 semanas, 2 horas al día. Durante cada ensayo, se presentaban aleatoriamente a los pacientes pares de tonos a frecuencias próxima y alejada de la frecuencia de su acúfeno. Los pacientes tenían que decidir si los pares de tonos eran iguales o no. En un 50 % de los ensayos, las frecuencias de ambos tonos eran distintas, y en el 50 % restante eran idénticas. La dificultad de la tarea ( $\Delta f$ ) era ajustada de modo que el porcentaje de aciertos estuviera entre el 70 y el 90 %. La eficacia de la ADT dependía del tiempo de entrenamiento. Aquellos pacientes que se sometieron a 26 sesiones durante el periodo de 4 semanas experimentaron una reducción en la severidad de su acúfeno. Por el contrario, los pacientes que se sometieron a un entrenamiento más corto durante el periodo de las cuatro semanas, experimentaron un empeoramiento.

Herráiz *et al.* (2006) aplicaban la ADT a 14 pacientes de acúfenos con un paradigma *oddball* distinto. En este caso, el estímulo desviante era un pulso de 8 kHz y 50 ms de duración (15 % de probabilidad), y el estándar un ruido blanco de 500 ms (85 % de probabilidad). Los pacientes fueron expuestos a estos estímulos durante 30 días, dos veces al día, 10 minutos cada ensayo. Había 5 pistas distintas, y el paciente debía oír pistas desiguales en cada ensayo. Mientras oía los estímulos, debía anotar si era un estándar o un desviante. Cuando se aplicó esta terapia a 27 pacientes de tinnitus y 26 pacientes de control (Herráiz *et al.*, 2007), se constató que el tinnitus mejoró en un 40 % de los pacientes.

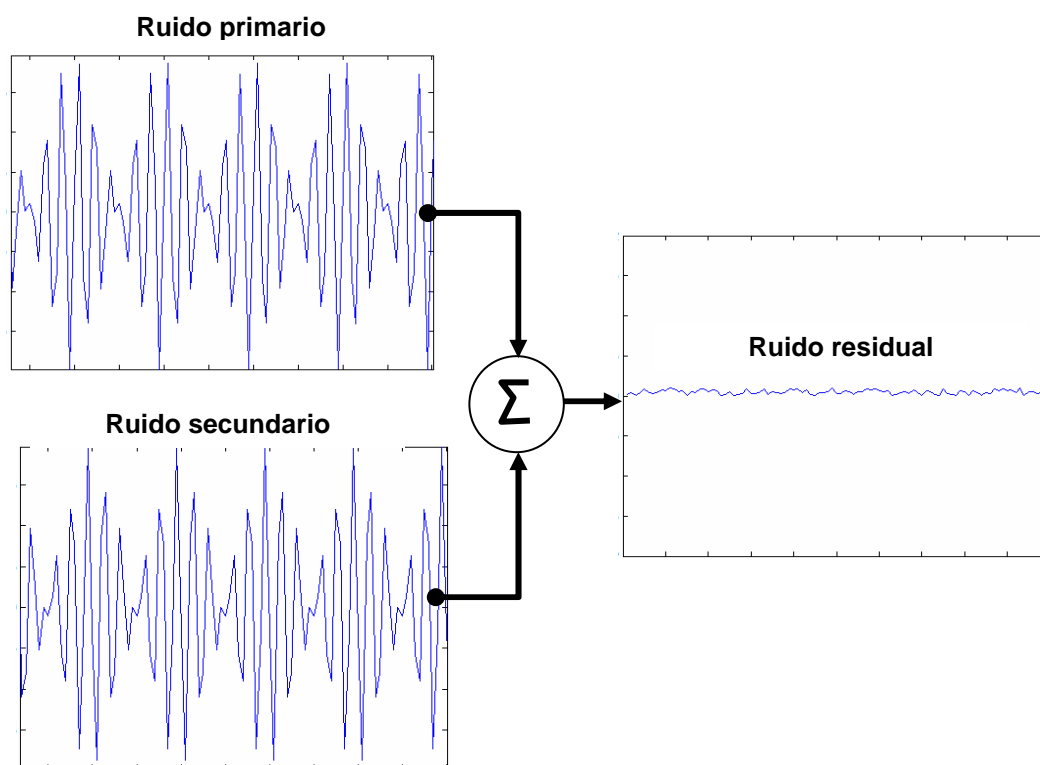
Herráiz *et al.* (2008) aplicaron también la terapia ADT con pares de impulsos estándar y desviantes muy similares a los usados por Flor *et al.* (2004). Se sintetizaron estímulos en los que impulsos estándar, a frecuencias de 4, 6 y 8 kHz, eran mezclados aleatoriamente con impulsos desviantes. Los ensayos de Herráiz *et al.* (2008) se llevaron a cabo sometiendo a 11 pacientes a estímulos a la frecuencia de su acúfenos  $\pm 0.5$  kHz (SAME) y a otros 11 pacientes a estímulos distintos de su acúfeno (NONSAME). Los resultados para la respuesta subjetiva (RESP) el VAS y el THI mostraron que la RESP era positiva para un 45.5 %, aunque el VAS y el THI no experimentaran una mejora significativa. Curiosamente, cuando se analizan los resultados por grupos, NOSAME mostraba una mejora más significativa que SAME.



**Figura 1.** Parámetros de los estímulos del paradigma oddball. (a) Duración, interlatencia de cada uno de los impulsos, e interlatencia de las parejas de impulsos. (abajo) Probabilidades de cada una de las parejas de estímulos.

### 3 Terapia sonora por cambio de fase

La terapia por cambio de fase está basada en la teoría del control activo del ruido. Se trata de provocar la interferencia destructiva entre un ruido primario y otro secundario en contrafase (Cobo, 1997). La Figura 2 ilustra el principio del funcionamiento de un sistema de control activo del ruido. Si sumamos una señal (ruido primario) con su misma versión cambiada de signo (ruido secundario o antirruído), el ruido residual resultante estará muy atenuado. Este principio se aplica en sistemas comerciales, tales como los protectores auditivos activos, y los sistemas activos de control del ruido en conductos.



**Figura 2.** Ilustración del principio de interferencia destructiva.

Estos sistemas se implementan por realimentación (feedback) o por anticipación (feedforward) (Cobo, 1997). Ambos sistemas requieren la medida del ruido primario que se pretende cancelar, usando algún tipo de sensor acústico, como por ejemplo un micrófono. Así pues, la aplicación de este principio a la cancelación del acúfeno tiene una dificultad importante: no se dispone de la señal a cancelar. El acúfeno resulta de la actividad del sistema nervioso auditivo, sin una vibración mecánica que los sustente. Por tanto, no se puede medir mediante un sensor.

Lo que se puede hacer es una especie de sistema de *control activo ciego*. Esta terminología es usual en teoría de tratamiento de señal, cuando no se dispone de la propia señal. Se trataría de diseñar un sistema que generase una señal ajustable en frecuencia y amplitud, de tal modo que el paciente pudiera sintonizar dicha señal a su acúfeno. Una vez sintonizadas la frecuencia y la amplitud, se puede variar la fase hasta conseguir la atenuación deseada.

Este sistema funcionaría mejor cuanto más simple sea la forma de onda del acúfeno, por ejemplo con acúfenos tonales. Esta es la idea patentada por Choy (2004, 2007). El aparato patentado por Choy consiste en un dispositivo que, manejado por un especialista, ajusta una señal tonal a la frecuencia y amplitud del acúfeno del paciente. A partir de esta señal, diseña un estímulo que dura 30 minutos, y que consiste en la aplicación de la señal con un desfase secuencial de 6° cada 30 segundos. Según los distribuidores de este aparato, la aplicación de este tratamiento tres veces por semana (la frecuencia puede variar según las circunstancias y respuesta del paciente), durante un periodo de tiempo, produce una inhibición residual significativa en un porcentaje alto de pacientes. El tratamiento incluye unas pocas sesiones en la consulta del especialista. A continuación se le proporciona al paciente un CD para que lo escuche en casa.

Lipman y Lipman (2007) aplicaban este tratamiento a 61 pacientes con acúfeno tonal predominante, con 2 semanas de control y 2 semanas de terapia de cambio de fase. El 57 % de los pacientes manifestaron una mejora en su acúfeno (el 37 % disminuyeron un grado en la escala THI, y el 5 % dos grados). Vermeire *et al.* (2007) aplicaron este tratamiento durante seis semanas a 35 pacientes, previamente tratados sin éxito con otras terapias. Un 60 % respondió favorablemente a la terapia del cambio de fase.

La diferencia esencial entre el tratamiento del acúfeno por cambio de fase y el control activo del ruido es que en el segundo la interferencia se produce entre dos señales físicas, los ruidos primario y secundario, mientras que en el primero la interferencia se produce en el sistema auditivo central. Por tanto, aquí resulta esencial la forma en la cual el sistema auditivo central codifica la fase de una señal armónica.

La precisión en la determinación de la frecuencia, amplitud y fase de una señal armónica es fundamental para el éxito de la cancelación activa. Sean

$$\begin{aligned} p_p(t) &= A_p \sin(2\pi ft + \phi_p) \\ p_s(t) &= A_s \sin(2\pi ft + \phi_s) \end{aligned} \quad (1)$$

dos señales armónicas de la misma frecuencia,  $f$ , amplitudes  $A_p$  y  $A_s$ , y fases  $\phi_p$  y  $\phi_s$ . La Figura 3 muestra el nivel en decibelios de la señal que resulta de la interferencia entre ambas, calculada como

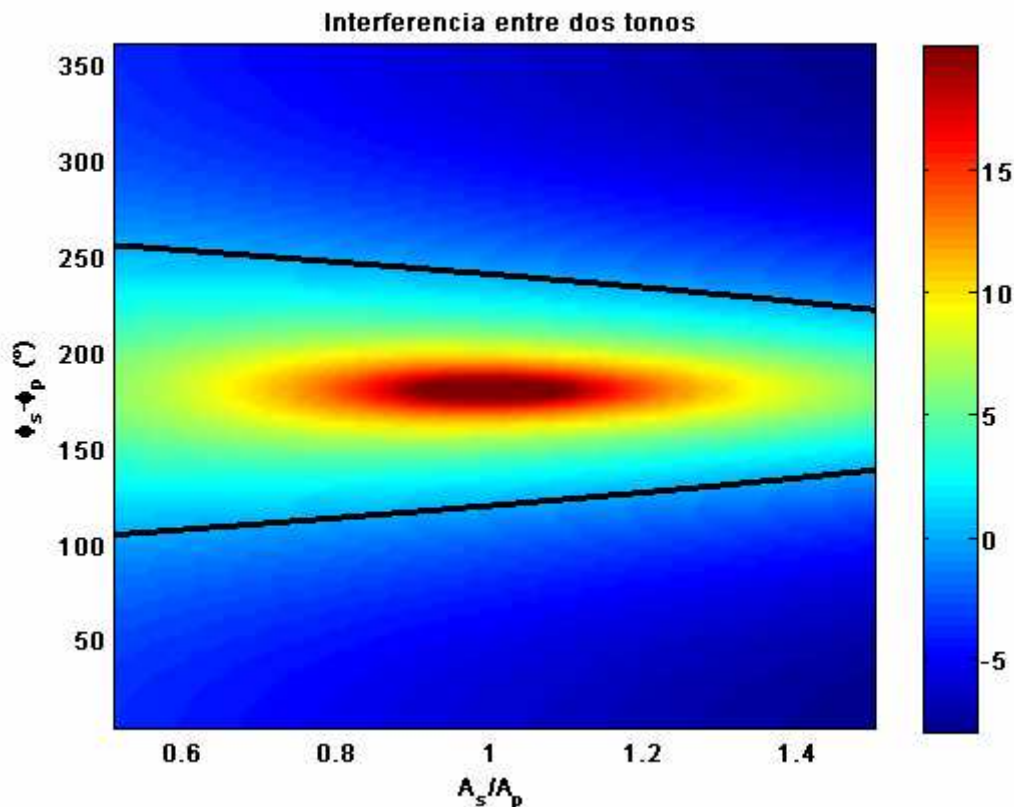
$$A_u = 20 \log \left( \frac{P_p}{P_p + P_s} \right), \quad (2)$$

donde  $P_p$  y  $P_s$  denotan los módulos espectrales de  $p_p$  y  $p_s$ , respectivamente, para  $f=4$  kHz. La línea gruesa corresponde al contorno cero. Es decir, dentro del área del contorno cero se produciría cancelación, y fuera refuerzo. De esta Figura se puede deducir:

- Cuando la amplitud de la onda secundaria iguala exactamente a la de la primaria, se produce cancelación entre  $120^\circ < \phi < 240^\circ$  y refuerzo para el resto de desfases. La máxima cancelación se produce para  $\phi=180^\circ$ .
- El margen de diferencias de fase se agranda para  $A_s < A_p$ , y se achica para  $A_s > A_p$ .

Así pues, tal como se aplica el tratamiento por cambio de fase, cubriendo un cambio de fase de  $360^\circ$ , a incrementos de  $6^\circ$  cada 30 segundos, asumiendo que las sonoridades del

acúfeno y la de la terapia son exactamente las mismas, parece que durante una parte del tratamiento se va a producir atenuación y durante otra refuerzo. Es verdad que la cantidad de atenuación va a ser mayor que la de refuerzo. Si las sonoridades del acúfeno y del estímulo con cambio de fase no son iguales, entonces el margen de desfases en el que se van a producir atenuaciones se incrementa (reduce) a medida que se reduce (aumenta) la sonoridad del estímulo, aunque la máxima atenuación va a ser siempre menor.



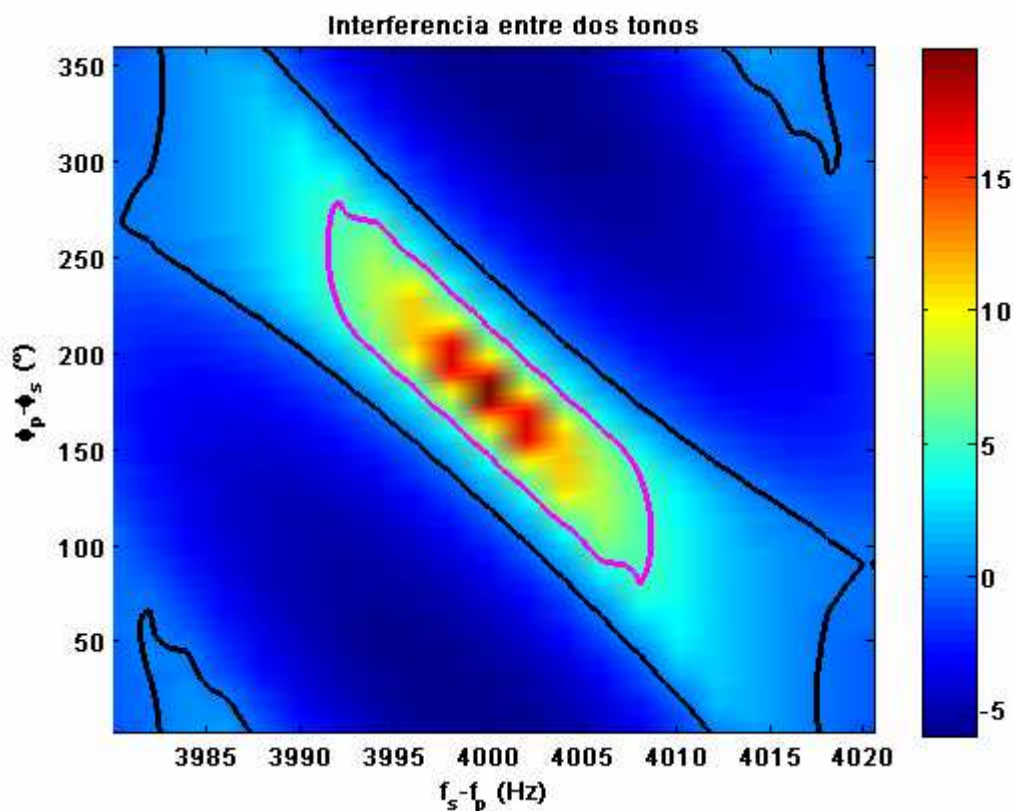
**Figura 3.** Atenuación de un tono de 4 kHz por otro tono en función de la relación entre amplitudes y desfase entre ambos.

También se puede analizar como afecta un pequeño error en la frecuencia de la onda secundaria en la efectividad de la interferencia destructiva. Para ello, sean ahora

$$\begin{aligned} p_p(t) &= \sin(2\pi f_p t + \phi_p) \\ p_s(t) &= \sin(2\pi f_s t + \phi_s) \end{aligned} \quad (3)$$

dos señales armónicas de la misma amplitud, frecuencias  $f_p$  y  $f_s$ , y fases  $\phi_p$  y  $\phi_s$ . La Figura 4 muestra el nivel en decibelios de la señal que resulta de la interferencia entre ambas, calculada usando la Ec. (2). Las líneas gruesas de color negro y magenta muestran los contornos 0 dB y 5 dB, respectivamente.





**Figura 4.** Atenuación de un tono de 4 kHz por otro tono en función de la diferencia entre las frecuencias y las fases de ambos.

De esta Figura se puede deducir lo siguiente:

- El margen de frecuencias de cancelación, alrededor de la frecuencia del tono primario, es bastante estrecho ( $\pm 20$  Hz). Por tanto, la precisión en la determinación del tono del acúfeno es primordial para el éxito del tratamiento por cambio de fase.
- El margen de fases de cancelación es más amplio, aunque para que se produzca una atenuación superior a 5 dB este margen es de  $90^\circ < \Delta\phi < 270^\circ$ .

Del análisis anterior se concluye que para el éxito de la terapia por cambio de fase son primordiales la precisión en la determinación de la frecuencia e intensidad del acúfeno, así como de la fase del estímulo generado. Así pues, una posible mejora del sistema comercial existente sería la implementación digital del dispositivo, usando por ejemplo un DSP.

#### 4 Resumen y conclusiones

Del análisis de todas estas terapias se puede concluir lo siguiente:

- Del análisis de la literatura, no se deducen claramente cuales son las bases físicas-audiológicas del funcionamiento de estas terapias.
- Sería de mucha utilidad un aparato que implementara todas las terapias conocidas, y que facilitara un estudio clínico de intercomparación entre ellas.

## Referencias

- Choy, D. (2004). "Method and apparatus for treatment of monofrequency tinnitus utilizing sound wave cancellation techniques". Patente WO 2004/017675 A1.
- Choy, D. (2007). "Method and apparatus for treatment of predominant-tone tinnitus". Patente US 2007/0093733 A1.
- Cobo, P. (1997). "Control Activo del Ruido. Principios y Aplicaciones". Editorial CSIC, Colección Textos Universitarios Nº 26, Madrid, España.
- Flor H.; Hoffmann D.; Struve M.; Diesch E.; (2004). "Auditory discrimination training for the treatment of tinnitus". *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 29, 113-120.
- Herráiz C.; Diges I., Cobo P.; Plaza G.; Aparicio J.M. (2006). "Auditory discrimination therapy (ADT) for the tinnitus management: preliminary results". *Acta Otolaryngol.*, 126, 80-83.
- Herráiz, C.; Diges, I.; Cobo, P. (2007). "Auditory discrimination therapy (ADT) for tinnitus management". *Prog. Brain Res.*, 166, 467-471.
- Herráiz, C.; Diges, I.; Cobo, P.; Aparicio, J.M.; (2008). "Cortical reorganization and tinnitus: principles of Auditory Discrimination Therapy (ADT) for tinnitus management". In press in *Eur. Arch. Oto-Rhino-L.*
- Jastreboff P. J.; Jastreboff M.M. (2000). "Tinnitus Retraining Therapy (TRT) as a method for treatment of tinnitus and hyperacusis patients". *J. Am. Acad. Audiol.*, 11, 162-177.
- Lipman, R.I.; Lipman, S.P. (2007). "Phase-shift treatment for predominant tone tinnitus". *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 136, 763-768.
- Vermeire, K.; Heyndrickx, K.; De Ridder, D.; Van de Heyning, P. (2007). "Phase shift tinnitus treatment : an open prospective clinical trial". *B-ENT, Supp.* 7, 65-69.