

# Estímulos auditivos para la generación de PEAee

## Auditory stimuli for PEAee generation's

LELY LUENGAS

Ingeniera Electrónica, de la Universidad Autónoma de Colombia, Especialista en Pedagogía y Docencia Universitaria, Magíster en Ingeniería Eléctrica. Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: lelyluco@gmail.com

GIOVANNI SÁNCHEZ

Ingeniero Electrónico, Universidad Autónoma de Colombia, Especialista en Pedagogía y Docencia Universitaria. Docente Universidad de San Buenaventura. Correo electrónico: giosanpri@gmail.com

Clasificación del artículo: reflexión (Re-creaciones)

Fecha de recepción: 20 de enero de 2008

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2008

**Palabras clave:** potenciales evocados de estado estable, estimulación de múltiples frecuencias, umbrales auditivos, Matlab.

**Key words:** steady state evocated potentials, stimuli frequency, audiology, matlab.

### RESUMEN

La audición se considera como el sentido más importante, porque la vía habitual para adquirir el lenguaje es a través del oído. Con el lenguaje, las personas se ponen en contacto con sus semejantes, se adquiere información y conocimiento de elementos a distancia y ha sido uno de los principales participes en el desarrollo de la sociedad.

La función auditiva se establece a través de la interacción de un sistema complejo que comprende varios niveles: periferia, vías neurales y áreas corticales. Una lesión en cualquiera de ellos puede producir hipoacusia, déficit funcional disminución de la percepción auditiva. Para determinar el nivel

de hipoacusia nació la audiometría, que ha generado varios métodos de exploración.

Este artículo describe un sistema diseñado e implementado para producir un tipo de estímulo adecuado que permita detectar el nivel de hipoacusia de personas en diferentes frecuencias, las cuales se exploran audiométricamente, variando la intensidad del estímulo de acuerdo con los parámetros requeridos por los audiólogos, de esa forma, el tiempo de exploración auditiva en ambos oídos se reduce, pues con un estímulo se exploran ambos oídos en la gama audiométrica.

El equipo desarrollado se conectará a un equipo de registro de potenciales evocados existente, con el fin de comprobar que las señales generadas cum-

plen con las características dadas en la literatura existente y experta en el tema abordado.

## ABSTRACT

Hearing is considered like the most important sense because the habitual route to acquire the language is through ear. With the language the people put themselves in contact, acquire data and knowledge from remote elements and have been one of the main ones you participate in the development of the society.

The auditory function settles down through the interaction of a complex system that includes se-

veral levels: neural periphery, routes and cortical areas. An injury in anyone of them can produce hypoacoustic, functional deficit diminution of the auditory perception. In order to determine the level of hypoacoustic the audiometry was born generating several methods of exploration.

This article describes a system able to generate stimulus for to detect the hypoacoustic level. The proposed system uses a seldom considered technique: multiple stimulation frequencies and the steady state evocated potentials (PEAee) is suggested.

\* \* \*

## 1. Introducción

Se define audición como la percepción de cierta clase de estímulos vibratorios, los cuales son captados por el oído y van a impresionar el área cerebral correspondiente, tomado el individuo conciencia de ellos; este fenómeno fisicosicológico de percepción a distancia desarrolla dos fenómenos: el fisiológico por el cual el órgano de Corti se impresiona enviando un mensaje sonoro hacia el centro y la corteza; y el fenómeno psiquicocortical mediante el cual se compromete el conjunto de sonidos, se analiza y se archiva. Si no está expedito y normal este camino no habrá audición [1].

Por la importancia de la audición en el hombre, ésta ha abierto un campo de estudio para investigar el estado de audición de una persona, la audiometría, que al avanzar el tiempo ha abierto las áreas de exploración, es decir, en la actualidad la audiometría permite también:

- Establecer un topodiagnóstico para mostrar el sitio de lesión de la vía auditiva.
- Descubrir simuladores y disimuladores, personas que se benefician al ocultar o simular una hipoacusia.

- Determinar el grado de invalidez auditiva, causada por accidentes o criminalidad.
- Explorar restos auditivos.
- Dirigir la prescripción de prótesis.

La audiometría convencional hace uso de técnicas psicofísicas, aquéllas que son utilizadas en la exploración del aparato auditivo hacen uso de una respuesta consciente y voluntaria del individuo, y proporcionan información variable en ciertos casos particulares (simuladores, psicóticos, etc.) y no se pueden aplicar en neonatos, por la cooperación que se requiere de ellos. Además, el tiempo empleado en el examen es elevado y el examinador requiere de alta experticia.

Debido a lo anterior, se ha visto la necesidad de obtener información cada vez más exacta del receptor auditivo y su vía, para ello se han desarrollado métodos objetivos que exploran el sistema sensorial, basados en el estudio de un reflejo o respuesta incontrolada de un sujeto. Hasta el momento se han descrito varias técnicas electrofisiológicas para realizar audiometrías objetivas detalladas por frecuencias, la más reciente y más prometedora en

el campo audiométrico es la que emplea potenciales evocados auditivos (PEA).

Los potenciales evocados (PE) se definen como fluctuaciones de voltaje en el tiempo, los cuales son generados en el sistema nervioso en respuesta a un estímulo [2] y constituyen una herramienta diagnóstica importante para la evaluación del sistema nervioso y las diferentes vías sensoriales. Una de las aplicaciones clínicas de mayor importancia se tiene en la pediatría, pues permiten el diagnóstico temprano de trastornos de audición, sin contar con la cooperación del sujeto, no se ven afectados por el sueño o la sedación y se detectan a intensidades de estimulación cercanas al umbral de audibilidad (mínima intensidad sonora perceptible) [3]. En la figura 1 se muestra el registro de un potencial evocado transitorio.



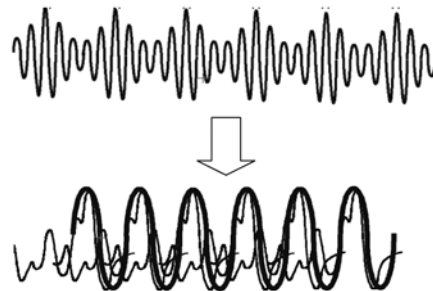
**Figura 1.** Forma de onda de una señal de un potencial evocado auditivo transitorio.

Fuente: [5]

Los PEA se clasifican de acuerdo con el periodo de tiempo en que ocurren sus componentes, medidos a partir de la presentación del estímulo [4] en respuestas transientes: PEA de corta latencia (PEACL), de media latencia (PEAML), de larga latencia (PEALL) y tardíos; respuestas sostenidas: potencial microfónico colinear y potencial de sumación; y respuestas de estado estable: respuesta seguimiento de frecuencia, PEA de estado estable (PEAee). Los más utilizados y estudiados han sido los de corta latencia, pues su estímulo es de tan solo un clic, lo que permite detectar el umbral auditivo, pero la respuesta tiene limitaciones en la evaluación selectiva de frecuencia [5]; desde hace algunos años se ha venido explorando el uso de los potenciales

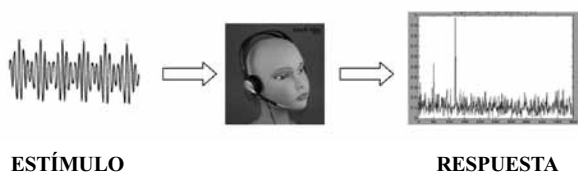
de estado estable, ya que permiten la determinación de umbrales por frecuencias.

Los PEAee son señales cuasi senoidales que ocurren cuando un estímulo repetitivo evoca una forma de onda eléctrica, cuyas componentes frecuenciales se mantienen constantes en amplitud y fase sobre prolongados periodos de tiempo; las respuestas de estado estable se producen cuando los estímulos se presentan a una frecuencia lo suficientemente rápida para que la respuesta a uno de los estímulos se superponga a la respuesta del estímulo siguiente [6]. Es decir, al estimular el sistema auditivo con una frecuencia lo bastante rápida la respuesta transiente provocada por un estímulo se superpone a las del estímulo precedente generando una señal aproximadamente sinusoidal, esto se observa en la figura 2.



**Figura 2.** En la parte superior se muestra una señal modulada empleada para estimular el oído y en la parte inferior la respuesta obtenida, se observa la forma cuasi-senoidal del potencial evocado.

Debido a la periodicidad presentada, la respuesta se puede evaluar usando técnicas cuantitativas basadas en el análisis de frecuencia (transformada rápida de Fourier, FFT), así se representa como un pico espectral circunscrito a la frecuencia de estimulación; en la figura 3 se tiene una señal modulada en amplitud que estimula el sistema auditivo de una persona y la respuesta obtenida en el dominio de la frecuencia.



**Figura 3.** En la respuesta en frecuencia se tiene un pico en la frecuencia de la moduladora, luego de estimular el oído con una señal modulada en amplitud.

En respuesta a tonos senoidales modulados en amplitud a ratas entre 70 y 110 Hz, las respuestas de estado estable se pueden registrar en el cuero cabelludo [7] y se representan por picos espectrales en la frecuencia de modulación, esto debido a las propiedades fisiológicas del sistema auditivo y del oído interno, el cual actúa como un rectificador de media onda [8]. Al utilizar diferentes tonos modulados, se puede explorar el sistema auditivo en una amplia gama frecuencial, pero el tiempo empleado tiende a ser elevado.

Al estimular con una señal acústica compleja el resultado de la sumatoria de múltiples tonos modulados, cada uno de ellos con frecuencia de modulación diferente, el oído interno los rectifica de manera independiente y la respuesta generada queda representada como serie de picos en el espectro –uno a cada una de las frecuencias de modulación utilizadas–. Así, se pueden explorar simultáneamente varias regiones de la cóclea y ambos oídos, reduciendo considerablemente el tiempo de exploración al tener una audiometría completa detallada por frecuencia sólo con un registro por cada intensidad de estimulación [9]. A esta técnica se le conoce como Multifrecuencia.

Las ventajas presentadas por los PEAAe son:

- Posibilidad de determinar umbrales específicos por frecuencias [10], [11], [14].
- Al estimular simultáneamente ambos oídos se reduce el tiempo de exploración.

- Es una técnica que no requiere cooperación del individuo examinado ni experticia del examinador, por tanto, es completamente objetiva.
- La respuesta no se pierde por la sedación o el sueño, como se presenta en otros tipos de potenciales.

## 2. Metodología

Se requiere contar con una señal de múltiples frecuencias moduladas, compuesta de tonos continuos modulados en amplitud con frecuencias portadoras que cubran el espectro auditivo y frecuencias moduladoras menores a 110 Hz y mayores a 70 Hz [11], lo cual se puede lograr si se hace uso de un software especializado en manejo matemático que permita generar las señales específicas, sin presentar distorsión [12].

Cada estímulo de amplitud modulada (AM) se obtiene multiplicando dos ondas seno; la onda seno con frecuencia más alta ( $f_c$ ) es la portadora, la onda seno con la frecuencia más baja ( $f_m$ ) forma la envolvente. La fórmula completa para la modulación se da en la ecuación (1).

$$\frac{a * \text{sen}(2\pi f_c t + \varnothing_c) * (m * \text{sen}(2\pi f_m t + \varnothing_m) + m)}{(1 + m)} \quad (1)$$

En (1):

$a$ : es la amplitud de la portadora  
 $m$ : la cantidad de modulación (desde 0.0 hasta 1.0)  
 $\varnothing_c$  y  $\varnothing_m$ : las fases de las dos ondas seno.

Con amplitud igual a uno, 100% de modulación y fases en cero, la fórmula para la señal tendrá una ecuación como la mostrada en (2).

$$\frac{\text{sen}(2\pi f_c t) * (\text{sen}(2\pi f_m t + 1))}{(2)} \quad (2)$$

Las frecuencias portadoras elegidas fueron 500, 1.000, 2.000 y 4.000 Hz, pues son las utilizadas en los registros audiométricos convencionales y las frecuencias moduladoras entre 77 y 104 Hz, esto con el fin de no tener una pérdida significativa en la amplitud de la respuesta suministrada; además, no se ven afectadas por el sueño o la sedación [3],[13], se debe aclarar que las portadoras están separadas por una octava para evitar la interferencia entre estímulos.

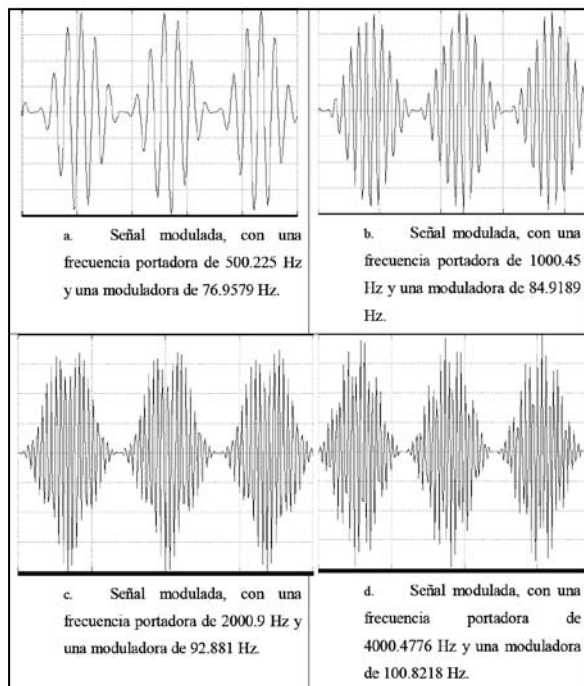
Para eliminar el ruido de artefacto, también conocido como artefacto acústico, se requiere tener un número entero de ciclos en una sección de estímulo, por tanto, las frecuencias portadoras y las moduladoras se han ajustado, quedando la distribución como se muestra en la tabla 1, respetando la separación mínima entre frecuencias.

Portadora (Hz)	Moduladora (Hz) oído izquierdo	Moduladora (Hz) oído derecho
500.225	76.9579	80.938
1000.45	84.9189	88.8995
2000.9	92.881	96.86
4000.4776	100.841	104.8218

**Tabla 1.** Distribución de frecuencias para cada oído.

Las señales se realizaron utilizando las ecuaciones matemáticas descritas –ecuación (2)– y las frecuencias dadas en la tabla 1, implementadas en el software MATLAB, obteniendo para el oído derecho los estímulos mostrados en la figura 4 y en la figura 5 los del oído izquierdo, cada oído y cada frecuencia por ser evaluada cuenta con una señal moduladora diferente; de esta forma, al capturar la respuesta del oído se podrá observar el rango deficiente, la separación entre las frecuencias moduladoras es de 4 Hz.

Las frecuencias moduladoras se encuentran separadas entre sí por 8 Hz aproximadamente, de esa forma la respuesta al estímulo se superpone formando una señal cuasisenoidal, que es lo requerido, pero, a la vez, no hay interferencia entre los estímulos y se pueden observar los picos espectrales en las señales de respuesta.



**Figura 4.** Estímulos generados para el oído derecho.

En primera instancia, se utilizó un solo estímulo y se comparó con los datos en la literatura, así se obtuvieron resultados satisfactorios, por tanto, se prosiguió con la sumatoria de dos señales y se tuvo una resultante en los picos espectrales de las moduladoras. Luego, se realizó la sumatoria de las cuatro señales y se verificó que la respuesta es la requerida, lo que conllevó a generar las demás señales que estimularán el otro oído.

La señal requerida para la estimulación múltiple de cada oído se forma sumando los cuatro estímulos individuales modulados en amplitud. En la figura 6 se tienen las formas de onda para cada oído, se aclara que se dan los valores aproximados de las frecuencias utilizadas, pero, en realidad, se han usado los valores dados en la tabla 1.

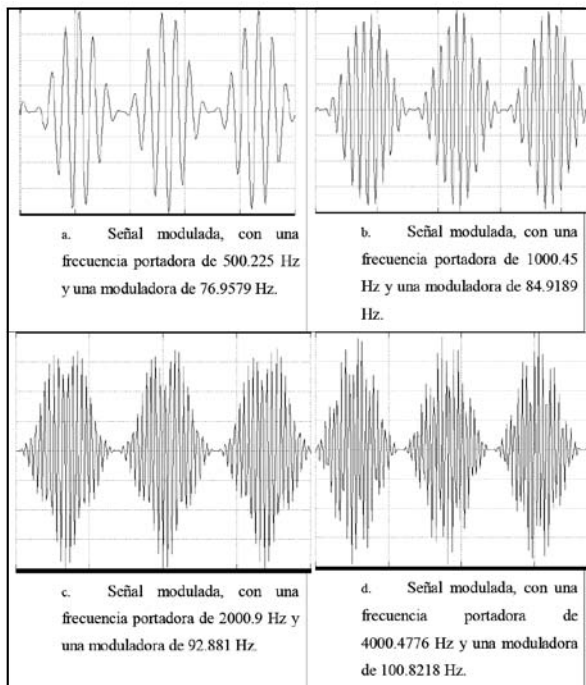


Figura 5. Estímulos generados para el oído izquierdo.

La señal obtenida matemáticamente se transforma en una señal auditiva, formato WAV, para poder tener el estímulo por aplicar en el sujeto que se va a observar. La señal tipo WAV se logra a través del software y se envía a la tarjeta de audio de un computador, para así tenerla disponible a la activación en el momento requerido y entregarla a unos audífonos adecuados de prueba.

### 3. Resultados

En primera instancia, se modularon las señales empleando frecuencias separadas 1,5 Hz, separación mínima permitida según la literatura consultada, pero se presentaron interferencias en el momento de revisar espectralmente la señal. Por tanto, se realizó la separación de cuatro hertzios, también aconsejada por algunos autores y se obtuvieron mejores resultados.

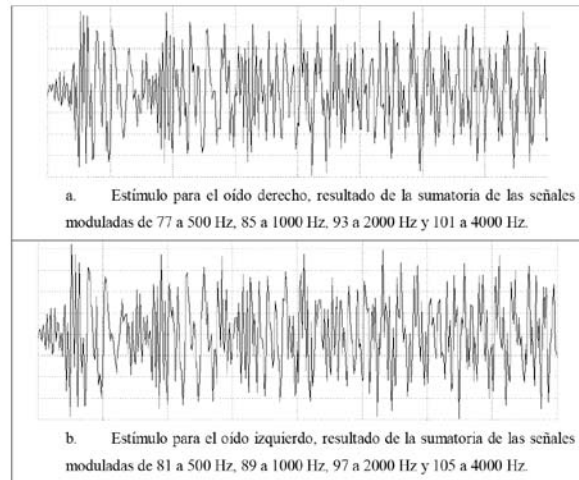
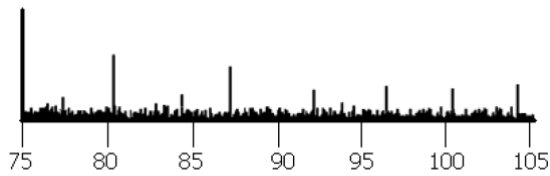


Figura 6. La sumatoria de las cuatro señales moduladas da como resultado el estímulo para cada uno de los oídos. En a se tiene la señal que estimulará el oído derecho y en b la del oído izquierdo.

Al generar la señal modulada para verificar el espectro de la audición, la forma de onda concuerda con las dadas en la literatura consultada y al realizar el análisis espectral, teniendo en cuenta el comportamiento del oído y las celdas del cabello, se comprobó el pico espectral en la frecuencia moduladora.

La sumatoria de las cuatro señales se ha convertido a formato WAV, lo que ha dado como resultado una señal audible que será utilizada para estimular a un sujeto usando auriculares que presenten las características propias de los instrumentos de medición de audiológica, para no presentar alteración de las formas de onda.

El equipo de generación de estímulos se usó en forma paralela con un equipo de registro de potenciales evocados, pudiéndose sincronizar éstos y validar las señales generadas; para ello se hizo uso el protocolo empleado por los médicos especialistas para observar el umbral auditivo; la respuesta del equipo de registro se muestra en la figura 7, en la que se observan los picos de respuesta de la señal en las frecuencias moduladoras.



**Figura 7.** Análisis espectral de la repuesta audiométrica induciendo las señales generadas en Matlab, entregado por un equipo de registro; se observan los picos en cada una de las frecuencias moduladoras.

En cuanto a la intensidad del estímulo, se inició con una amplitud de 1, pero con este valor no se tenía correspondencia con los niveles audiométricos utilizados por los audiólogos, por tanto, se varió el valor de tal forma que la señal original presentará una intensidad de 20 dB, correspondiente a la medida de umbral auditivo; a partir de ésta se generan las mismas señales variando la intensidad de acuerdo con las medidas audiométricas que se realizan normalmente, que son 40 dB, 70 dB y 100 dB. Por las necesidades del equipo de registro para obtener mediciones fiables, cada oído se estimula aproximadamente 60 veces con los diferentes niveles de intensidad, para así obtener varias mediciones y realizar una promediación de la señal registrada.

#### 4. Conclusiones

Se generaron señales auditivas haciendo uso de software especializado, MATLAB, lo cual permitió agilizar el procesamiento matemático requerido para la obtención de éstas, además también permite convertir el archivo en formato WAV para que sea audible y así estimular el sujeto que se va a estudiar. Debido a que el estímulo dura cerca de 800 ms y el registro se debe efectuar sesenta veces para cada intensidad, se observa que el tiempo empleado en estimulación es bajo, lo cual permitirá realizar audiometrías en pacientes inestables.

A través de la simulación y de la conexión con un equipo de registro de potenciales evocados, se comprueba que las señales generadas permiten determinar el umbral audiométrico, según los requerimientos de los especialistas. Con el generador de estímulos obtenido se podrá realizar un equipo completo audiométrico, que permita registrar y analizar la respuesta del examinado, determinando el nivel y la frecuencia de pérdida auditiva.

---

#### Referencias bibliográficas

---

- [1] G. De Sebastián, *Audiología Práctica*, Ed. Médica Panamericana, Madrid, 1983.
- [2] M. Ponce de León. (2001, septiembre). Caracterización objetiva de la audición residual. Presentado en el III Congreso Iberoamericano de Hipoacusia. [On line] Disponible: <http://vocesenelsilencio.org.ar/modules.php?name=News&file=article&sid=1236>
- [3] M. Dauserer, M. S. Feuerecker, B. Scheller, N. B. Pape, D. Schwender & G. E. Kuhnle, "Midlatency auditory evoked potentials in children: effect of age and general anaesthesia". *British Journal of Anaesthesia*, Oxford, 2007.
- [4] F. Collavini, *Obtención y monitoreo de potenciales evocados auditivos*, Universidad de los Andes, Bogotá, 1989.
- [5] P. Martínez-Beneito, A. Morant, M. I. Pitarch, F. J. García & J. Marco, "Potenciales evocados auditivos de estado estable a múltiple frecuencia como técnica de determinación de umbrales auditivos", *Acta Otorrinolaringol*, España, 2002.

- [6] T. Picton, O. Lins & P. Picton, “Auditory Steady-State Responses to Tones Amplitude-Modulated at 80 – 110 Hz”. *Acoustical Society of America*, Ontario, 1995.
- [7] T. Picton, S. Champagne, A. Kellet, A. Maiste & C. Skinner. (1987), “Potentials Evoked by the Sinusoidal Modulation of the Amplitude or Frequency of a Tone”. *Acoustical Society of America*, Ottawa, 1987.
- [8] J.O. Pickles *An introduction to the physiology of hearing*. Ed. Academic Press, 1982.
- [9] T. Picton & O. Lins, “Auditory Steady State Responses to Multiple Simultaneous Stimuli”, *Electroenceph Clin Neurophysiol*, Toronto, 1995.
- [10] G. Savio, M. Pérez, J. Valdes, V. Martín, C. Sierra, E. Rodríguez, et al. “Potenciales evocados auditivos de estado estable a múltiples frecuencias: Una nueva alternativa para evaluar la audición en forma objetiva”. *Acta de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello*. Santa Fe de Bogotá, 1997.
- [11] S. Middleton, A. Goli & A. Ziarani, “A Software Module for the Adaptive Estimation of Steady State Auditory Evoked Potentials”. *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS apos;06. 28th Annual International Conference of the IEEE*, New York, 2006.
- [12] S. Small & D. Stapells, “Multiple Auditory Steady-State Responses to Bone-Conduction Stimuli in Adults with Normal Hearing”. *Journal of the American Academy of Audiology*, Canada, 2005.
- [13] T. Picton, M. John, O. Lins & B. Boucher. (1998) “Multiple Auditory Steady-State Responses (MASTER): Stimulus and Recording Parameters!”. *Audiology*, Toronto, 1998.
- [14] G. Savio, M. Pérez, J. Gaya, O. Hernández & E. Mijares. “Test accuracy and prognostic validity of multiple auditory steady state responses for targeted hearing screening”. *International Journal of Audiology*. England, 2006.