

Teoría de los procesadores de audio multibanda y su influencia en el alcance en FM estéreo

Oscar Bonello, AES Fellow Member, Solidyne Labs-Buenos Aires

NOTA: Este trabajo ha sido publicado como *paper*, en inglés, por el Journal of the Audio Engineering Society, New York, Marzo 2007 (www.aes.org)

0 - INTRODUCCION

La tecnología del procesado de audio para aumentar la modulación de las emisiones de radiodifusión en AM y FM ha sido usada durante muchos años habiendo sido objeto de numerosas publicaciones. En el caso de las transmisiones de AM ha sido demostrado, hace mucho tiempo por O.Bonello [1] que el procesado aumenta de forma mensurable el nivel rms promedio de audio, permitiendo predecir el incremento del alcance de la emisora en base a la mayor potencia en bandas laterales. El uso de técnicas digitales de procesado de audio mediante DSP ha refinado la tecnología de los procesadores multibanda, logrando un sonido muy sólido y agradable al oído, además de cumplir su función de incrementar el nivel promedio de modulación. Sin embargo, los principios básicos de diseño son guardados como celoso secreto.

Un aspecto particularmente importante es el estudio del alcance de las transmisiones de FM. Esto es debido al hecho de que la potencia de una señal de FM no depende del nivel de modulación, sino que siempre es constante, por serlo su amplitud. Las bandas laterales de la FM tienen además un comportamiento muy complejo, que hace difícil sacar conclusiones. Como resultado de estas comprobaciones, casi todos los ingenieros de comunicaciones piensan que en FM el procesado de audio carece de la ventaja de incrementar el alcance de la estación. A esto, sin embargo, se contraponen la experiencia de los ingenieros de audio a cargo de las estaciones de broadcasting en FM, quienes saben por experiencia práctica que la instalación de un buen procesador de audio le permite mejorar su llegada en áreas marginales, aunque no están claras las razones por las que esto ocurre.

En este estado de cosas, el presente trabajo busca aclarar de manera científica el concepto del aumento del valor rms de la modulación y su influencia en el alcance de una radio de FM mono y FM estéreo.

1- AUMENTO DEL VALOR RMS DE LA MODULACION

Vemos en la FIG 1 el diagrama en bloques simplificado, de un procesador de audio multibanda, ya sea digital o analógico. El número de bandas usualmente varía entre 3 y 6 bandas. La señal de audio viene con pre-énfasis y es llevada a filtros de banda, generalmente de 24 dB/octava. Cada banda es comprimida con compresores de pendiente elevada (usualmente mayor de 20:1). Los tiempos de ataque y recuperación son ajustados por el ingeniero de la estación para optimizar el sonido, desde un punto de vista psicoacústico.

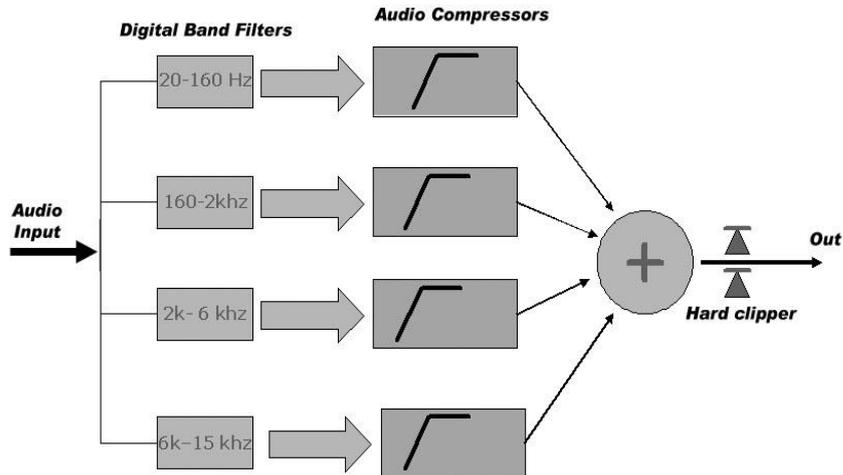


FIG 1 Diagrama en Bloques de un compresor multibanda

A primera vista surge que al comprimir en bandas separadas es posible lograr una elevada densidad de sonido pues cada banda es nivelada para máxima señal. Esto se vincula con el concepto de *sonoridad* de una señal de programa. Es un concepto clásico de la psicoacústica vinculado con la forma en que en el oído interno, más precisamente en la membrana basilar, son excitadas las ciliias y sus correspondientes terminales nerviosas. Dicha excitación se distribuye por bandas de frecuencia sobre la membrana formando una especie de analizador de espectro biológico. Cada una de las notas musicales ocupa una determinada zona de la membrana basilar. Vemos en la FIG 2 la excitación que producen dos tonos. Esto representa una típica situación al escuchar un tema musical en el cual existen dos bandas predominantes. Si este material sonoro es comprimido en varias bandas, el nivel sonoro de cada una de ellas se incrementa, como se ve en la parte inferior de la FIG 2, logrando una excitación más amplia de la membrana basilar, que el oído asocia con un sonido de mayor sonoridad, aunque su nivel rms sea el mismo.

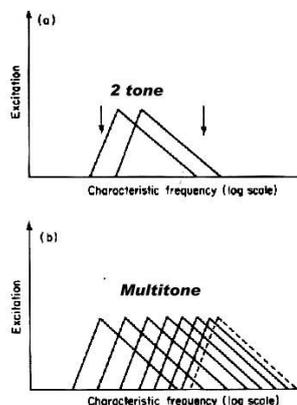


FIG 2 Excitación de la membrana basilar del oído

Esto explica una parte de los resultados que se obtienen con la compresión multibanda. Pero para aumentar el nivel rms hace falta algo más; un recortador de audio. Esto es debido a que el material de programa de una radio tiene una distribución de amplitudes aleatoria en donde los impulsos de muy corta duración pueden triplicar el promedio rms. Como la máxima modulación, aún en picos cortos, no debe sobrepasar el 100%, la forma más efectiva de aumentar el valor rms es eliminar por recorte los picos de muy reducida duración. El concepto de "recorte" es naturalmente asociado a la idea de distorsión y es absolutamente rechazada como parte de cualquier cadena de audio de calidad. Sin embargo, en radiodifusión el recorte de señales tiene una larga tradición, debido a la necesidad de obtener elevados valores de modulación. A lo largo de los años los ingenieros de desarrollo han creados varias técnicas para reducir los efectos indeseables del recorte, manteniendo las ventaja psicoacústica de obtener una mayor excitación en la membrana basilar. Casi siempre estas técnicas se han desarrollado empíricamente y raramente han tenido un justificativo teórico que las avale. Analizaremos entonces la forma en que el oído percibe la distorsión derivada del recorte de una señal senoidal

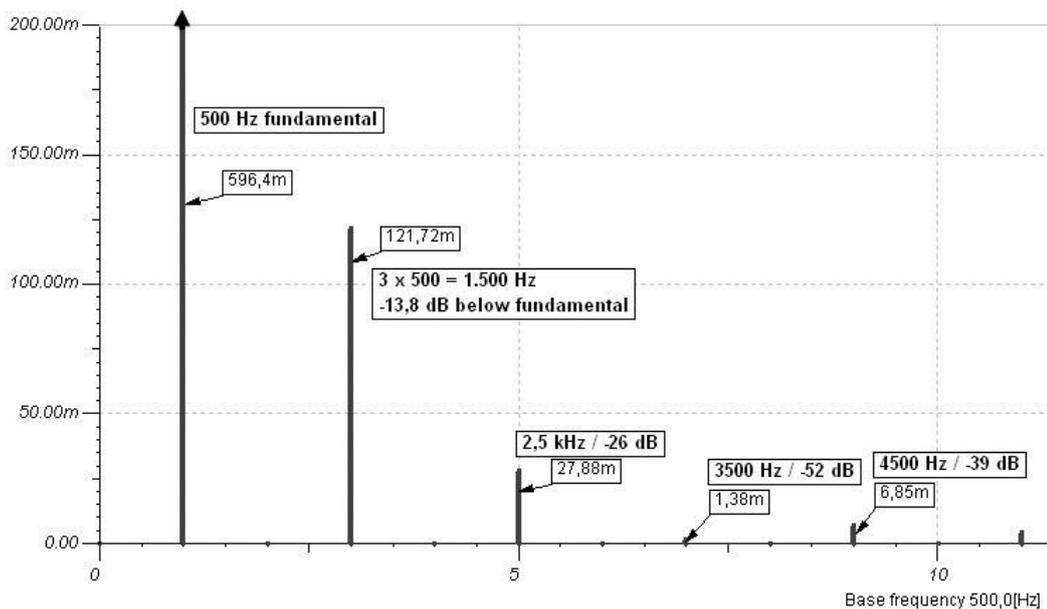


FIG 3 500 Hz, recorte 6 dB, espectro armónico

En la FIG 3 vemos el espectro armónico de una onda senoidal de 500 Hz, recortada 6 dB. Para analizar la audibilidad de la distorsión deberemos tener en cuenta el efecto de enmascaramiento. Para ello dibujamos en el mismo gráfico el espectro armónico de la señal recortada y el enmascaramiento que el tono de 500 Hz produce. Emplearemos para ello el procedimiento de cálculo propuesto por Terhardt et al [2] cuyos resultados se aproximan mucho a las curvas de enmascaramiento reales, medidas por otros autores. El resultado es el gráfico de la FIG 4. Puede verse a simple vista que el enmascaramiento no mejora la situación y la distorsión es perfectamente audible. Es decir que una sola nota musical sostenida en el tiempo y recortada 6 dB sería totalmente audible.

Hay, sin embargo, otros factores que mejoran la situación. Al tratarse de material sonoro complejo (música o palabra), la compresión multibanda eleva la energía espectral de las bandas adyacentes. Vemos en la FIG 5 el resultado de agregar dos bandas de frecuencias separadas a una y dos octavas con niveles 10 y 20 dB por debajo de la banda principal de 500 Hz. Vemos que los armónicos indeseados generados por el recorte son parcialmente enmascarados. Si elevamos al mismo nivel las 3 bandas (FIG 6) mediante mayor compresión, todas las componentes, menos la de 3era armónica, quedan enmascaradas y por lo tanto no son escuchadas. Vemos entonces que en función del tipo de material de programa y de la compresión utilizada es posible reducir la distorsión producida por un recorte severo. Obviamente si el material de programa carece de energía en zonas espectrales próximas al recorte, no será posible usar esta técnica. O dicho de otro modo: con este

tipo de material de programa (por ejemplo un piano o clavicordio) un recorte de 6 dB será escuchado.

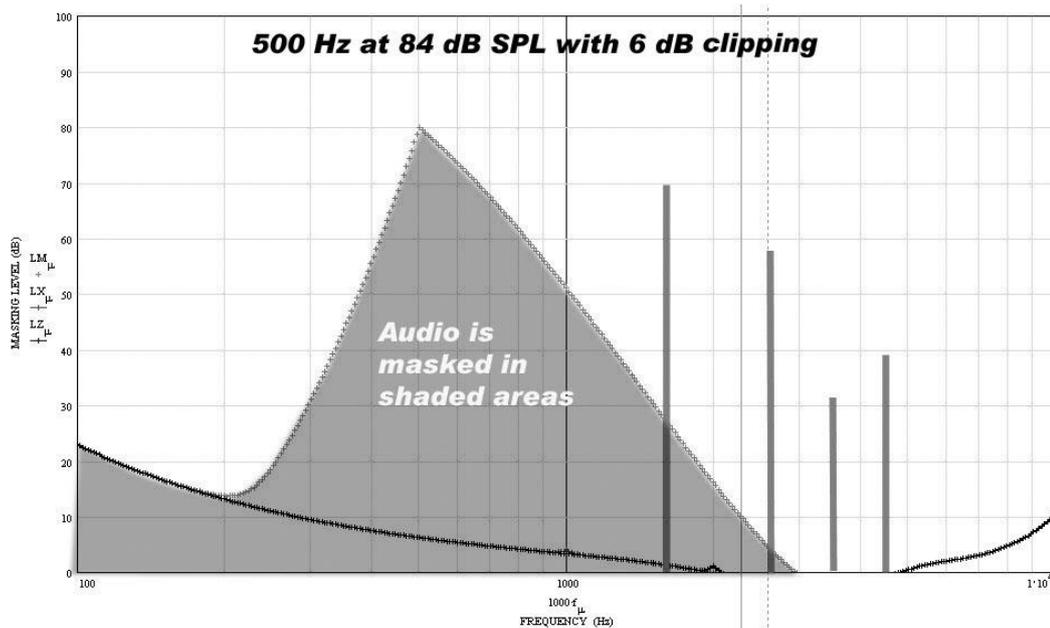


FIG 4 Armónicas de la onda de 500 Hz recortada

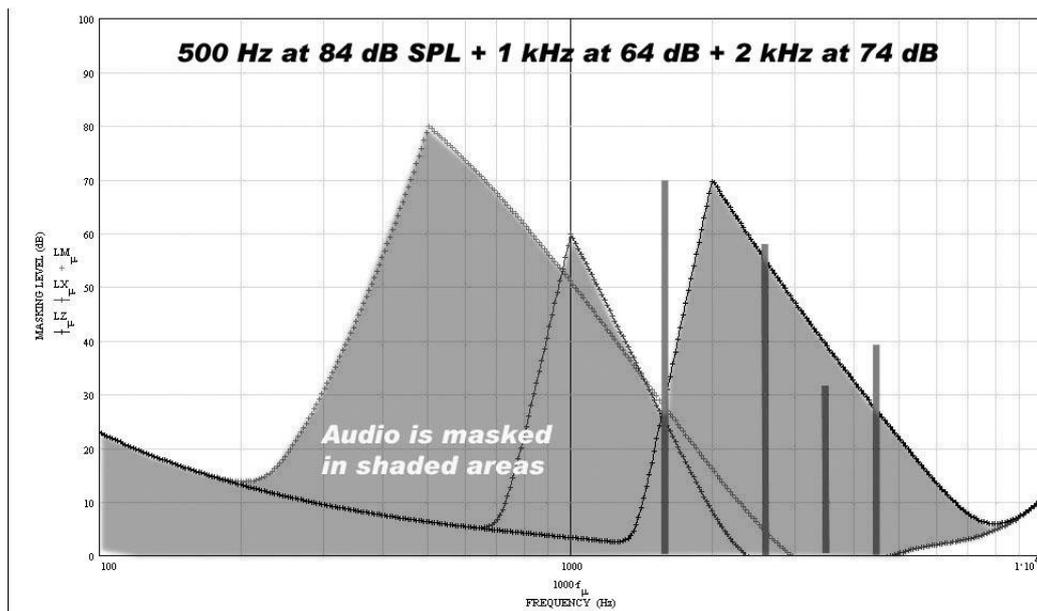


FIG 5 Enmascaramiento cuando 3 bandas están presentes

El análisis precedente, sin embargo, no tiene en cuenta otro de los avances que los modernos procesadores de audio han incorporado: el control del tiempo de recorte. Volvamos a la FIG 1 y analicemos la acción de los compresores en función del tiempo. Imaginemos que el umbral de compresión coincide casi exactamente con el umbral del recorte. Si además los tiempos de ataque son instantáneos, el recortador no trabajará nunca. Pero en los procesadores de audio para AM / FM el tiempo de ataque es considerablemente lento y diferente para cada banda y para cada tipo de programa. De esta manera, cuando ensayamos el procesador con onda senoidal nunca veremos el recorte. Pero si lo ensayamos con una ráfaga de señal, por ejemplo un tren de 50 ms de señal de 1 KHz, veremos que los primeros ciclos son recortados y luego, cuando el compresor alcanza su valor final, el recorte desaparece. De esta manera se logran recortar los picos de muy corta duración que deseamos eliminar, evitando que los picos de duración considerable, afecten a la calidad de audio

pues la reducción de ganancia del compresor hace que el sistema opere linealmente. Esto último merece un detallado análisis.

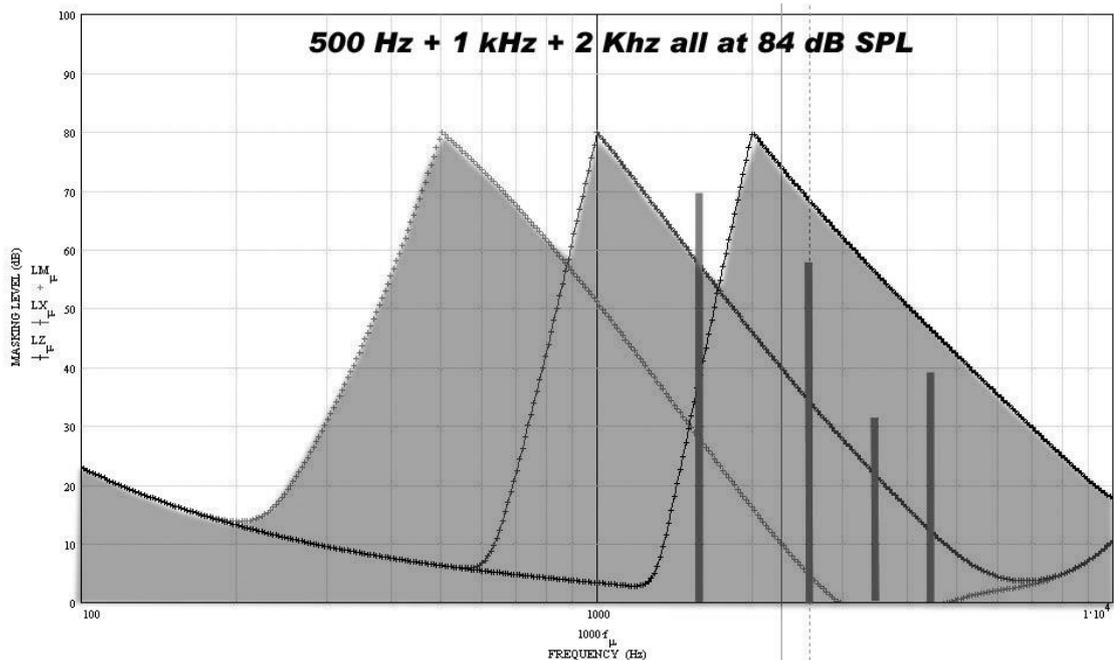


FIG 6 Enmascaramiento con 3 bandas al mismo nivel

La percepción de la distorsión durante cortos intervalos es diferente del análisis en régimen continuo, dado por el efecto enmascaramiento, antes visto. Durante intervalos muy cortos, está en juego la capacidad del cerebro de resolver la información que desde el oído interno llega por 30.000 fibras nerviosas. En el caso de una computadora que resuelve una transformada de Fourier tenemos que computar N muestras dentro de una ventana temporal T_n . El tiempo requerido para hacer los cálculos nos dará la demora necesaria para obtener el espectro. En el caso del cerebro, la "computadora biológica" también requiere un determinado tiempo para transformar en una percepción sensorial el hecho de que un tono venga acompañado por otros que serían interpretados como *distorsión*. Este fenómeno psicoacústico produce un tipo de enmascaramiento especial denominado *Enmascaramiento por Ráfaga* (Burst Masking) y ha sido estudiado por O.Bonello [3]

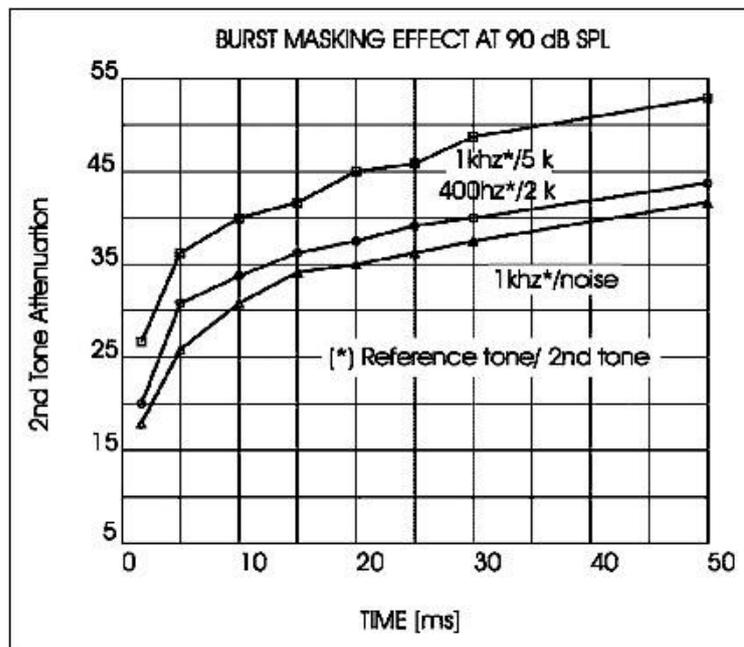


FIG 7 Enmascaramiento por ráfaga según O.Bonello [3]

Este enmascaramiento se aplica al reconocimiento de un tono de audio, de corta duración (ráfaga) en presencia de otro tono más intenso y de muy diferente frecuencia (para estar fuera de la zona de enmascaramiento en régimen permanente). También se aplica al caso en que un tono puro enmascara al ruido blanco. Vemos en la FIG 7 una curva, tomada de [3], que resume los resultados del estudio estadístico realizado. A los sujetos se les presenta alternativamente una ráfaga de N milisegundos del tono enmascarante y otra del mismo más un segundo tono o ruido. Las curvas de la FIG 7 indican el límite por debajo del cual el segundo tono deja de ser reconocido. Por ejemplo, si aplicamos una curva de enmascaramiento (estático) a un tono puro de 1 KHz a 90 dB SPL, encontramos que podemos reconocer el tono de 5 KHz a 65 dB por debajo del tono de 1 KHz. Pero la curva superior de la FIG 7 (1KHz / 5 KHz) nos informa que dentro de una ráfaga de 50 ms este valor se reduce a 53 dB y en 5 ms es de solamente 36 dB. El concepto de Enmascaramiento por Ráfaga nos ayuda a entender, de una manera científica, porqué motivo ajustando los tiempos de ataque de los compresores multibanda, es posible reducir y hasta eliminar los efectos negativos de la distorsión por recorte, manteniendo sin embargo la ventaja de aumentar el valor rms de la señal de audio.

1.1 Ejemplo

Debemos observar que la acción del enmascaramiento es reducida para la 3ra armónica, pero es definitivamente importante para la 5ta armónica y superiores, que son particularmente responsables del sonido áspero del recorte. La 3era armónica, en cambio, le agrega un timbre al sonido original que lo modifica levemente, pero de manera natural, sin causar desagrado al oído. Imaginemos por ejemplo una señal que es recortada un 30 %. Mirada al osciloscopio la calificaríamos como un recorte muy severo. Sin embargo el cálculo de Fourier nos indica que la 5ta armónica y las sucesivas están por debajo de 40 dB de la fundamental. En condiciones de escucha permanente este valor es perfectamente detectable (recordemos que nuestro umbral de enmascaramiento estático era de -65 dB) Pero aplicando las curvas del enmascaramiento de ráfaga, vemos que para 10 ms tenemos 40 dB de enmascaramiento que hacen inaudible un recorte tan severo.

Esto explica, por primera vez, el motivo por el cual en numerosos ensayos de audición, los oyentes han definido el sonido procesado como de *mayor calidad* que el original, pues el oído percibe una mayor sonoridad, sin percibir un aumento de la distorsión.

1.2 Cancelación de IM

Un refinamiento posterior se agrega a los nuevos diseños de procesadores de audio para FM: el recortador con cancelación de intermodulación.

Para entenderlo mejor recordemos que las transmisiones de FM se realizan acentuando los agudos por encima de 2.122 HZ, según una constante RC de 75 μ S (50 μ S en Europa). Esto significa acentuar 17 dB en 15 KHz antes de la transmisión. Esta idea fue genial en la década de 1930 cuando fue inventada y permitió reducir el soplido de fondo en las transmisiones de FM. La idea era aprovechar que la música y la voz tienen bajos niveles de señal por encima de 5 KHz y el preénfasis permitía aumentarlos, aprovechando mejor la capacidad de emisión del medio de transmisión. Pero en aquella época las grabaciones discográficas en 78 rpm, la música y la voz humana, tenían muy atenuadas las altas frecuencias debido a las limitaciones de los procesos de grabación y las características acústicas de los instrumentos musicales. Aún en los 50 años siguientes esta idea permanece válida. Incluso con la creación de nuevos estilos musicales, como la música Rock, se mantenían atenuaciones de 15 a 20 dB en la octava de 16 KHz, referida a la de 1 KHz [4] Esto hacía que la señal, luego del pre-énfasis, mantuviera el contenido de altas frecuencias por debajo de las frecuencias medias. Todo cambia, sin embargo, a partir de los 90's cuando el uso de sintetizadores para reemplazo de instrumentos musicales y el uso masivo de la grabación digital en CD, eliminan el último obstáculo que impedía lograr un medio de registro con capacidad de entregar elevados

niveles de señal en agudos extremos. Esta capacidad es usada por la industria fonográfica para entregar grabaciones con contenidos de altas frecuencias inusualmente elevados.

Los elevados niveles de agudos producidos con las nuevas técnicas de grabación, alteran el equilibrio mantenido durante 50 años que posibilitó el pre-énfasis en FM. Pero no existe hoy la posibilidad de modificar una norma que es empleada en cientos de millones de receptores de FM en todo el mundo. Por lo tanto la nueva generación de procesadores de audio deben aceptar que el material sonoro, luego del pre-énfasis, contenga mucha más señal en las bandas de alta frecuencia que las de medios y graves. Si para compensar esto usáramos como 100% de modulación la señal en 15 KHz, por ejemplo, las notas medias bajarían de nivel y se perdería la sonoridad de la radio, lo que sería inaceptable. La solución entonces pasa por comprimir/limitar las bandas de alta frecuencia hasta nivelarlas con las bandas de frecuencias medias. Sin embargo la compresión hace perder sonoridad a los agudos pues baja el nivel de todas las frecuencias de esa banda (por ejemplo de 8 a 15 KHz). Por lo tanto solamente una parte pequeña del exceso de señal es compensada con compresión. La mayor parte es directamente recortada. Esto, que puede sonar a blasfemia entre los puristas del sonido perfecto, es tolerado por el oído. Para ello hemos de tener en cuenta que la mayor parte del recorte ocurre por encima de 5 KHz. Si el recortador es cuidadosamente diseñado solamente tiene componentes impares de distorsión. Por ejemplo, recortando 5 KHz la primera componente aparece en 15 KHz, al final de la banda. Por encima de 5 KHz es posible recortar sin consecuencias audibles, pues la tercera armónica cae fuera de la banda de audio de FM. Esto comienza a solucionar un problema muy importante. Sin embargo, al recortar en altas frecuencias varios tonos simultáneamente aparecen, además de los componentes armónicos (inaudibles), también componentes de IM (audibles).

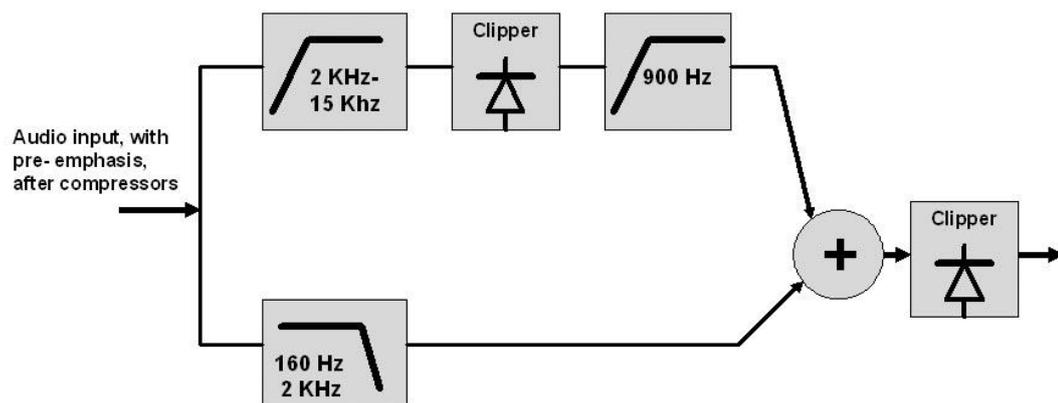


FIG 8 Cancelador de IM de doble banda

Para resolver el problema de la distorsión de IM en los recortes de altas frecuencias se emplean distintos circuitos basados en el principio de la FIG 8. Este recortador dual tiene un canal de agudos, por ejemplo con un divisor de frecuencias en 2 KHz. Luego del recortador de agudos existe un filtro pasa-altos de 900 Hz, por ejemplo, que no afecta la respuesta a frecuencia por debajo del umbral de recorte. Sin embargo este filtro impide el paso de las componentes de intermodulación producidas por el recortador de alta frecuencia. El sumador posterior restituye el espectro de audio completo. Un segundo recortador trabaja sobre la suma total. El umbral de recorte del primer recortador generalmente es diferente del segundo, dependiendo de cada fabricante en particular la relación elegida entre ambos. En algunos casos el segundo recortador está ubicado dentro del codificador estéreo, trabajando sobre la señal MPX. Un adecuado balance entre ambos niveles de recorte logra que el oyente perciba unos excelentes agudos pese a que la modulación no excede nunca del 100%. Es importante notar que la mayoría de los procesadores hoy está basada en sistemas digitales con unidades DSP en donde las diferentes partes no son identificables pues son creadas por software. Esto no modifica, por supuesto, el concepto elaborado a través de los diagramas en bloques que hemos visto.

2- Alcance de una emisora de radio de FM

Una vez analizada la tecnología que gobierna a un procesador de audio para broadcasting, podremos estudiar a fondo el tema del aumento del área de cobertura de una estación debida al procesado de audio. Aquí nos olvidaremos por un momento de las consideraciones psicoacústicas y admitiremos que más allá de la sensación auditiva de mayor sonoridad, hay elementos perfectamente mensurables como el aumento del nivel rms de la señal de audio, debido a la compresión multibanda y al recorte de picos. La técnica de medición propuesta en [1] es hoy empleada en Monitores de Modulación de FM y en procesadores de audio, para que el ingeniero de la estación pueda evaluar exactamente el incremento en el valor rms que produce determinado ajuste de parámetros en el procesador de audio. Este dato es importante pues está directamente relacionado, como luego veremos, con el área de cobertura de la estación.

Comenzaremos entonces por analizar el caso más sencillo que es el de la transmisión de AM

Una portadora de amplitud E y frecuencia f_c , modulada por una onda senoidal de frecuencia f_m y amplitud m , puede expresarse por [5]:

$$e(t) = E \cdot \text{sen} \omega_c t + \frac{E \cdot m}{2} \cdot \text{sen}(\omega_c + \omega_m)t + \frac{E \cdot m}{2} \cdot \text{sen}(\omega_c - \omega_m)t \quad (\text{EQ-1})$$

Siendo: $e(t) = E \cdot \text{sen} \omega_c$

El valor de la señal de portadora que sabemos que no transporta información. Es por lo tanto una potencia perdida, que por lo tanto no tomamos en consideración. Tomando los dos términos finales de EQ-1 tendremos:

$$e_{(lat)} = \frac{E \cdot m}{2} \cdot \text{sen}(\omega_c + \omega_m)t + \frac{E \cdot m}{2} \cdot \text{sen}(\omega_c - \omega_m)t$$

La potencia rms que esta señal desarrolla sobre la antena de impedancia R_o es

$$2P_{lat} = \frac{e(t)^2}{R_o} = \frac{(E \cdot m)^2}{4R_o} + \frac{(E \cdot m)^2}{4R_o} = \frac{(E \cdot m)^2}{2R_o}$$

Siendo la potencia sin modulación, debida solamente a la portadora)

$$P_0 = \frac{1}{2} \frac{E^2}{R_o}$$

Reemplazando el valor de P_o de la ecuación anterior, se obtiene finalmente:

$$P_{lat} = \frac{1}{2} P_0 \cdot m^2 \quad \text{EQ-2}$$

Siendo m el factor de modulación que puede variar desde cero a uno, dado por

$$m = \frac{\% \text{Modulación}}{100}$$

y P_o la potencia de la portadora, sin modulación

Vemos que la EQ-2 indica claramente que la potencia efectiva irradiada, de la cual depende el alcance de la radio de AM es proporcional a P_o y al cuadrado de m . Esto indica que si tenemos un valor promedio de $m=0,2$ (audio con un compresor simple) y una potencia P_o de 10 KW, la potencia efectiva en bandas laterales será de 200 W. Si ahora proceso el audio, para mantener un valor promedio $m=0,4$ la potencia sube a 800 W con lo cual el alcance aumentará. O también visto desde un punto de vista del rendimiento, puedo bajar la potencia del transmisor a 2,5 KW para obtener el mismo alcance que con 10 KW y un material de audio sin procesado.

Estos resultados son plenamente conocidos desde hace muchos años y son la razón por la cual las estaciones de radio de AM han sido precursoras en las tecnologías del procesado de audio.

Pero en FM las cosas no son tan sencillas. El hecho de que la potencia de una señal de FM se mantiene siempre constante, a diferencia de la de AM, ha hecho suponer a muchos ingenieros que el alcance de una transmisión de FM de broadcasting no se beneficia con el aumento de la modulación.

Analicemos una señal modulada en FM [5]

$$e(t) = E_c \text{sen}(\omega_c t + \frac{\Delta f}{f_m} \text{sen} 2\pi f_m t) \quad \text{EQ-3}$$

Siendo E_c la amplitud de la portadora de frecuencia $\omega_c = 2\pi \cdot f_c$

f_m es la frecuencia modulante.

En la señal de FM aparece un nuevo elemento, *el índice de modulación m* dado por:

$$m = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{\text{Desviación de frecuencia}}{\text{Frecuencia de modulación}}$$

A su vez es importante para nuestro análisis introducir ahora el concepto de Porcentaje de Modulación, **M%**, dado por:

$$M\% = \frac{\Delta f}{75\text{KHz}} \cdot 100$$

Con M% variando entre 0 y 100 % y dependiendo de la señal de audio y del procesado de audio. Esto es debido a que en las transmisiones comerciales de FM se emplea una desviación máxima (100 % de modulación) de 75 KHz.

Y por lo tanto podemos reemplazar:

$$m = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{M\% \cdot 75 \text{ KHz}}{100 \cdot f_m} \quad \text{EQ-4}$$

Que reúne a los dos factores que nos interesan: M% (depende del procesado) y f_m (frecuencia de modulación)

La solución de la EQ-3 requiere el uso de las integrales de Bessel Tipo-I. A diferencia de la sencilla resolución de la señal modulada en AM, la de FM requiere de decenas de términos (en rigor, infinitos), por lo que influyen tanto el factor de modulación, como la frecuencia modulante. Esta gran complejidad ha motivado que resulte muy difícil entender el flujo de potencia en las bandas laterales de FM y su relación con la modulación. Pueden verse algunos resultados en forma gráfica en [5] y [6] que dan una idea de la compleja forma en que interactúan las numerosas bandas laterales de FM.

Para poder analizar la manera en que la energía de una señal de FM fluye hasta los receptores, descartaremos (como hicimos en AM) la potencia de la portadora pues esta no transporta información

El nivel de la portadora, para distintos grados de modulación, está dado por:

$$e_0(t) = E_c(J_0(m).sen\omega_c t) \quad \text{EQ-5}$$

Siendo

$e_0(t)$ es la portadora en función del tiempo

E_c es el nivel de la portadora sin modulación, m = índice de modulación

J_0 = Función de Bessel de Tipo-I, orden cero para el valor m

Para este análisis haremos una importante simplificación, que es la clave para obtener un resultado comprensible. Notamos que las funciones de Bessel son ortogonales, esto quiere decir que la suma de los cuadrados de sus términos es igual a uno. En términos matemáticos:

$$[J_0(m)]^2 + 2\sum_{i=1}^{i=\infty} [J_i(m)]^2 = 1 \quad \text{EQ-6}$$

Como la potencia total de una señal de FM es siempre constante (por serlo su amplitud), la EQ-6 indica que al modular la portadora la energía de las bandas laterales es tomada de la energía de la portadora. Esta afirmación permite un cálculo simplificado de la energía en las bandas laterales, pues simplemente restamos la potencia total P_o del transmisor, del valor de la portadora, dado por la EQ-5, quedando entonces:

$$P_{lat} = P_o(1 - (J_0(m))^2) \quad \text{EQ-7}$$

Siendo **P_{lat}** la potencia en bandas laterales, **P_o** la potencia del transmisor

m = índice de modulación (depende de la frecuencia de la modulación y del nivel de procesado)

J_0 = Función de Bessel de Tipo-I, orden cero para el valor **m**

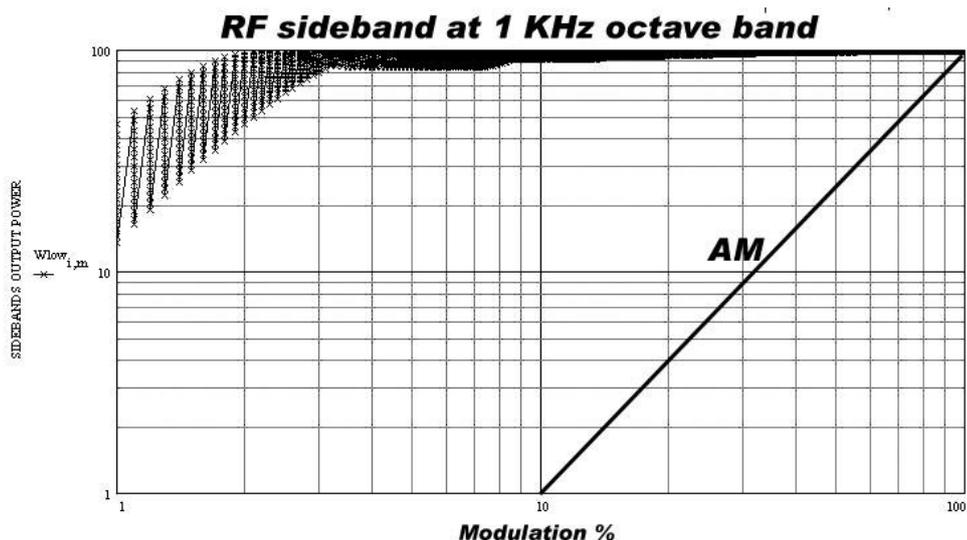


FIG 9 Bandas laterales de modulación en octava de 1 KHz (707-1414 Hz) para transmisor de FM de 100 W, comparada con transmisor de AM de 200W

El próximo paso es graficar la EQ-7 para obtener conclusiones. Analizaremos la potencia de salida en bandas laterales P_{lat} , en función del porcentaje de modulación, recordando que la EQ-4 relaciona m con la frecuencia de modulación y el porcentaje de modulación

En la FIG-9 vemos un gráfico de la EQ-7 para un transmisor de 100 W de potencia. Para el gráfico se usaron numerosas frecuencias de modulación (f_m) dentro de la octava de 1 KHz (707 Hz - 1414 Hz)

Tenemos en el eje X los valores de modulación desde 1 % al 100%, dados por la EQ-4, y en el eje Y la potencia de salida en bandas laterales, de las cuales depende el alcance de la radio, desde 1 W hasta 100W

Como referencia, hemos incluido en el mismo gráfico a la EQ-2 (marcada **AM**) que representa el comportamiento con modulación de AM, que es independiente de la frecuencia de modulación.

Puede verse la enorme diferencia entre AM y FM pues en AM necesitamos tener un 45 % de modulación para obtener 20 W de salida de nuestro transmisor ideal de 100 W. Esto indica la enorme importancia del procesado de audio, que permite alcanzar altos valores de modulación. Contrariamente en FM con solamente un 1 % de modulación ya obtenemos 20 W de potencia de RF en bandas laterales. ¿Qué significa esto? Muy sencillo: que en una transmisión de FM mono el procesado de audio no ayuda a alcanzar mayores potencias de RF. Es decir que seguramente aumentará la *sonoridad* del audio pero no aumentará su alcance.

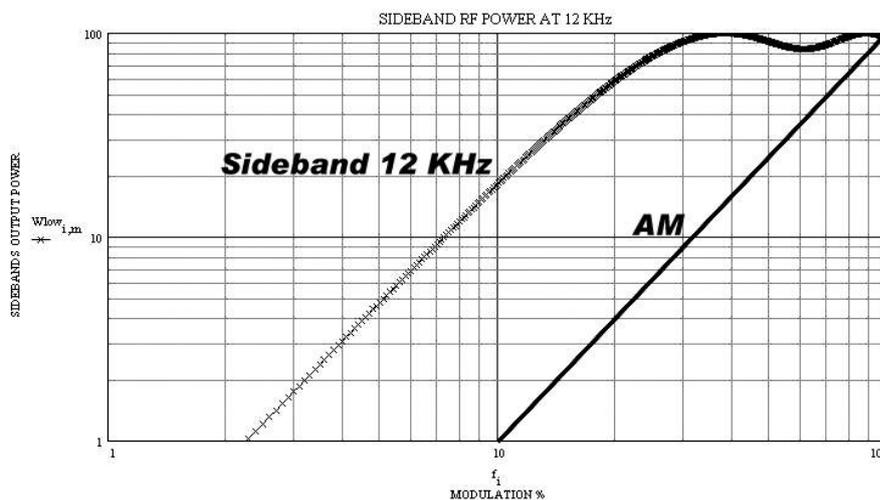


FIG 10 Bandas laterales de FM para 12 KHz de modulación

¿Qué pasa en altas frecuencias? Vemos en la FIG-10 el comportamiento de una señal de 12 KHz transmitida en FM mono. Si bien la situación ha cambiado, aproximándose un poco hacia la de la modulación de AM. Vemos que aún en esta frecuencia el procesado de audio (y el aumento de la modulación) no brindan ventajas importantes. De hecho con el 10% de modulación ya se obtienen 20 W y con 30% de modulación se alcanza la máxima potencia de salida

2.1 Alcance en FM Estéreo

La señal estéreo es lograda mediante una sub-banda de 38 KHz modulada en amplitud por la componente L-R. Si esta banda de 38 KHz llega débil a los receptores, se produce distorsión y ruido de fondo que impide la recepción confortable. En términos generales el ruido en la subportadora de 38 KHz marca el final del área de cobertura de una radio de FM Estéreo.

Veamos entonces en la FIG-11 el comportamiento de la EQ-7 cuando enviamos una subportadora de 38 KHz. Puede verse ahora un notable acercamiento a los valores de AM que indica que el aumento del valor rms de la señal de audio de modulación, también incrementará la potencia en bandas laterales y por lo tanto el alcance de la radio en FM Estéreo. Por primera vez aparece el fenómeno notado en forma empírica por muchos ingenieros de estaciones de FM, pero que hasta el momento fue siempre considerado como una leyenda por muchos ingenieros de comunicaciones y libros de texto de universidades.

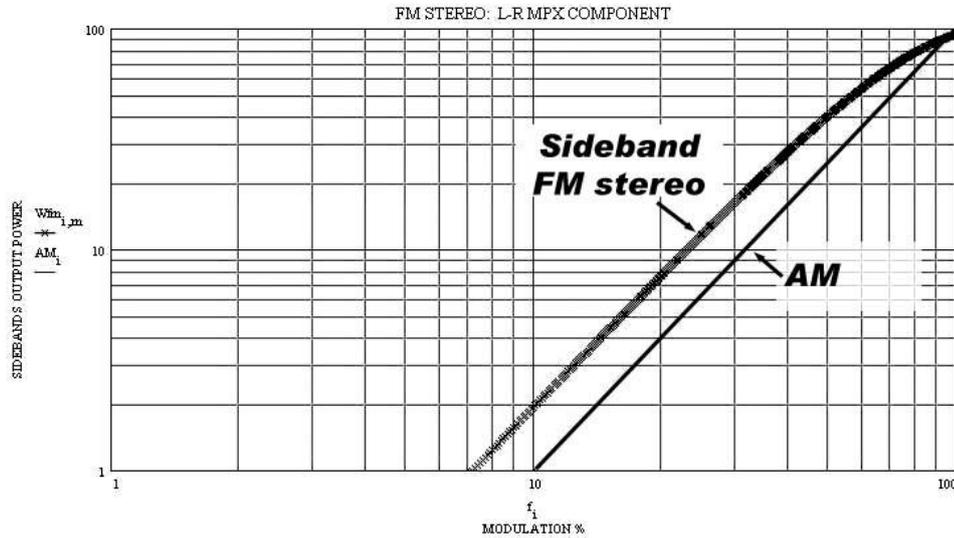


FIG 11 Bandas laterales en transmisión estéreo debidas a subportadora de 38 KHz

Si consideramos ahora que la banda de frecuencias a transmitir en FM es de 30 a 15.000 Hz, resultará que la subportadora de 38 KHz deberá tener un ancho de banda de 38 KHz +/- 15 KHz. Si graficamos nuevamente la EQ-7 para toda la banda comprendida entre esos extremos, obtenemos la FIG-12. En la misma se advierte el área sombreada que representa el ancho de banda de transmisión hasta 15 KHz. Todo el material sonoro emitido caerá forzosamente dentro de esta banda. Por lo tanto el comportamiento de la transmisión total dependerá de la potencia aplicada al peor punto de esta banda, que corresponde a su borde inferior, donde para la misma modulación, las potencias son menores. Es interesante observar que la transferencia de potencia, en función de la modulación, **es casi exactamente igual en AM y en FM estéreo**

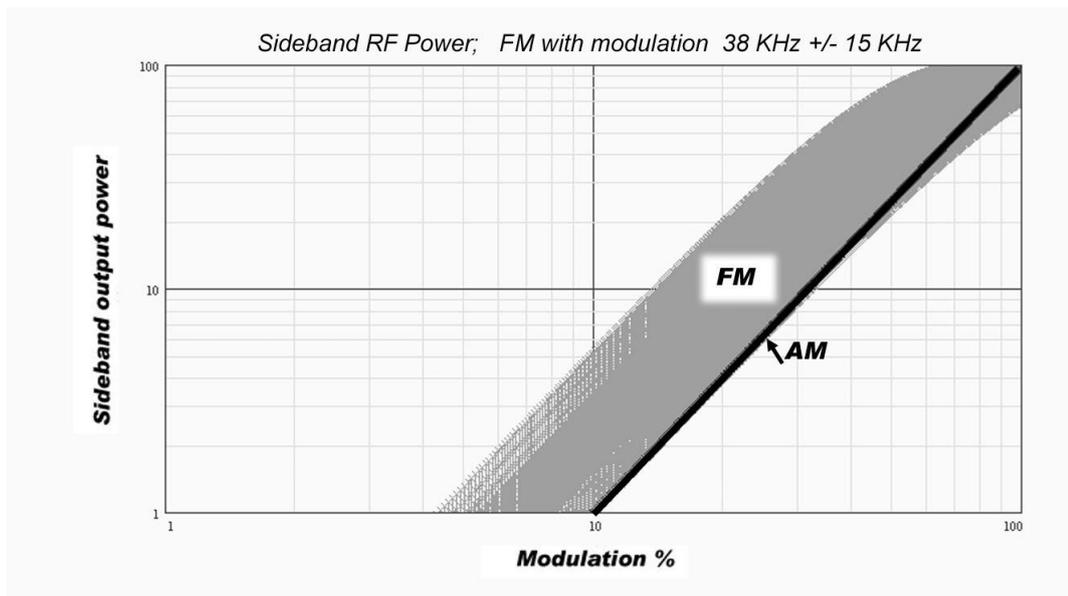


FIG 12 FM estéreo con modulación MPX entre 30-15.000 Hz

Cabe preguntarse, sin embargo, si este resultado es alguna anomalía matemática o puede comprobarse realmente en mediciones de campo, realizadas en forma científica y cuidadosa. Para ello nos referiremos al trabajo de Torick-Keller [7] que realizó cuidadosas mediciones con el objeto de comprobar el aumento del alcance de una emisora de FM ubicada en Meriden, Connecticut a la cual mediante un procesado de audio muy extremo, se aumentaba el promedio de modulación en la subportadora de 38 KHz a valores del 95 %. Los resultados de dicho trabajo indican que es posible (para esos valores extremos de modulación de subportadora) incrementar hasta 4 veces el área cubierta de una estación de FM estéreo. Puede verse que las mediciones de Torick-Keller coinciden con las predicciones de la FIG-12, si bien los aumentos del valor rms obtenidos mediante el procesado multibanda que nos ocupa, son menores que los obtenidos con otra metodología por los autores.

3 Conclusión

Hemos analizado el estado actual de las teorías que involucran el diseño de los procesadores de audio digitales para radiodifusión. Hemos visto las razones por las que logran un importante incremento en la sonoridad de una señal de audio y en los valores rms de modulación con un mínimo deterioro audible de la calidad del sonido. Este aparente deterioro es, sin embargo, compensado por la sensación de alta sonoridad y graves de alto impacto que hace que una alta proporción de la audiencia considere este sonido como *mejor que el original*.

Finalmente, analizando las bandas laterales de la transmisión, considerando la propiedad ortogonal de las funciones de Bessel, hemos podido demostrar que en FM mono solamente nos beneficiamos con el aumento de sonoridad del procesado de audio, mientras que en FM Estéreo ocurre un importante aumento de la potencia radiada, dado en la FIG-12 lo que nos permite predecir con exactitud el incremento real del alcance de una transmisión conociendo el aumento del valor rms de la modulación debida al procesado de audio multibanda.

4 Referencias

[1] Oscar Bonello "New improvements in audio signal processing for AM Broadcasting" , AES Journal Vol 24 #5, June 1976

[2] E.Terhardt, Gerhard Stoll and M.Seewann, "Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals" Journal of Acoust.Soc.Am. Vol 71 pag 679, March 1982

[3] Oscar Bonello, Burst Masking, "Enmascaramiento por Rafaga", EAA Symposium of Architectural Acoustics and Iberian Congress on Acoustics, Madrid, Spain, October 2000, ISBN 84-87985-03-3

[4] R.Cabot, R.Genter II and T.Lucke, "Sound Levels and Spectra of Rock Music", AES Journal Vol 27, # 4, April 1979

[5] R.Landee, D.Davis and A.Albrecht, "Electronic Designers Handbook" Section 5.1-5.32, MacGraw-Hill Book, New York 1957

[6] National Association of Broadcasters "Engineering Handbook", Sixth Edition, pp 427 – 474

[7] E.Torick and T.Keller, "Improving the signal to noise ratio and coverage of FM stereo broadcasts", AES Journal Vol 33 # 12, December 1985