

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicaciones (Sonido e Imagen)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**Creación de un programa de simulación
de sistema de refuerzo sonoro**

Autor: Ignacio Botella Ripoll

Tutor: Javier Redondo Pastor

ÍNDICE

1. Objeto y antecedentes	3
2. Desarrollo teórico	4
2.1 Fundamentos de acústica de salas	5
2.1.1. Teoría Estadística.....	5
2.1.2. Teoría Geométrica.....	11
2.1.3. Teoría Ondulatoria	15
2.2. Sistemas de refuerzo sonoro activo	5
2.2.1. Sonido directo y sonido reverberante	6
2.2.2. Existencia de varias fuentes	6
2.2.3. Fórmula unificada.....	6
2.2.4. Evaluación de N	6
2.2.5. Campo semireverberante.....	6
2.2.6. Criterios de Nivel	6
2.2.7. Criterios de diseño con E.A.D.	6
2.2.8. Proceso de diseño	6
2.2.9. Sistemas con múltiples fuentes	6
2.2.10. Control de coberturas	6

3.Desarrollo del proyecto	36
3.1 Creación de un software de simulación de un sistema de refuerzo sonoro activo	5
4.Resultados	40
5.Conclusiones	47
6.Bibliografía	48
7.Anexos	49

1. OBJETO Y ANTECEDENTES

En programas de simulación actuales basados en la teoría geométrica o teoría de rayos, existe la posibilidad de crear una serie de fuentes y de receptores que simulan a oradores y oyentes. Sin embargo en estos programas no contemplan la posibilidad de tener en cuenta las interacciones entre los elementos constituyentes de un sistema de refuerzo activo, y más concretamente la realimentación asociada a este tipo de sistemas.

El presente proyecto viene a subsanar al menos parcialmente esta carencia. De este modo el objetivo de este proyecto es crear una herramienta sencilla con la que sea posible simular un sistema de refuerzo activo.

2. DESARROLLO TEÓRICO

2.1. Fundamentos de acústica de salas

La acústica de salas estudia el sonido creado en el interior de un recinto; es decir, cómo se comporta el recinto frente a cualquier fenómeno acústico y cómo afecta a la audición. Para ese estudio existen tres aproximaciones diferentes conocidas como las tres teorías: la teoría estadística, la teoría geométrica y la teoría ondulatoria. Estos tres puntos de vista permiten comprender como la sala modifica la señal sonora emitida por la fuente de sonido.

2.1.1. Teoría estadística

Estudia la energía acústica presente en un recinto sin tener en cuenta el carácter ondulatorio del campo sonoro. Establece que todas las partículas sonoras son idénticas en tamaño y energía. Cuando una fuente sonora irradia energía acústica en un recinto cerrado, el campo acústico resultante empieza propagándose libremente; al cabo de un cierto tiempo, que depende de la distancia de los cerramientos a la fuente, las ondas acústicas empiezan a sufrir reflexiones al incidir en los distintos cerramientos. En el momento en que el recinto absorbe la misma energía por unidad de tiempo que la emitida por la fuente, la energía presente en la sala permanece estacionaria a un cierto nivel; en este momento la energía media en la sala permanece constante.

Modelo de campo difuso

El modelo de campo difuso es una serie de condiciones que permiten explicar la teoría estadística. Por lo tanto si estudiamos mediante la teoría estadística la acústica de una sala diremos que el “campo acústico” es homogéneo, isótropo e incoherente.

Homogéneo: El SPL es igual en todos los puntos del recinto en el mismo instante de tiempo.

Isótropo: El campo sonoro es igual en todas las direcciones.

Incoherente: La energía sonora en un punto es la suma aritmética de los valores medios de las energías de todas las ondas reflejadas que pasan por el mismo.

El campo difuso llega a ser audible si las ondas reflejadas mantienen su intensidad el tiempo suficiente.

Balance energético

El cálculo de la energía incidente sobre un cerramiento se realiza a partir de un diferencial de volumen; esta energía incidente se divide en energía absorbida y energía reflejada.

Energía absorbida

Parte de la energía absorbida por el cerramiento se transmite por el mismo y la energía restante lo atraviesa (energía transferida). La energía acústica se transforma en energía calorífica ya que las partículas sonoras se *frenan* al friccionar con el material absorbente transformándose en calor.

El cociente entre la energía absorbida y la incidente nos proporciona el coeficiente de absorción del cerramiento (se mide sobre 1) y al multiplicarlo por el área del mismo obtenemos la absorción del cerramiento. La absorción total del recinto se obtiene con el sumatorio de las absorciones de los cerramientos. El coeficiente de absorción depende tanto del tipo de material como de su forma de montaje, y este influye en el tipo de mecanismo de absorción que se necesite.

Energía reflejada

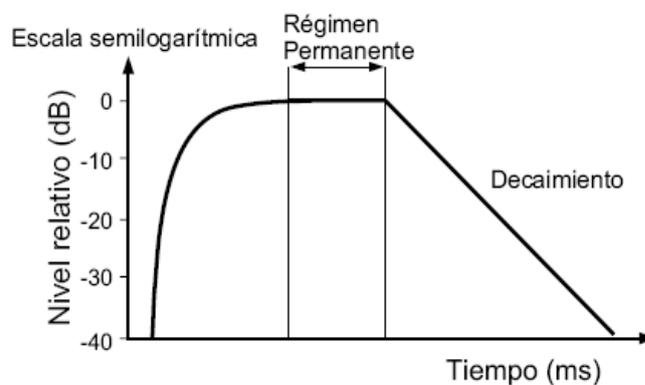
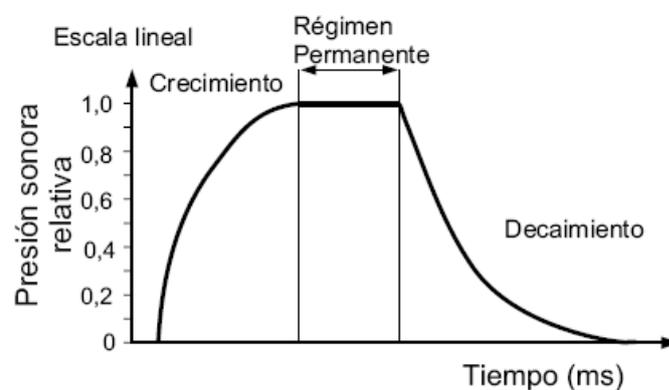
La energía que no se absorbe se refleja. El cociente entre la energía reflejada y la energía incidente restado de uno, nos proporciona el coeficiente de reflexión.

Al hablar de la energía acústica en el interior de una sala nos referimos a la **Densidad de energía** que se define como la energía por unidad de volumen en la sala, y diferenciamos tres estados cuando desde que se emite un sonido hasta la desaparición del mismo.

I-Estado de aumento energético: La densidad de energía va creciendo de forma gradual y continua. A su vez la energía emitida por la fuente por unidad de tiempo, supera a la absorbida por la sala en ese mismo tiempo.

II-Estado estacionario (refuerzo): Cuando se igualan las energías ganadas y perdida por el recinto, se alcanza el régimen estacionario; en ese momento la densidad energética es constante. A mayor absorción menor refuerzo de la sala.

III-Descenso energético (persistencia): La densidad energética disminuye exponencialmente.



Gráficas genéricas de la densidad de energía presente en una sala

Entendemos por **Reverberación** como la persistencia del sonido en una sala una vez la fuente ha dejado de emitir. Este fenómeno se produce debido a la reflexión de las ondas sonoras en los cerramientos de un recinto, que mantienen la energía acústica en su interior hasta su absorción. El parámetro utilizado para determinar la reverberación es el **Tiempo de Reverberación**. Lo definiremos como el tiempo que transcurre desde que se produce un sonido hasta que su intensidad disminuye a una millonésima de su valor original o dicho de otro modo disminuye en 60 dB.

El tiempo de reverberación depende de diversos factores físicos de la sala como el volumen, las superficies o los revestimientos utilizados en las paredes. Al variar la absorción en función de la frecuencia y ser inversamente proporcional al tiempo de reverberación, éste también variará con la frecuencia.

Hay múltiples teorías para calcular el tiempo de reverberación; las más extendidas son las de Wallace Clement Sabine y la de Henry B. Eyring.

La teoría de Sabine se utiliza para calcular coeficientes de absorción de materiales o el tiempo de reverberación cuando el coeficiente de absorción promedio es menor que 0,2.

La fórmula propuesta por Sabine teniendo en cuenta la teoría estadística es la siguiente:

$$t_R = \frac{0'162V}{A}$$

Tr = Tiempo de reverberación

V = Volumen de la sala

A = Área de absorción equivalente = Superficies de las paredes de la sala * Coeficiente de Absorción

Por otro lado la teoría de Eyring se utiliza para coeficientes de absorción mayores de 0,2. Toda energía presente en un recinto sufre una reflexión en un tiempo denominado tiempo medio entre reflexiones. Multiplicando el tiempo medio entre reflexiones por la velocidad del sonido obtenemos el recorrido libre medio para cada rayo.

Si el volumen de la sala no supera los 200m³ se puede despreciar la absorción del aire suponiendo en las fórmulas de tiempo de reverberación, que $m = 0$.

$$t_R = \frac{0.162 V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

Fórmula para obtener el Tr mediante la teoría de Eyring

S = superficies de la sala en m².

α = Coeficiente de Absorción del material de los cerramientos de la sala.

Absorción del aire

Las pérdidas causadas por la disipación del sonido en el aire puede, en ocasiones, afectar al proceso de reverberación. En locales pequeños, la distancia recorrida por las ondas sonoras es relativamente corta por lo que la absorción producida por el aire es despreciable. En recintos grandes esta absorción puede tener efectos notorios en el decremento de la presión en función de la distancia recorrida, sobre todo en altas frecuencias. La absorción del aire se tendrá en cuenta en recintos con volumen superior a los 200 metros cúbicos.

Campo acústico estacionario: El campo estacionario se obtiene como la suma del campo reverberante y el campo directo.

Campo Directo: zona en la que se percibe el sonido directamente desde la fuente sin ser reflejado por ninguna superficie del recinto. El nivel de presión sonora disminuye del orden de 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente.

Campo reverberante: zona en la que se percibe el sonido formado por las reflexiones del recinto. A mayor absorción, menor campo reverberado. En exteriores se supone nulo.

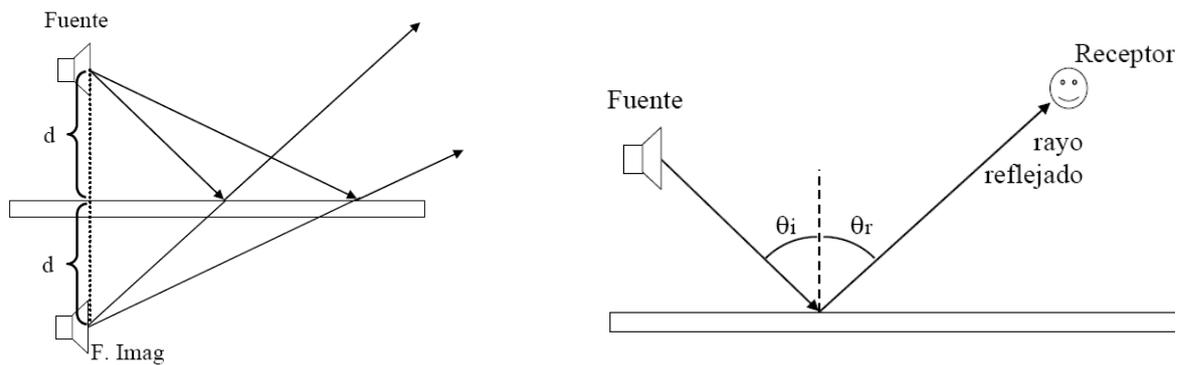
Radio crítico: Llamamos radio crítico a la distancia desde la fuente en la que el campo directo y el reverberado son equivalentes respecto a niveles de Potencia acústica.

2.1.2. Teoría geométrica

La teoría geométrica estudia el campo sonoro mediante un análisis acústico basado en la hipótesis de reflexiones especulares. Para ello se introduce el concepto de rayo sonoro y su estudio se asemeja al estudio de la física óptica. Las reflexiones del rayo sonoro cumplen el principio de Fermat que verifica la ley de la reflexión. Cuando en el recorrido de un rayo se sitúa un obstáculo, parte de la energía acústica retorna dando lugar al fenómeno de la reflexión. Si el obstáculo no es de tamaño considerable, otra onda se propagará sobrepasándolo en la misma dirección en la que venía.

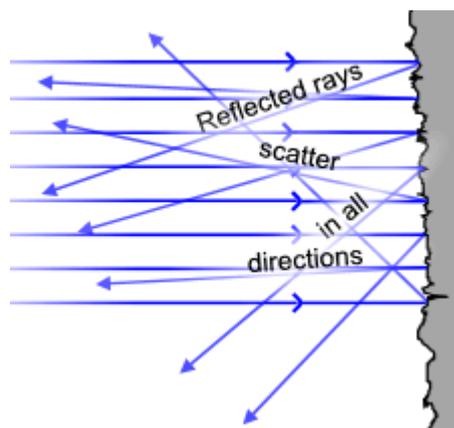
Denominamos a este fenómeno difracción. Distinguimos dos tipos de reflexiones:

Reflexión especular: Ocurre cuando la superficie de reflexión es lisa; el rayo se reflejara en una sola dirección, se estudia el principio de Fermat.



Reflexión especular de los rayos, según el principio de Fermat

Reflexión difusa: Si la superficie reflectante es difusa, el rayo incidente se reflejara en todas las direcciones (*ley de Lambert*).



Reflexión difusa de los rayos según la ley de Lambert

Cuando un rayo sonoro cambia de medio, cambia a su vez su dirección originando el fenómeno de la refracción. Este fenómeno no se suele tener en cuenta en acústica de salas porque los rayos sonoros no cambian de medio, pero es posible que haya cambios graduales de temperatura en un recinto; estos cambios de temperatura producen la refracción de los rayos sonoros.

La utilización de las leyes geométricas nos permite hacer un estudio para analizar la distribución de un recinto, del campo acústico directo y de las primeras reflexiones así como detectar riesgos de eco y focalizaciones provocadas por distintas superficies de la sala.

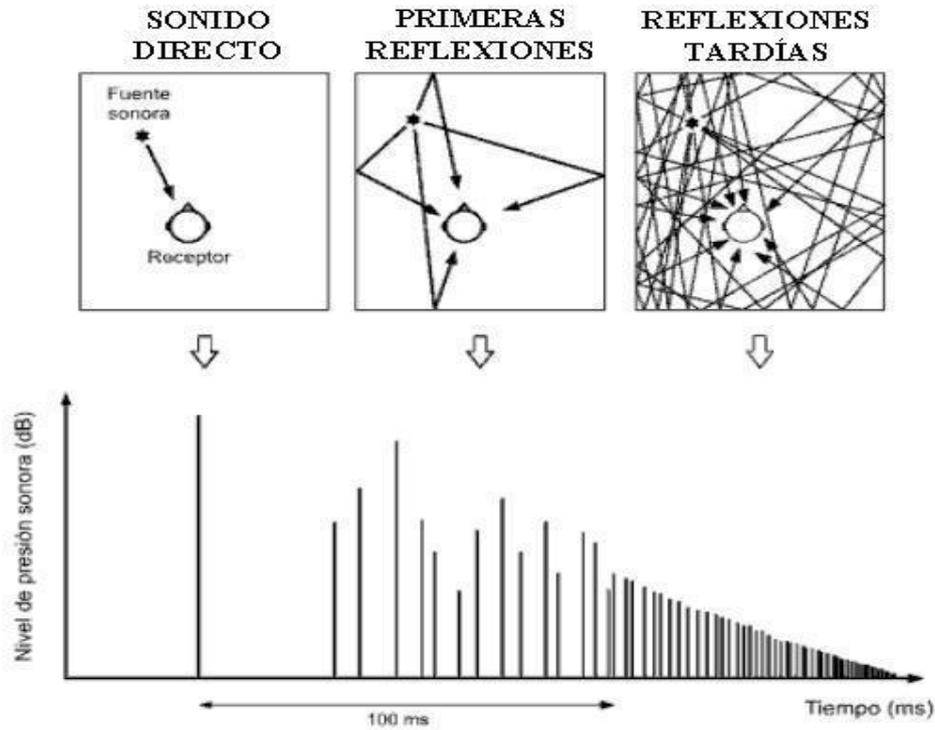
Estudio del eco

El eco se puede definir como la primera reflexión perceptible por el oído humano; esto ocurre para los rayos reflejados que tengan una diferencia de tiempo de vuelta al punto inicial con el rayo directo mayor de *50 ms*, siendo este el tiempo de respuesta medio del oído humano.

Conociendo la velocidad del sonido podemos traducir este tiempo en la diferencia de caminos necesaria entre el sonido directo y la reflexión para producir esta diferencia de *50 ms* siendo la misma: $0,05s * 340m/s = 17m$

Las primeras reflexiones existentes en un recinto se denominan reflexiones de primer orden. A su vez los rayos que se reflejan dos veces, es decir en dos cerramientos distintos, serán reflexiones de segundo orden y así sucesivamente.

Ecogramas: Los ecogramas consisten en la representación gráfica, nivel de presión respecto al tiempo, del sonido directo y las reflexiones de n-ésimo orden. Es la manera más común de hacer el estudio del eco.



Obtención de un ecograma a partir del sonido directo y las reflexiones producidas en una sala

Eco flotante: Consiste en una repetición múltiple, en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora. Suele aparecer cuando se sitúa la fuente entre dos superficies lisas, paralelas y muy reflectantes.

Focalizaciones: Las focalizaciones se producen cuando una superficie reflectante agrupa una gran parte de los rayos sonoros en una zona o punto determinados.

Hay que evitarlas en la medida de lo posible a no ser que sean intencionadas, para redirigir una cantidad de rayos a una zona concreta.

Limitaciones de la teoría geométrica

In-homogeneidad del medio: Dado que el medio de propagación, en este caso el aire, no es homogéneo, el trazado de rayos, en la teoría, será una aproximación de la dirección real del rayo sonoro.

Reflexión difusa: Al no existir la superficie de reflexión totalmente lisa, el rayo reflejado nunca tendrá una reflexión especular.

Difracción: Cuando un rayo sonoro incide con un obstáculo que no es de tamaño considerable, otra onda se propagara sobrepasándolo en la misma dirección que venía. Este fenómeno no se considera en el método de trazado de rayos.

2.1.3. Teoría ondulatoria.

La teoría ondulatoria tiene en cuenta el carácter ondulatorio del sonido. Se basa en la resolución de la ecuación diferencial de la onda acústica en la sala. En la resolución de esta ecuación se tiene en cuenta las condiciones del entorno como puede ser los cerramientos, etc.

Campo sonoro en un paralelepípedo.

En un paralelepípedo se excitan ciertas frecuencias a la vez que se atenúan las restantes. Las frecuencias que se excitan en un recinto en forma de paralelepípedo son las que cumplen la ecuación:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

La excitación de estas frecuencias se explica por la formación de ondas estacionarias en el interior del recinto. Al coincidir la frecuencia del campo acústico emitido en la sala con las frecuencias propias de resonancia del recinto, se producen resonancias para las distintas frecuencias; estas resonancias crean máximos de presión en distintos puntos de la sala. Nótese que en la teoría estadística se estudia el campo difuso cuyos principios contradicen la teoría de modos.

Una vez explicados los conceptos básicos para entender la acústica de salas, centraremos nuestro desarrollo teórico en el Refuerzo Sonoro, es decir, en los elementos electrónicos introducidos en una sala para amplificar, distribuir y por lo tanto mejorar la acústica de una sala.

2.2 SISTEMA DE REFUERZO SONORO

El concepto teórico de un sistema de refuerzo sonoro está basado en la teoría estadística y en las diferentes hipótesis que se plantean en la misma. Por ello desarrollaremos con más profundidad los conceptos explicados en el punto 2.2.1.4 y nuevos términos que son concretos para los cálculos de un sistema de refuerzo sonoro.

INTRODUCCIÓN

Se denomina sistema de refuerzo sonoro al conjunto de sistemas electrónicos (altavoces , etapa de potencia, microfonía, ...) que tienen como fin realizar una amplificación del sonido para cubrir la necesidad de que al oyente le llegue un determinado nivel de potencia acústica , además de asegurarle la inteligibilidad del mensaje.

Ambos criterios se especifican de la siguiente manera:

- El nivel de potencia debe superar en 25 dB al ruido de fondo.
- La inteligibilidad es calculada mediante el parámetro AICons%

2.2.1 SONIDO DIRECTO Y SONIDO REVERBERANTE

En un sistema de refuerzo sonoro, un altavoz emite a un medio lo suficientemente amplio como para considerar que la onda emitida es de tipo esférico. Una de las propiedades de esta onda es su variación de valores de nivel de presión sonora ('Ley de Divergencia esférica'), según la cual el nivel de presión sonora cae 6 dB al duplicar la distancia.

Un frente de onda esférico se consigue si el altavoz o fuente emisor se encuentra alejado de cualquier superficie reflectante. En el caso de que un altavoz se encuentre en la situación ideal de campo libre, la onda emitida

cumple la ley de divergencia esférica y forma un frente de onda con “forma de esfera”, al cual llamaremos Campo Directo.

Si el altavoz se encuentra en un recinto cerrado, la existencia de múltiples reflexiones provocará la desaparición del frente de onda esférico debido a la interacción de las diversas reflexiones provocando un campo acústico casi difuso, en el que en cualquier punto del local encontraremos el mismo nivel de presión sonora.

En situaciones reales no existe un campo difuso como tal, es una hipótesis con la que poder entender el comportamiento del sonido en una sala, pero si se consiguen recintos con un grado de absorción suficientemente bajo como para calificarlo de campo casi-difuso. Es en esta situación cuando una amplia zona del local presenta un nivel de presión sonora constante. A esta situación la denominaremos Campo reverberante y consideraremos que en él no hay variación de la presión sonora.

Dentro de un local existen ambas zonas y las diferenciamos dependiendo del campo que ejerce más influencia (respecto a nivel sonoro) que el otro, ya que dentro de un recinto conviven los dos y como consecuencia. El nivel de campo directo dependerá de la potencia radiada por el altavoz y el de campo reverberante de la potencia radiada por el altavoz y la absorción del local. Estos parámetros dependen de la frecuencia, por lo que su estudio se realiza para cada banda de octava.

Modificadores de la absorción:

Normalmente el sonido de la fuente es dirigido hacia una zona de público, que actuará de superficie absorbente y que disminuirá en gran medida la energía acústica, reduciendo el nivel de campo reverberante. Por ello se utiliza un coeficiente modificador de la absorción (R)

$$\frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \alpha_1} = M_a \quad R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \cdot \frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \alpha_1} = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \alpha_1}$$

Modificadores de la absorción

α_1 = Coeficiente de absorción de la primera superficie.

S = Superficie del local

Si profundizamos en el direccionamiento del sonido, tendremos en cuenta que el altavoz radia en otras direcciones además de la zona de público. Teniendo esto en cuenta se añade otro término a la fórmula:

$$M_a = \frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \alpha_1} \cdot \frac{Q}{Q_{ideal}}$$
$$Q_{ideal} = \frac{180}{\arcsen \left[\sen \frac{\alpha}{2} \sen \frac{\beta}{2} \right]}$$

Ecuación de Molloy

La ecuación de Molloy calcula el Q de una fuente ideal que emitiera toda su energía dentro del haz de los -6dB.

2.2.2 EXISTENCIA DE VARIAS FUENTES

En el caso de que exista más de una fuente, la expresión del campo sonoro debe ser modificada.

Sin embargo, la expresión del campo creado por cada una de las fuentes sigue siendo la de Hopkins-Stryker.

En cualquier punto del local, la presión resultante sigue la ley de la suma de potencias acústicas, es decir, la presión acústica resultante cumple la ecuación:

$$P_t = \sqrt{\sum P_i^2}$$

Por lo tanto tendremos:

$$P_i^2 = \rho_o c W_i \left(\frac{Q_i}{4\pi r_i^2} + \frac{4}{R} \right) = \rho_o c \left(\frac{Q_i W_i}{4\pi r_i^2} + \frac{4W_i}{R} \right)$$

$$P_t^2 = \rho_o c \left[\sum_i \frac{W_i Q_i}{4\pi r_i^2} + \sum_i \frac{4W_i}{R} \right]$$

Como puede verse es una ecuación compleja en la que aparecen todos los datos de todos los altavoces y las distancias entre el punto estudiado y todos los altavoces. Si bien esta ecuación es la exacta, no es la más útil para el estudio del campo en la mayoría de los casos. Sería bastante interesante poder reducir la ecuación anterior a una ecuación similar a la de una única fuente, en la que las variables Q y r sean sólo de una fuente, la más cercana al punto en estudio.

2.2.3 FORMULA UNIFICADA

El proyectista puede decidir el uso de una fórmula simplificada aún en un caso complejo, siempre que considere aceptables los errores que se comentan.

Así la fórmula sencilla que se propone para uso general es la Hopkins-Stryker, con la introducción del modificador N tal como aparece a continuación:

$$P_t = \sqrt{\rho_o c W_1 \left[\frac{Q_1}{4\pi r_1^2} + \frac{4N}{R} \right]} \quad L_p = L_{w1} + 10 \log \left(\frac{Q_1}{4\pi r_1^2} + \frac{4N}{R} \right)$$

$$D_c = 0,141 \sqrt{\frac{Q_1 R}{N}} \quad N = \frac{\sum_i W_i}{\sum_d W_d} \Rightarrow \frac{\text{Todas las fuentes}}{\text{Fuentes que dan campo directo}}$$

Dentro de un local puede haber varios valores de N, según la zona.

Con estas ecuaciones, tenemos evaluada con exactitud tanto la presión como la Dc, en las zonas en que los campos directos no coincidan o en los que coincidiendo, sólo uno de ellos es de valor aceptable.

En las zonas en que varios altavoces (n) creen campo directo apreciable, la ecuación de presión da un valor bajo (con un error máximo de 10 Log n (dB)), pero la ecuación de distancia crítica, con el modificador N calculado según se indica, para cada tipo de zona, sigue siendo exacta.

2.2.4 EVALUACIÓN DE N

El modificador N es un parámetro importante a la hora de determinar la distancia crítica de cada una de las fuentes de un sistema de refuerzo sonoro con más de un elemento radiante. Se ha indicado anteriormente que el cálculo de la D_c es exacto en todos los casos, con la definición dada de N.

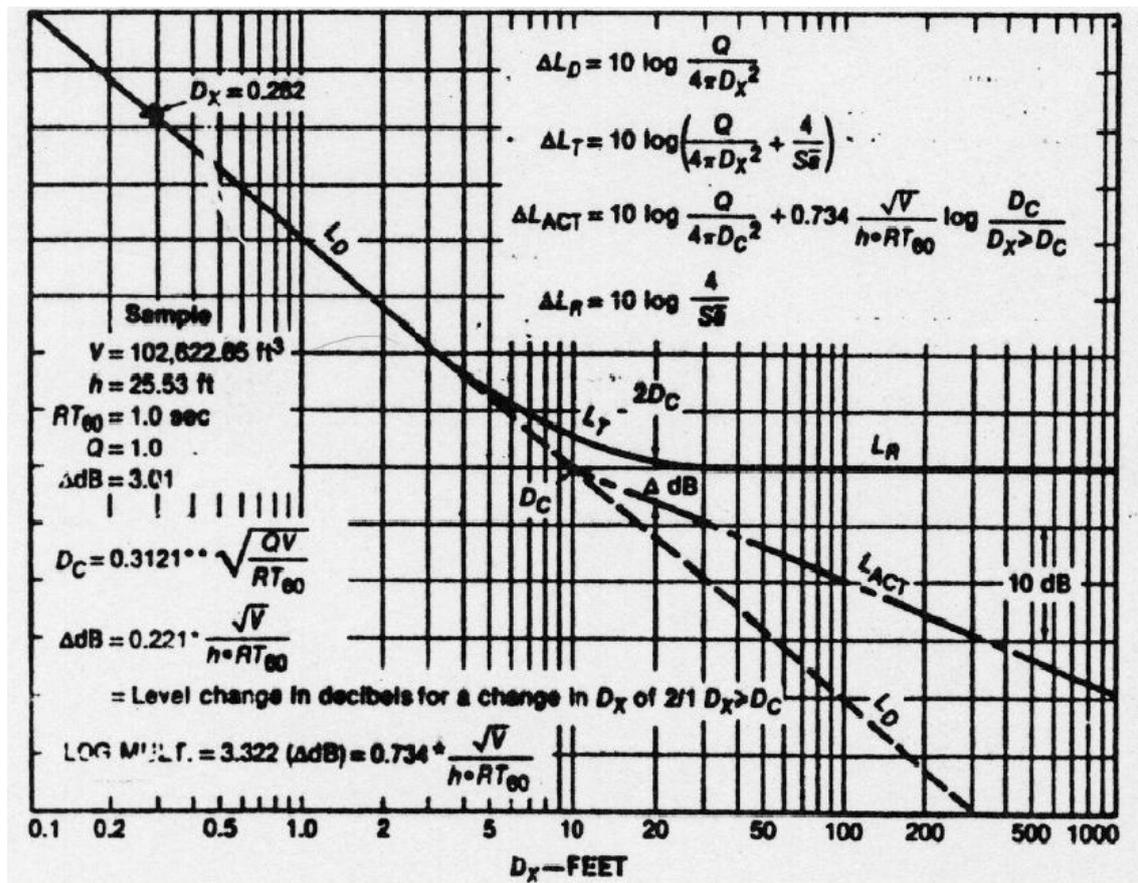
En definitiva, N es la relación entre la potencia acústica total radiada en el local respecto a la potencia acústica radiada sólo por los altavoces que crean campo directo en la zona en estudio.

Como mínimo habrá uno de esos altavoces, que es el altavoz más cercano, el que estemos estudiando en cada momento.

2.2.5 CAMPO SEMIREVERBERANTE

Hasta aquí se ha indicado que el campo reverberante se caracteriza por tener un nivel de presión igual en todos sus puntos. En la realidad, según seguimos alejándonos de la fuente, dentro del campo reverberante, el nivel de presión puede seguir disminuyendo. Este efecto es especialmente notable si se tiene un coeficiente medio de absorción superior a 0.2. Salvo en locales muy reverberantes, esta situación se da y se habla de campo semireverberante.

En la figura siguiente vemos que una vez alcanzada la distancia crítica, el nivel de presión no tiende a constante, sino que sigue disminuyendo con una cierta pendiente al duplicar la distancia, que llamaremos Δ .



Estas curvas son totalmente empíricas, y dependen mucho de la forma del local. Concretamente se han especificado unas fórmulas de cálculo que son:

*para locales de dimensiones regulares:

$$\Delta = \frac{0,4 \sqrt[6]{V}}{T_{60}} \text{ (dB/dd)}$$

*para locales con techos bajos, respecto a las otras dimensiones (altura 'h' en metros):

$$\Delta = \frac{0,4 \sqrt{V}}{h T_{60}} \text{ (dB/dd)}$$

Estas ecuaciones, obtenidas por Peutz, son aproximadas y pueden encontrarse en la realidad variaciones distintas a las calculadas. Sin embargo nos permiten hacernos una idea de lo que puede ocurrir.

La segunda expresión de Δ es muy utilizada como 'calificador' del campo reverberante:

*Si $\Delta < 1$ se considerará existencia de campo reverberante perfecto (nivel de presión cte)

*Si $1 < \Delta < 5$ se considerará campo directo siempre.

*Si $\Delta > 5$ se considerará campo directo siempre.

El último caso se dará en locales muy absorbentes.

Si se tiene la condición de campo semireverberante, las ecuaciones de nivel de presión a usar son:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) \text{ para } r \leq D_c$$

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi D_c^2} \right) + \frac{1,33\sqrt{V}}{hT_{60}} \cdot \log \frac{D_c}{r} \text{ para } r \leq D_c$$

Esta expresión es válida para una única fuente. Para varias fuentes, debe desarrollarse una fórmula completa considerando que en cada punto del local existe suma de potencias de las distintas fuentes.

Alternativamente a esta ecuación de Peutz, existe otra ecuación elaborada por Schultz para locales pequeños y poco reverberantes. El proyectista deberá elegir cual ecuación se ciñe más a las características del recinto. La ecuación de Schultz es la siguiente:

$$L_p = L_w - 10 \log(r) - 5 \log(V) - 3 \log(f) + 25$$

Esta ecuación se refiere al nivel de presión más allá de la Dc. El factor 25 se usa cuando la distancia y el volumen están expresados en pies y pies cúbicos respectivamente. Si se usan metros, el factor debe cambiarse.

2.2.6 CRITERIOS DE NIVEL:

Fundamentos

Los criterios de nivel se desarrollan considerando que la única fuente de problemas para la inteligibilidad es la S/N. Así, deberá haberse comprobado con anterioridad que no existen problemas con la reverberación y con las reflexiones molestas.

2.2.6.1 Distancia Acústica Equivalente (E.A.D.)

La EAD (distancia acústica equivalente) es un concepto que se aplica a un sistema de refuerzo sonoro.

No tiene sentido su aplicación si se tiene una comunicación emitida por un orador a viva voz.

La EAD es la distancia a la que estaría un orador que provocara en el oyente el mismo nivel de presión sonora, en campo directo, que está produciendo el sistema de refuerzo sonoro. Este último puede tener al oyente en campo directo o en reverberante, lo que importa es el valor del nivel de presión. Así, el uso de EAD hace que cualquier campo, directo o reverberante, en el que no haya problemas de inteligibilidad por la reverberación, sea equivalente a un campo directo provocado por un orador.

El nivel de presión provocado por un orador sin refuerzo, en campo directo es:

$$L_o = L_o (1\text{m}) - 20 \log \frac{D_o}{1\text{m}}$$

$$L_{rs} = L_o (1\text{m}) - 20 \log \frac{EAD}{1\text{m}}$$

Si el sistema de refuerzo crea un nivel de presión L_{rs} , este nivel es el que crearía un orador situado a una distancia EAD (en campo directo, evidentemente).

Existen dos conclusiones interesantes:

1.- Se puede calcular la EAD de una instalación de refuerzo sonoro según la fórmula:

$$EAD = 10^{\frac{L_{rs} - L_o(1m)}{20}} \text{ (m)}$$

2.- Estableciendo un valor de EAD a conseguir, se puede obtener el valor del nivel de presión sonora que debe provocar la instalación de refuerzo sonoro.

$$L_{rs} = L_o(1m) - 20 \log EAD(m)$$

Es importante esta segunda conclusión puesto que establece un criterio de selección del nivel de presión total a conseguir en una instalación. Sólo es necesario establecer un valor para la EAD a conseguir.

Para ello, el método más usado es tomar como EAD, la máxima distancia que puede existir entre el orador y el oyente en una comunicación a viva VOZ.

No debe perderse de vista que si cada oyente tiene un nivel de presión distinto debido al sistema de refuerzo, cada oyente tiene una EAD distinta. La EAD que interesa es la del oyente en la peor situación de nivel. Para este oyente es para el que se aplique lo anteriormente expuesto. Si a este oyente le aseguramos una EAD adecuada, los demás tendrán otra EAD mejor.

2.2.6.2 GANANCIA ACUSTICA NECESARIA (NAG)

Una vez establecido un valor de nivel de presión a conseguir, basta con realizar los cálculos tendentes a establecer dicho nivel en los oyentes más alejados o en los peor cubiertos.

Aunque con un ordenador los cálculos de niveles es tarea fácil, cuando no se dispone de tal ayuda dichos cálculos son tediosos. Si además pensamos en la posibilidad de que tras todo el cálculo, no sea bueno y deba repetirse el proceso, resulta evidente la utilidad de un método que nos indique rápidamente las posibilidades que tiene el sistema de refuerzo de conseguir dicho nivel de presión.

Este método de cálculo previo hace uso del concepto de 'Ganancia Acústica'.

La Ganancia Acústica (AG) es la diferencia de niveles de presión en un punto de la instalación (p.e. Un oyente) entre el nivel obtenido con refuerzo sonoro y el obtenido con un orador de viva voz.

Si consideramos que el nivel de presión que debe dar un sistema de refuerzo sonoro es el de la EAD, entonces:

$$L_{rs} = L_o(1m) - 20 \log \frac{EAD}{1m}$$

y la diferencia de ese nivel con el que produce un orador de viva voz es una ganancia acústica que se denomina 'Ganancia Acústica Necesaria para EAD (NAG)'. Respecto al orador de viva voz, se considera que produce el mismo nivel de presión a 1m que el usado en la selección de la EAD a conseguir.

El nivel de presión que provoca un orador sigue la ecuación

$$L_o = L_{w_o} + 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$L_o = L_o(1m) - 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi} \right) + 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Luego la NAG a una distancia D_o se calculará como:

$$NAG = 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi} \right) - 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi D_o^2} + \frac{4}{R} \right) - 20 \log \frac{EAD}{1m}$$

con $Q_o = 2.5$ a 2Khz.

Si el oyente se encontraba inicialmente en el campo directo del orador (típico en instalaciones al aire libre), la NAG a conseguir por el sistema de refuerzo sonoro será:

$$L_{rs} - L_o = 20 \log D_o - 20 \log EAD$$

Ahora bien, si el oyente se encontraba en campo reverberante del orador, la NAG a conseguir es:

$$NAG = 20 \log D_c - 20 \log EAD$$

$$NAG = 10 \log \left(\frac{Q_o R}{16\pi} \right) - 20 \log \frac{EAD}{1m}$$

En el siguiente apartado calcularemos la 'Ganancia Acústica Potencial (PAG) de la instalación de refuerzo'.

Si esta PAG es superior a la NAG calculada anteriormente, el sistema de refuerzo sonoro es viable.

Debe quedar claro que la ganancia acústica es una relación de niveles y no un nivel absoluto.

También debe tenerse en cuenta que el concepto es, en principio, aplicable a una instalación en la que existe un orador, y que necesita refuerzo sonoro.

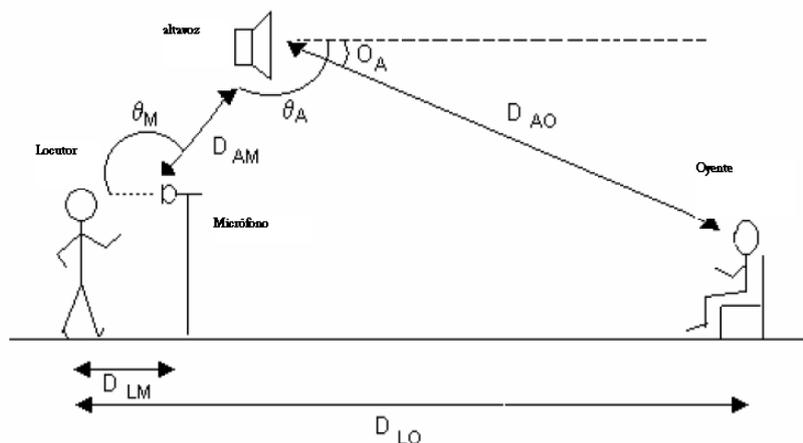
Si no existe un orador o el orador no es visible (p.e. Megafonía de avisos) puede seguir usándose el concepto de EAD a conseguir, pero el uso de la NAG y la PAG como criterio previo de comprobación de la posibilidad del sistema de refuerzo, no es interesante.

2.2.6.3 GANANCIA ACÚSTICA POTENCIAL (PAG)

Vamos analizar las posibilidades teóricas de ganancia acústica de una instalación en la que exista un altavoz.

Posteriormente se indicará las modificaciones a tener en cuenta en caso de varios altavoces.

En la figura siguiente aparece el esquema principal de la situación a analizar.



Esquema general de un Sistema de Refuerzo Sonoro Activo

Un orador se encuentra a una distancia D_o del oyente y tiene un micrófono a una distancia D_m . El altavoz de refuerzo sonoro se encuentra a una distancia D_{ao} del oyente y a una distancia D_{am} del micrófono.

El análisis de ganancia acústica se realiza comparando en la posición del oyente, el nivel del altavoz y el del orador.

El valor máximo posible de esta ganancia acústica es lo que se denomina 'ganancia acústica potencial' PAG.

Este valor máximo viene impuesto por la existencia del fenómeno de realimentación acústica. Si no existiese realimentación, el límite de la ganancia acústica sólo vendría dado por la capacidad de potencia del equipo. Esto es lo que explica la afirmación realizada en el apartado anterior sobre la falta de interés de este método en instalaciones donde no existe orador o este no es visible, en definitiva, en instalaciones donde no hay un micrófono cerca de los altavoces.

Haciendo uso de la ecuación de Hopkins-Stryker para determinar el nivel de presión, se tiene:

*Nivel creado por el altavoz_

-En el oyente:

$$L_{AO} = L_{WA} + 10 \log \left(\frac{Q_{AO}}{4\pi D_{AO}^2} + \frac{4}{R} \right)$$

-En el micrófono (no se consideran directividades):

$$L_{AM} = L_{WA} + 10 \log \left(\frac{Q_{AM}}{4\pi D_{AM}^2} + \frac{4}{R} \right)$$

*Nivel creado por el orador

-En el oyente:

$$L_{LO} = L_{WL} + 10 \log \left(\frac{Q_{LO}}{4\pi D_{LO}^2} + \frac{4}{R} \right)$$

-En el micrófono

$$L_{LM} = L_{WL} + 10 \log \left(\frac{Q_{LM}}{4\pi D_{LM}^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Los niveles en el oyente permiten calcular la ganancia acústica:

$$GA = L_{wa} - L_{wo} + 10 \log \left(\frac{Q_a}{4\pi D_{ao}^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi D_o^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Evidentemente, es de utilidad realizar los cálculos para el oyente más alejado.

La condición de acoplamiento por realimentación se da cuando en el micrófono, los niveles del orador y del altavoz coinciden (es condición necesaria aunque no suficiente). Sin embargo, no conviene fijar la condición de realimentación en el límite sino permitir un margen de 6 dB, por lo que la ecuación indicará que el límite de la ganancia acústica es aquel para el que el nivel del altavoz en el micro es 6 dB inferior al nivel del orador en el micro. Estas consideraciones tan sencillas sobre la

realimentación son posibles porque se supone que el sistema estará adecuadamente ecualizado y 'notch-eado'.

Además, existen otras razones para ampliar el margen antes de acoplamiento, entre las que se encuentra el número de micrófonos simultáneamente abiertos (NOM o NMA). También existe otra razón para disminuirlo, concretamente el uso de elementos con directividad adecuada. Estos detalles se concretarán más tarde. De momento se introducirán en la fórmula como OMR (Otros Márgenes de Realimentación) expresados en dB.

La condición de realimentación queda entonces:

$$-(6 + OMR) = L_{wa} - L_{wo} + 10 \log \left(\frac{Q_a}{4\pi D_{am}^2} + \frac{4}{R} \right) - \\ -10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi D_m^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Si usamos las dos ecuaciones anteriores y entre ellas eliminamos los términos de nivel de potencia acústica radiada, obtenemos una expresión compacta correspondiente a la ganancia acústica obtenible antes de realimentación, es decir, la máxima posible, lo que se corresponde con el concepto PAG.

Así:

$$PAG = 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi D_m^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \log \left(\frac{Q_a}{4\pi D_{ao}^2} + \frac{4}{R} \right) - \\ - 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi D_o^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log \left(\frac{Q_a}{4\pi D_{am}^2} + \frac{4}{R} \right) - (6 + OMR)$$

Esta expresión genérica se concretará, más adelante, para varios casos de interés.

En cuanto al valor de OMR, deben considerarse tres detalles:

- 1.-Si existen varios micrófonos abiertos a la vez, hay más realimentación. La evaluación de este efecto, si todos los micrófonos están en el campo reverberante del altavoz, es $OMR=10 \cdot \log(NMA)$. De modo que a más micrófonos, mayor debe ser el margen de seguridad.
- 2.-Si se eligen altavoces y micrófonos directivos, la realimentación disminuye. Esto puede contemplarse disminuyendo el margen de seguridad necesario. En las condiciones reales, incluso con los elementos más directivos existe un límite en la reducción del margen de seguridad. Este límite es de $OMR = -6dB$ en instalaciones al aire libre y $OMR=-3dB$ en los locales cerrados.
- 3.-El proyectista puede considerar oportuno tomar un margen superior a los comentados, por razones personales.

2.2.7 CRITERIOS DE DISEÑO CON EAD

Una vez que se ha comprobado que la reverberación no afecta a la inteligibilidad y que esta última sólo depende de una adecuada relación S/N, puede utilizarse, para seleccionar el valor adecuado de nivel (o de S/N), el criterio de la EAD.

Fijada la EAD, puede recurrirse a una comprobación previa de posibilidades del sistema antes de empezar los cálculos de nivel de presión en todos los puntos. Esta comprobación hace uso de la ganancia acústica.

La ganancia acústica necesaria NAG es un dato que se obtiene directamente a partir de la EAD elegida.

Los datos básicos de la posición y distancias de los elementos de la instalación permiten calcular la ganancia acústica máxima obtenible PAG.

Si PAG es superior a NAG todo es correcto y puede realizarse el refuerzo sonoro con éxito. Si PAG no es mayor que NAG, deben reubicarse los elementos. Puede llegar el caso de resultar imposible que PAG supere a NAG sólo con reubicar elementos y debería procederse a cambiar otros parámetros como el Q del altavoz, lo cual lleva a un recálculo de otros detalles desde el principio.

Una vez que se ha conseguido que PAG supere a NAG, debe elegirse un valor concreto de ganancia acústica a conseguir, cumpliéndose que $NAG \geq PAG$.

Determinado ese valor a conseguir, y teniendo en cuenta que ya se ha fijado la posición de los elementos del sistema, usando la ecuación general de ganancia acústica se obtiene que:

$$L_{wa} - L_{wo} = GA - 10 \log \left(\frac{Q_a}{4\pi D_{ao}^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi D_o^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Que permite conocer la diferencia de las potencias acústicas radiadas por el orador y por el altavoz.

Para que el dato anterior sea útil, debe tenerse en cuenta que:

$$L_{wa} - L_{wo} = L_a(1m) - 10 \log \left(\frac{Q_a}{4\pi} + \frac{4}{R} \right) - L_o(1m) + 10 \log \left(\frac{Q_o}{4\pi} + \frac{4}{R} \right)$$

De esta ecuación, el único dato que no se ha fijado con anterioridad es el nivel del altavoz a un metro.

Recuérdese que el nivel del orador a 1 metro se ha elegido al determinar la EAD. Es conveniente tener cuidado en este punto de determinar si se están utilizando niveles de pico de voz o niveles RMS. El Q del orador es 2.5.

Una vez determinado el valor que debe tener el altavoz a un metro, éste se puede obtener jugando con dos variables del sistema: la sensibilidad del altavoz y la potencia eléctrica suministrada:

$$L_a(1m) = L_{sa}(dB/1w/1m) + 10 \log P_e$$

Si el altavoz ya está decidido y no puede cambiarse, sólo se puede jugar con la potencia eléctrica.

Estos datos, para el caso estudiado de una única fuente, no han sido considerados anteriormente. Más adelante se indicará cómo utilizar la GA en instalaciones con varias fuentes y veremos que en esos casos, los parámetros indicados ya habrán sido considerados en el cálculo de 'N', salvo que N se haya podido calcular por ecuaciones simplificadas en las que no aparecieran dichos parámetros.

Otro detalles importante en el diseño del sistema de refuerzo sonoro es que el nivel máximo del altavoz a 1 metro, dependerá de la potencia máxima del amplificador. Ahora bien, la potencia que suministra el amplificador en cada momento, depende del nivel de señal que existe en su entrada y de la posición del control de ganancia del amplificador. Así, siguiendo la cadena de equipos electrónicos, es evidente que el nivel que suministra el altavoz a 1 metro de distancia, está supeditado al nivel que provoque el orador en el micrófono y a la ganancia total del sistema electrónico:

$$L_a(1m) = L_o(micro) + S_{micro}(dBV/1dB_{spl}) + \\ + G_{equipo}(dB) + S_{alt}(dB_{spl}/1dBV/1m)$$

Es evidente que el sistema debe tener unas ganancias más que suficientes (y ajustables) para que independientemente del nivel del orador, se consiga el adecuado nivel a 1 metro del altavoz.

También es interesante notar que el nivel del orador en el micrófono depende de la distancia entre ellos, la cual es un parámetro que afecta a la

ganancia acústica potencial, luego una vez más entramos en un juego de factores que interactúan entre sí.

La mejor situación es, evidentemente, la de tener un orador de voz potente que se acerque mucho al micrófono.

Debe tenerse en cuenta además que la teoría hace referencia a unos Q que normalmente se consideran axiales. En un cálculo real, debe considerarse el valor de Q del altavoz en la dirección correspondiente a la distancia más lejana del oyente. Para el Q del orador, siempre consideraremos el valor en el eje.

2.2.8 PROCESO DE DISEÑO

Como resumen se indican a continuación los pasos a seguir para el diseño:

- *Comprobación de que la AICons debida a T60 es inferior a 15%.
- *Determinar la EAD según el ruido de fondo y el nivel del orador a 1m.
- *Calcular la NAG para el oyente más alejado.
- *Comprobar que PAG es superior o igual a NAG.
- *Elegir una GA de diseño.
- *Calcular el nivel del altavoz a 1m necesario para esa GA.
- *Seleccionar la sensibilidad del altavoz y la etapa de potencia.
- *Comprobar las coberturas de niveles (ver siguiente apartado).
- *Seleccionar el resto del equipo electrónico.

2.2.9 SISTEMAS CON MÚLTIPLES FUENTES

En el caso de existir múltiples fuentes, también puede desarrollarse un cálculo del PAG, aunque la cuestión se complica, salvo que se puedan hacer simplificaciones.

La simplificación más usada es la que establece las condiciones siguientes:

- el micrófono está en el campo reverberante de todos los altavoces o como mucho en el campo directo sólo del más próximo.
- el oyente está en el campo reverberante de todos o en el campo directo de sólo el más próximo.

Así, las ecuaciones derivadas de dichas situaciones son similares a las usadas para un único altavoz, salvo que aparece el término 'N' en los términos reverberantes.

2.2.10 CONTROL DE COBERTURAS

Una vez que se han determinado una gran cantidad de parámetros del sistema mediante los diversos criterios explicados hasta ahora, debe realizarse un control de las coberturas y de los niveles de presión definitivos y totales obtenidos en cada punto del auditorio.

Para ello, lo mejor es disponer de un sistema informatizado que realice los cálculos de niveles totales.

En caso de no disponer de dicho sistema, deberán realizarse cálculos para

los puntos más significativos, en cuanto a críticos, del auditorio.

Téngase en cuenta, que muchas veces, por sencillez en los cálculos de los criterios anteriores, se usan valores válidos para el eje del altavoz, pero normalmente los puntos críticos se suelen encontrar fuera de éste, por lo que deben verificarse los resultados con un buen control de coberturas.

Debe ser innecesario hacer notar que cuando se hacen cálculos con situaciones sencillas (en el eje, etc...)

, los valores obtenidos, con el fin de que los valores en los puntos críticos no se queden cortos al realizar las comprobaciones finales de cobertura.

Como detalle importante en el control de coberturas, debe tenerse en cuenta que para las zonas que queden en el campo directo del altavoz, es importante el valor de Q en cada dirección de emisión, al igual que los haces de -6dB. Sin embargo, en el campo reverberante, el nivel de presión es el mismo en todos los puntos, por lo que es independiente de la dirección en que está el altavoz, y por tanto, no influye el haz de -6 dB. Sin embargo, no debe olvidarse que el Q en cada dirección influye a la inteligibilidad, aunque el oyente esté en campo reverberante, y por ellos es importante controlar al apuntamiento del altavoz.

Otro detalles, al respecto del haz de -6dB es que forma en el espacio un cono de revolución. La cobertura de ese cono consistirá en el corte de dicho cono con el plano de los oyentes.

Si el plano es perpendicular al eje del cono (eje del altavoz), se obtendrá una circunferencia. Todos los puntos de la circunferencia están equidistantes del altavoz y corresponden a una dirección con el mismo Q, por lo que todos esos puntos tiene el mismo nivel de presión.

Sin embargo, si el plano de la audiencia corta oblicuamente al cono, el

resultado es una elipse, pero ciertos puntos de ella estarán más cerca del altavoz que otros, por lo que no existe la misma presión en todos los puntos. Esta es un detalle importante en el control de coberturas, pues demuestra que no basta con un estudio geométrico.

Ahodando en la problemática de la cobertura, debe notarse que las formas de los cortes con el cono son siempre redondeadas, mientras que las superficies a cubrir suelen ser rectangulares, por lo que es fácil deducir que suele ser una cuestión relativamente complicada asegurar la cobertura.

Existen dos tendencias a la hora de plantearse cubrir una superficie rectangular con coberturas redondas. La primera inscribe la elipse dentro del rectángulo, quedando 'sin iluminar' las esquinas del rectángulo y dejando de la mano de la reverberación 'su relleno'. Esta tendencia puede intentarse en locales suficientemente reverberantes, controlando que no exista pérdida de inteligibilidad en esas zonas.

La otra tendencia es la de inscribir el rectángulo dentro de la elipse. Este método es necesario en ambientes sin reverberación.

Por supuesto, si en el local todos los oyentes están en campo reverberante del altavoz, el análisis de los conos es meramente orientativo y sólo sirve para comprobar, a través del Q, los valores de la distancia crítica y distancia límite útiles para verificar la inteligibilidad.

En cuanto a este último detalle, la inteligibilidad, es interesante estudiar la cobertura desde el punto de vista, no del nivel de presión total en cada punto del aforo, sino de la relación nivel directo-nivel reverberante en cada punto.

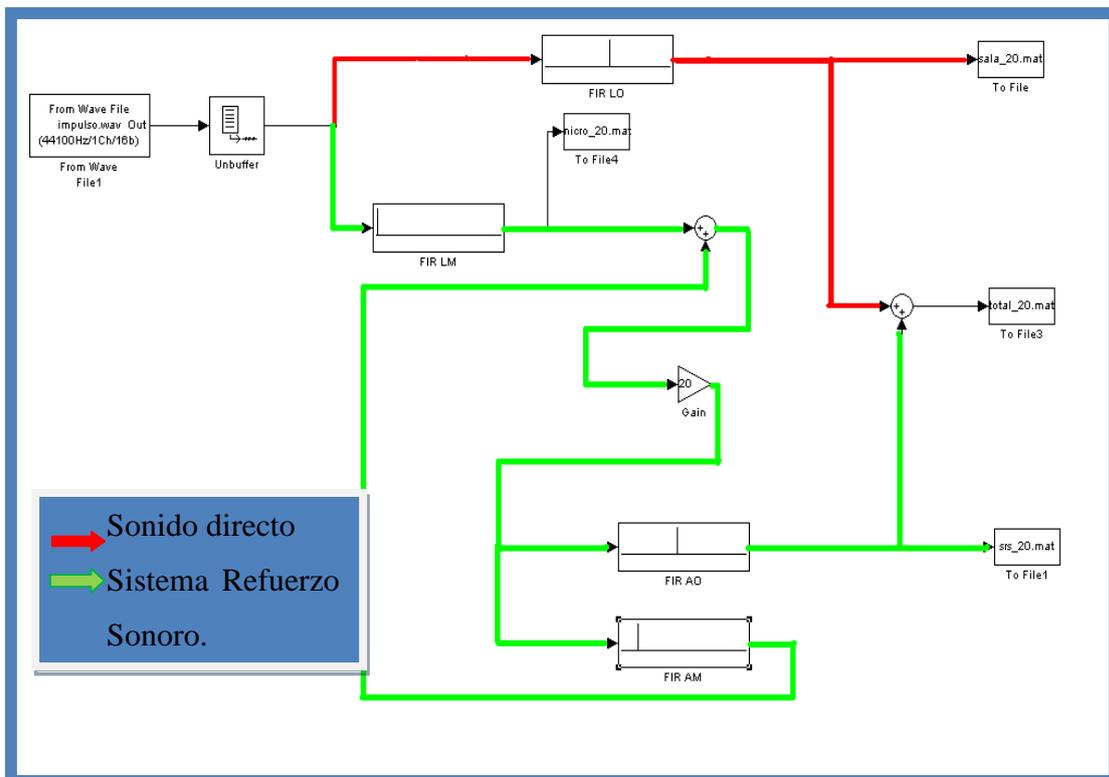
3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1. Creación de un software de simulación de Sistemas de refuerzo sonoro activo.

En primer lugar con el programa Simulynk™ diseñamos mediante filtros FIR las relaciones entre elementos constituyentes en cualquier sistema de refuerzo sonoro dentro de una sala: Locutor, micrófono, altavoz, oyente, sala.

Cada uno de estos filtros tendrá en cuenta el retardo y la amplitud del sonido respecto a las distancias existentes entre los mismos.

El programa es un modelo de un Sistema de Refuerzo Sonoro básico dentro de una sala.



En la figura anterior se diferencia dos “caminos”:

1.- El superior simula la influencia de la sala en la propagación del sonido entre locutor y oyente: Mediante un filtro FIR que contiene la respuesta al impulso entre Locutor–Oyente.

2.-El inferior simula el Sistema de Refuerzo Sonoro: En este caso serán tres filtros FIR: Locutor- Micrófono, Altavoz-Micrófono, Altavoz-Oyente y un bloque de ganancia.

El lazo de realimentación se encuentra entre la salida del FIR Altavoz-Micro y el sumador que se encuentra después del FIR Locutor-Micrófono. Posteriormente y con la ayuda de un script de Matlab que nos calcula el tiempo de reverberación, observaremos la influencia del sistema en nuestra señal original.

En este PFC se han realizado dos simulaciones que se explican a continuación.

MODELO INICIAL

En el modelo inicial del proyecto modelamos las 4 relaciones entre los diferentes elementos de un SRS como impulsos, al igual que utilizaremos un impulso como señal de entrada.

Para este modelo inicial hemos tomado los datos de un problema tipo tomado de la asignatura Diseño Acústico de Recintos.

Tendremos 4 filtros que relacionan los 4 elementos de nuestro sistema de refuerzo sonoro.

Dichos impulsos serán los filtros en nuestro programa de Simulynk™ y tendrán una amplitud igual a $1/r$ y un número de muestra en función de $(r/c)*fs$.

Siendo r la distancia, c la velocidad de sonido en el aire y fs la frecuencia de muestreo, que en nuestro caso hemos escogido 44100.

MODELO 2: Simulación del Aula Magna de la EPSG con las respuestas al impulso medidas in-situ.

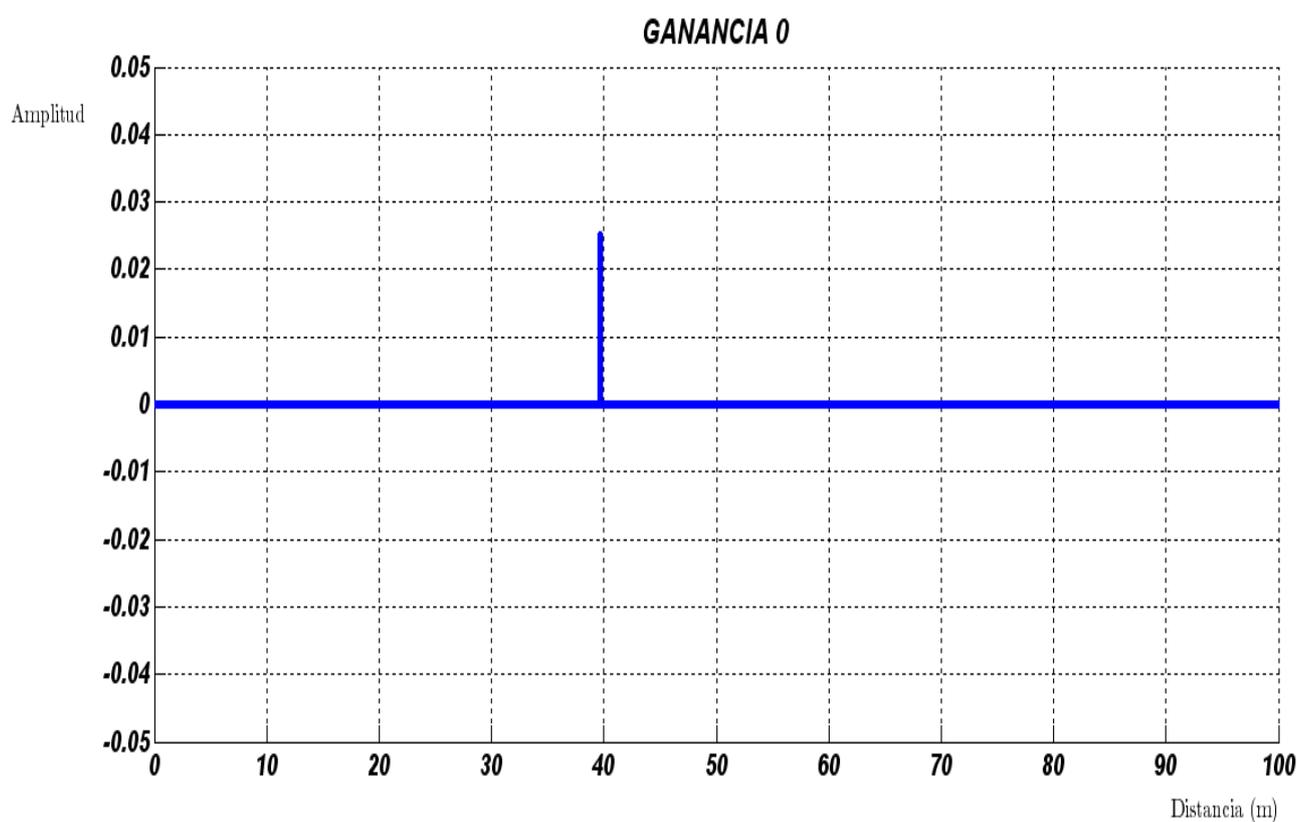
Para un caso más práctico se ha escogido el Aula Magna de la EPSG, en el que las mediciones para nuestros diferentes filtros FIR han sido medidas in-situ (Véase ANEXO I: medidas de Respuestas al Impulso en el Aula Magna).

4. RESULTADOS

MODELO INICIAL:

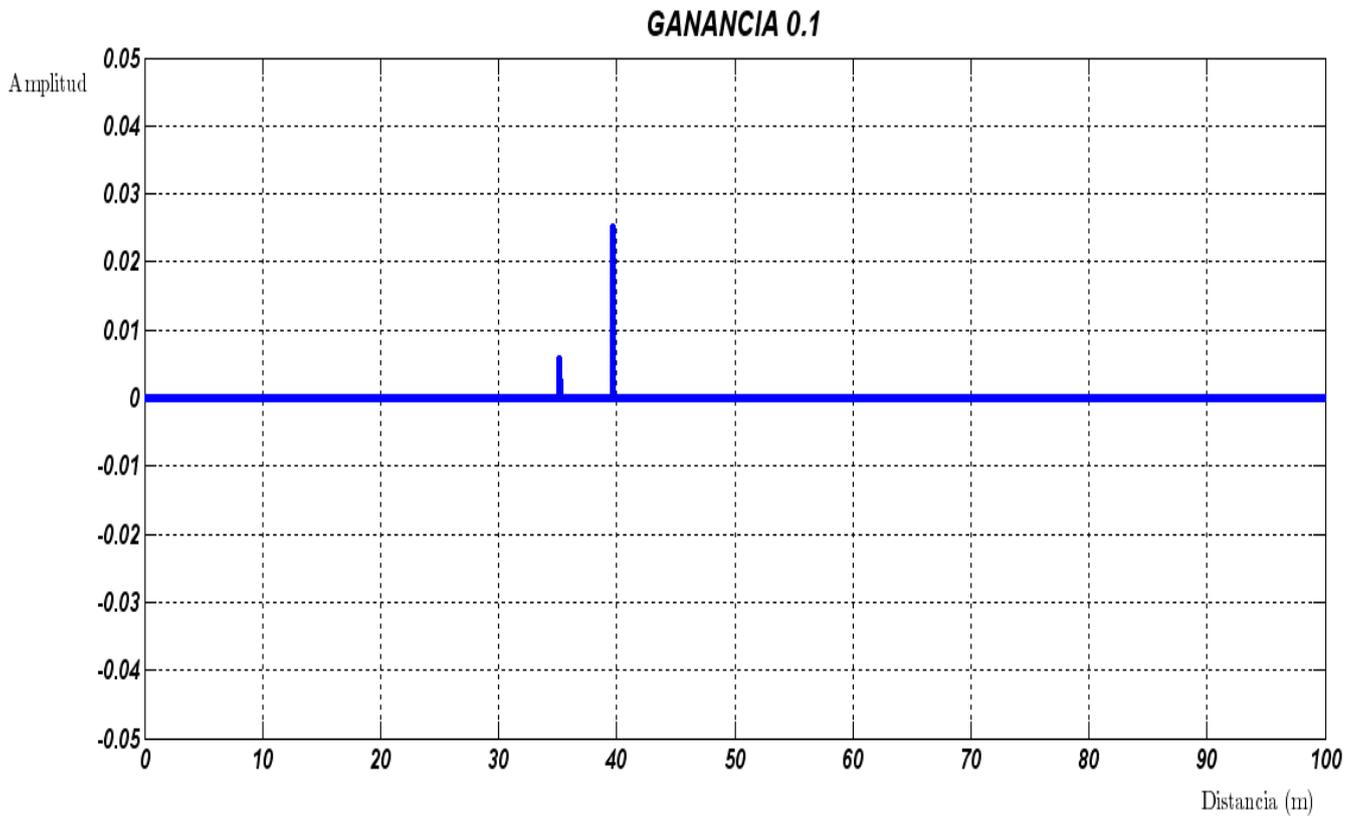
Para este modelo hemos hecho varias simulaciones con diferentes Ganancias y una a Ganancia cero.

Ganancia cero:



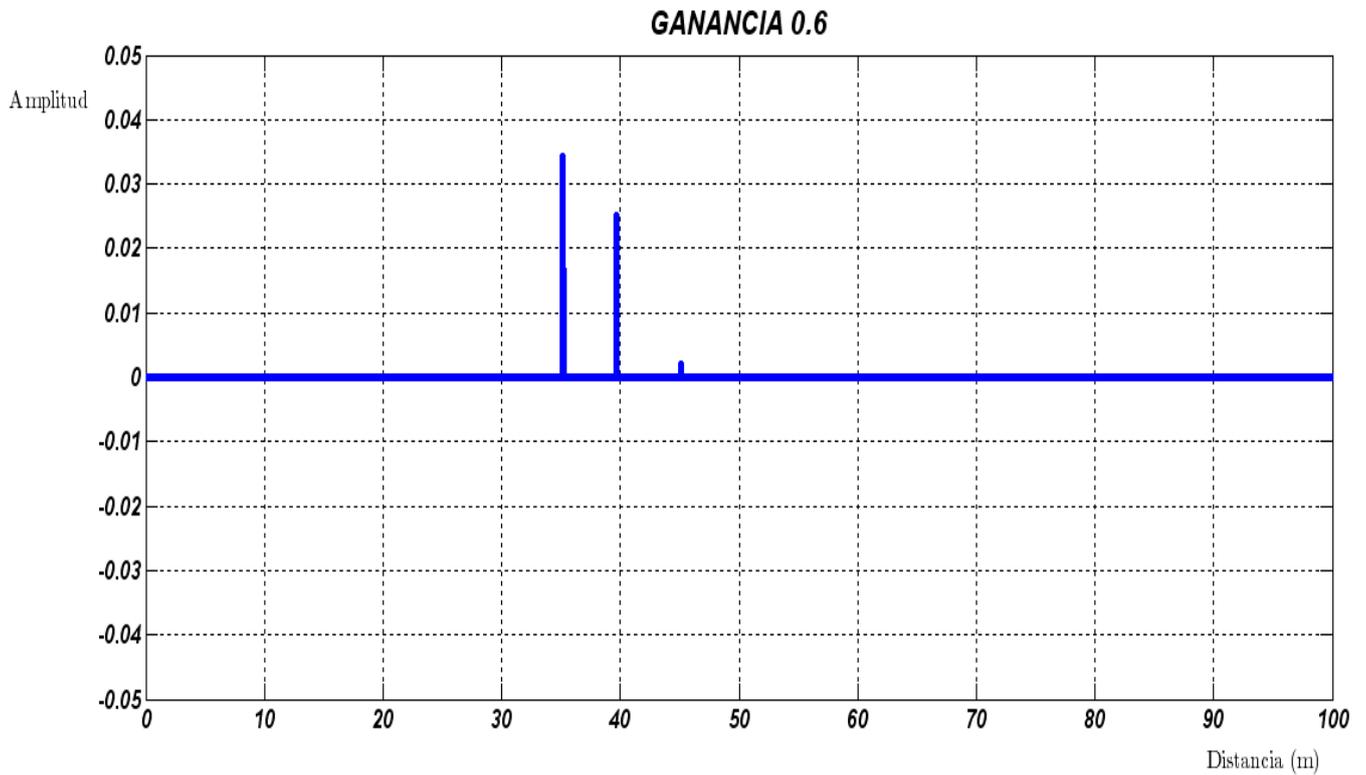
Al ser ganancia 0 la única señal (en este caso un impulso) que le llegaría al oyente sería la del propio locutor, ya que con ganancia 0 suponemos un sistema de refuerzo sonoro apagado.

Ganancia 0.1



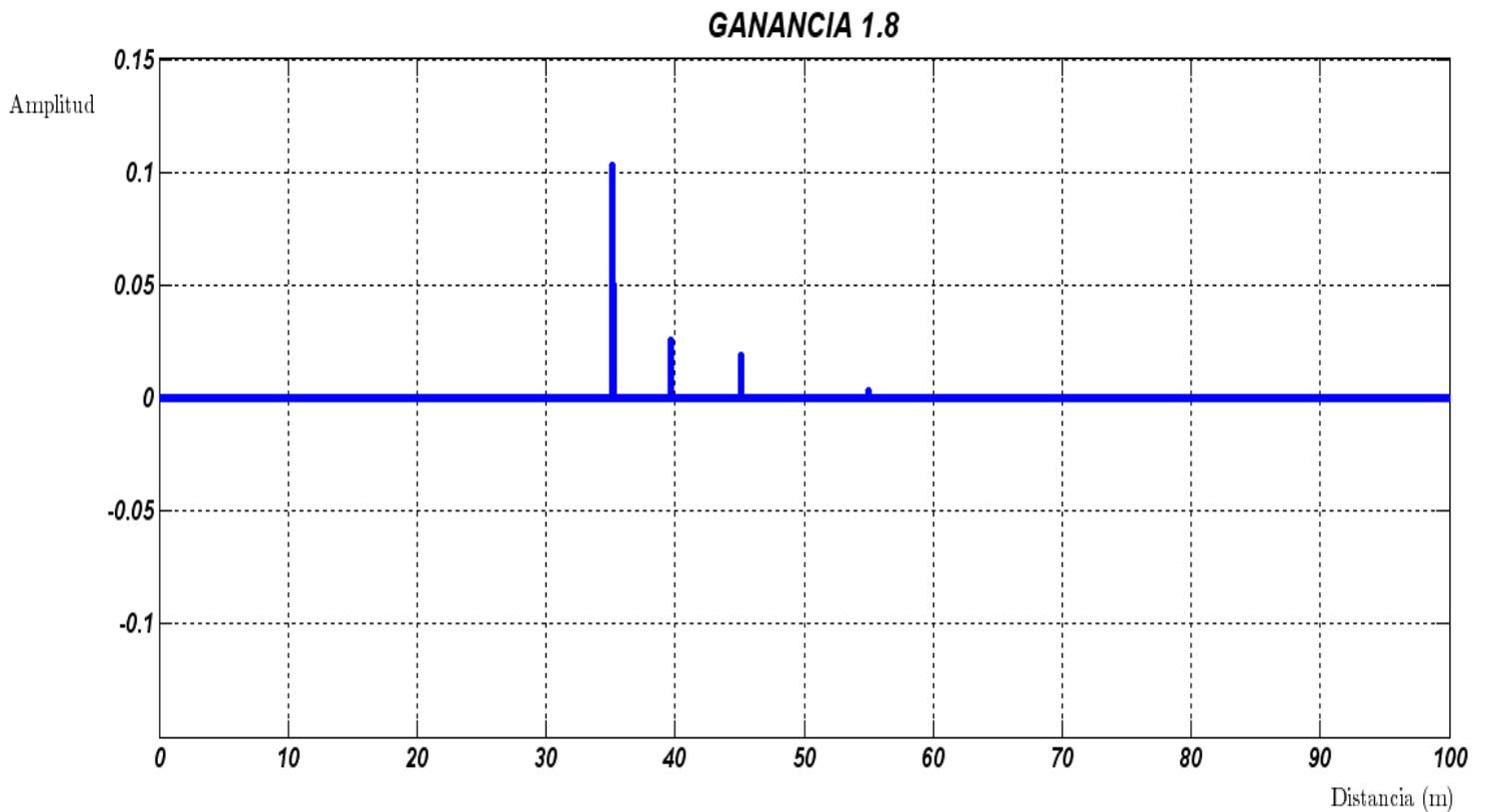
Con una ganancia de 0.1 observamos como la señal del locutor es la que le llega al oyente con mayor intensidad, aunque observamos el efecto del SRS y un pequeño eco debido a la retroalimentación del sistema.

Ganancia 0.6



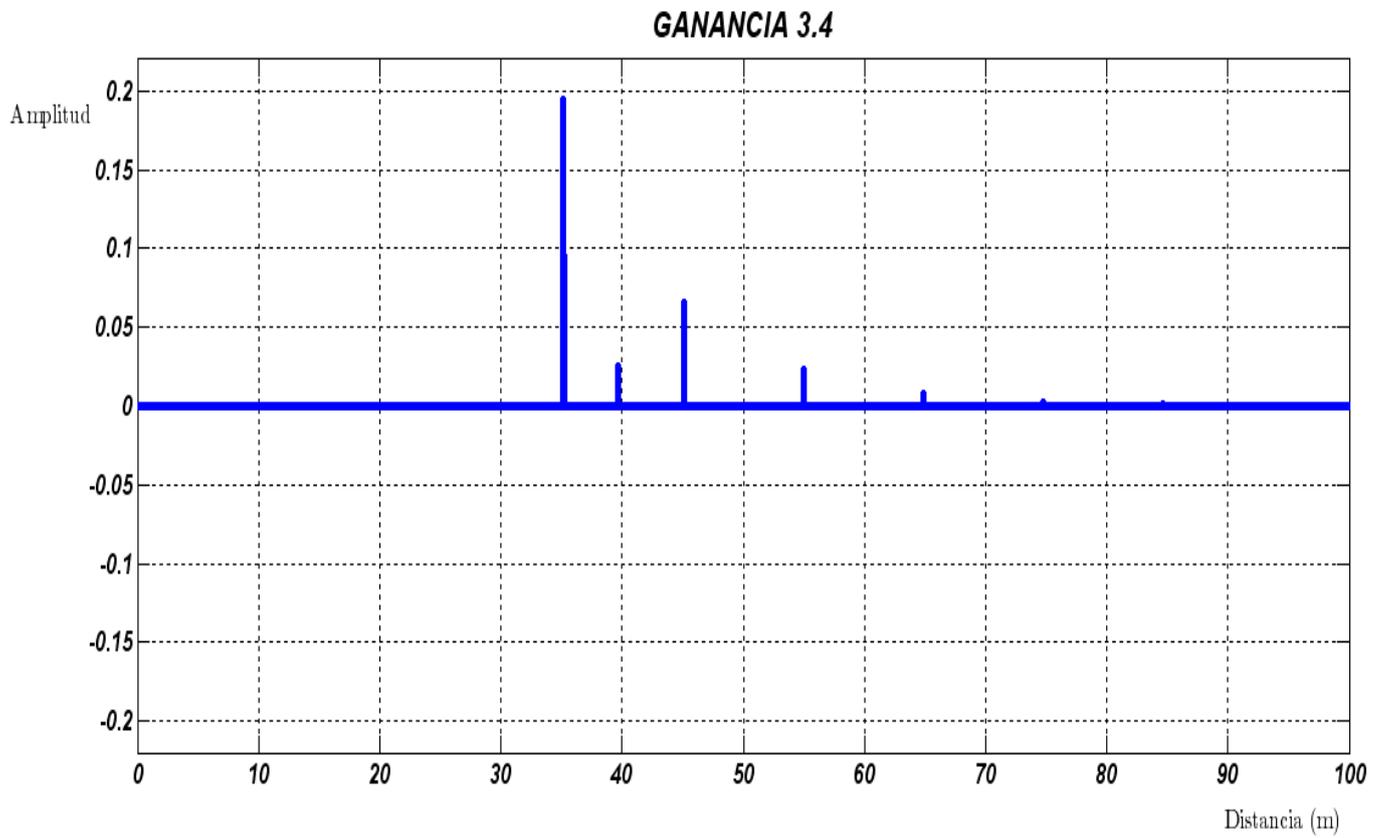
En este caso ya no predomina la señal directa del locutor, sino es el SRS.
La aparición de “ecos” es más notable.

Ganancia 1.8:



En este caso ya no predomina la señal directa del locutor, sino es el SRS.
La aparición de “ecos” es más notable.

Ganancia 3.4:



En esta simulación aparecen ecos incluso antes de la llegada del propio sonido directo al oyente.

Tabla de tiempos de reverberación del modelo inicial

G/f	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2Khz	4Khz
0	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
0.1	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
0.6	0,07	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00
1.1	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
1.8	0,13	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08

Tr Modelo Inicial

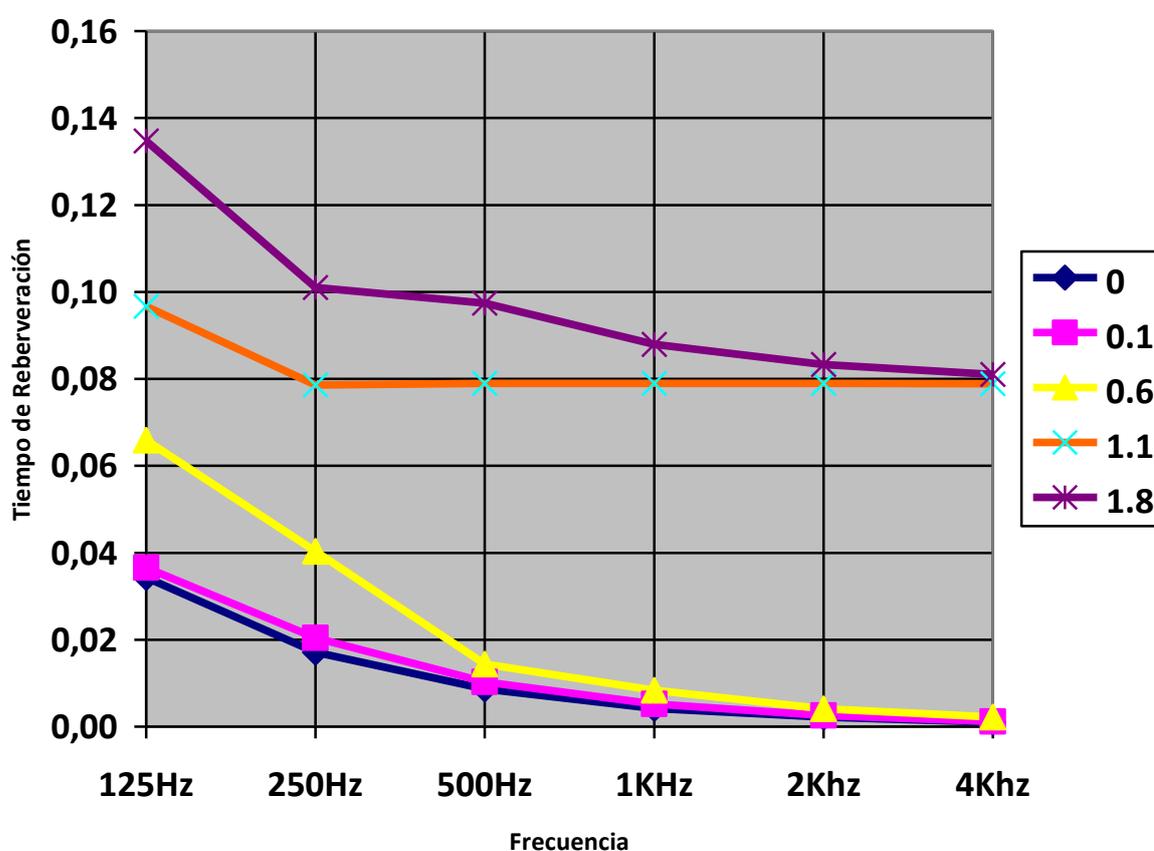
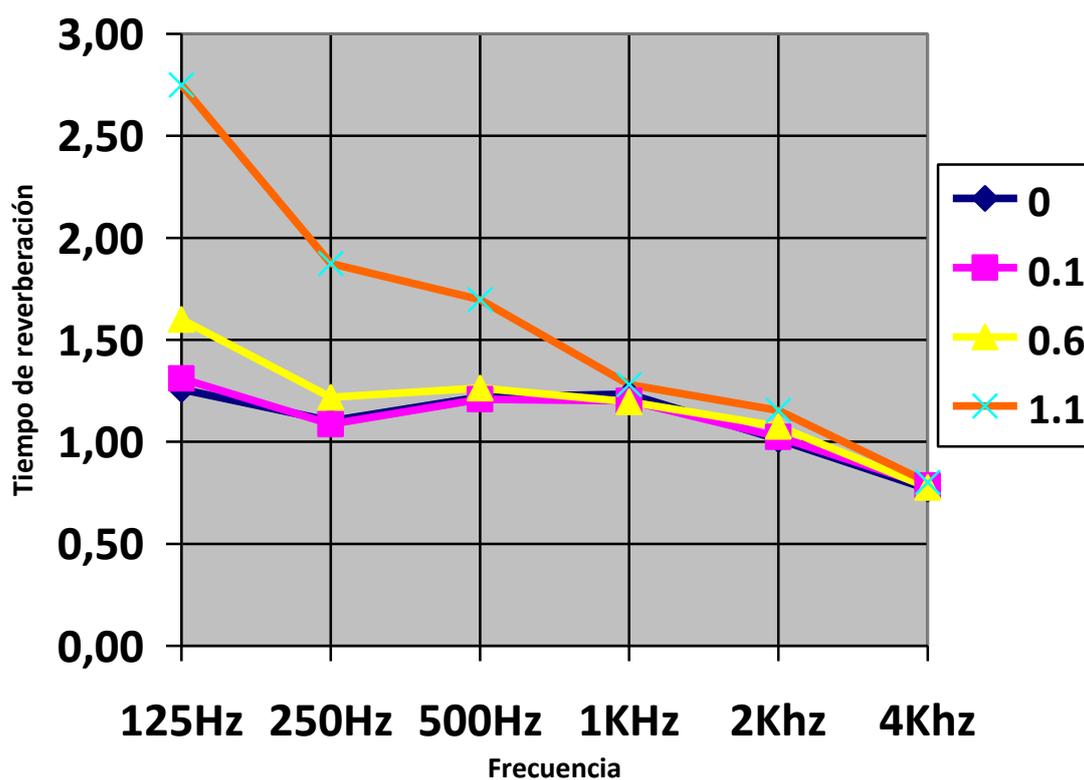


Tabla de tiempos de reverberación del Aula Magna

Gain/f	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz
0	1,26	1,10	1,22	1,23	1,01	0,77
0,1	1,31	1,09	1,21	1,20	1,02	0,79
0,6	1,60	1,22	1,26	1,20	1,08	0,78
1,1	2,75	1,87	1,70	1,28	1,15	0,80

Tr Aula Magna



5. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados podemos concluir que hemos cumplido nuestros objetivos. A medida que aumentamos la ganancia de manera logarítmica observamos un aumento de los tiempos de reverberación en la gama de frecuencias medias-altas.

A frecuencias bajas los resultados no son coherentes por los problemas inherentes al filtrado en baja frecuencia.

Si comparamos los resultados obtenidos de la tercera simulación con los valores de tiempo de reverberación del ANEXO II, observamos que los resultados se acercan.

Podríamos utilizar dicho programa como plugin para un software de simulación de salas y tener en cuenta los elementos que constituyen un sistema de refuerzo sonoro, de una manera sencilla y con un fácil manejo, aunque las simulaciones y debido a la tecnología actual tienen un elevado coste computacional.

6. BIBLIOGRAFÍA

PFC EPSG Simulación acústica del Aula Magna de la EPSG.

Refuerzo sonoro. Bases para el Diseño. Luis Ortiz Berenguer

Manual de Matlab 7.0

Diseño Acústico de espacios arquitectónicos. UPC. Antoni Carrión Isbert

Acústica Arquitectónica y urbanística. Sancho. Llinares. Llopis

Ingeniería de Sistemas Acústicos. Don & Carolin Davis

7. ANEXOS

ANEXO I: Procedimiento de Medida en el aula Magna

Para comparar y tener ciertas mediciones reales del sistema de refuerzo sonoro del Aula Magna se midieron 4 respuestas al impulso correspondientes a cada uno de los filtros que se crearon en el programa de Matlab y que se relacionan con los elementos de un SRS.

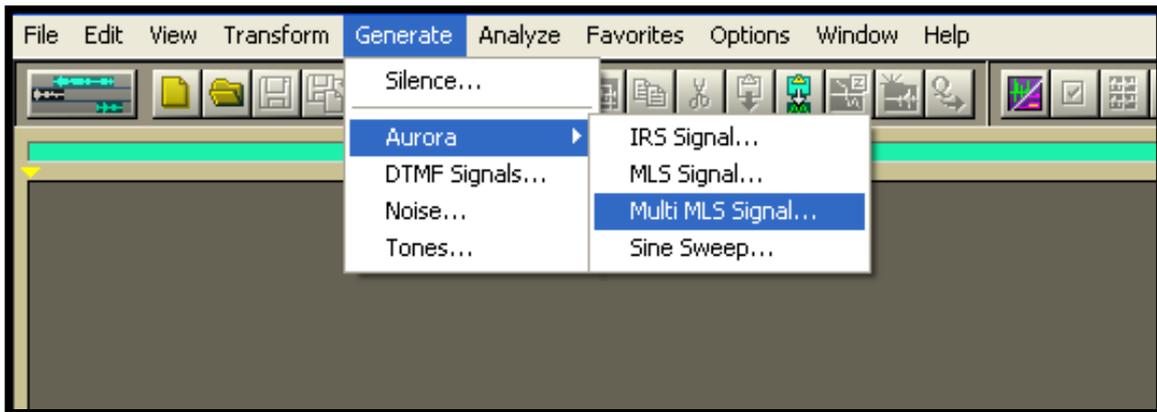
En el Aula Magna, conectamos un ordenador portátil con una tarjeta PCMCIA (VX POCKET) a la mesa de sonido del Aula Magna por el cual excitamos los altavoces de la sala con una señal MLS (utilizamos dicha señal ya que al desconvolucionarla obtenemos una delta de Dirac perfecta). Realizamos cuatro medidas correspondientes a las cuatro relaciones que existen en un sistema de refuerzo activo. Locutor-Micro, Locutor-Oyente, Altavoz-Micro, Altavoz-Oyente. Recogemos el sonido con un micrófono calibrado (Nexus) y grabamos el resultado en una pista en el programa de software de audio Cool Edit Pro 2000.

Para tener una referencia temporal, saber el retardo de la tarjeta y saber que ganancia tenemos a la entrada, cortocircuitamos uno de los canales de la tarjeta (en nuestro caso el canal izquierdo), así una vez lanzamos y recogemos la señal MLS tenemos en una pista la señal MLS y en el otro el retardo de la tarjeta. Para las relaciones de locutor micro y locutor oyente,

se utilizó un altavoz (Fuente B&K 4224) que simulaba al locutor y escogimos la posición micrófono (oyente) al fondo de la sala.

Procedimiento de configuración del Cool Edit Pro 2000:

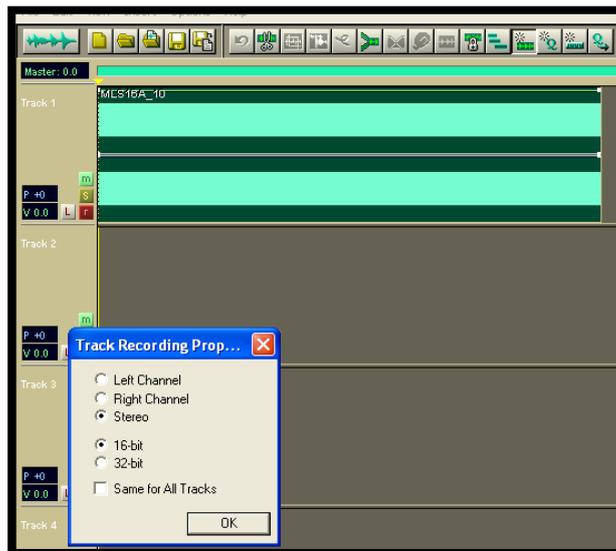
Abrimos el programa Cool Edit Pro 2000 y seleccionamos las pestaña Generate → Aurora → Multi MLS Signal.



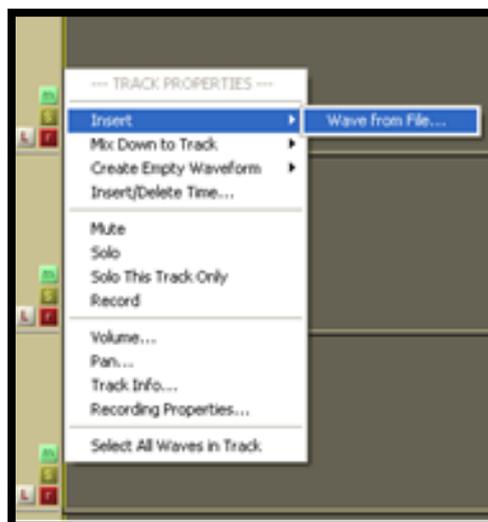
Aparecerá una ventana en la que seleccionaremos una señal MLS 16 A con 10 repeticiones (durará alrededor de 3 segundos) y cambiamos de vista para grabar la señal que lancemos pasando al modo multipista.



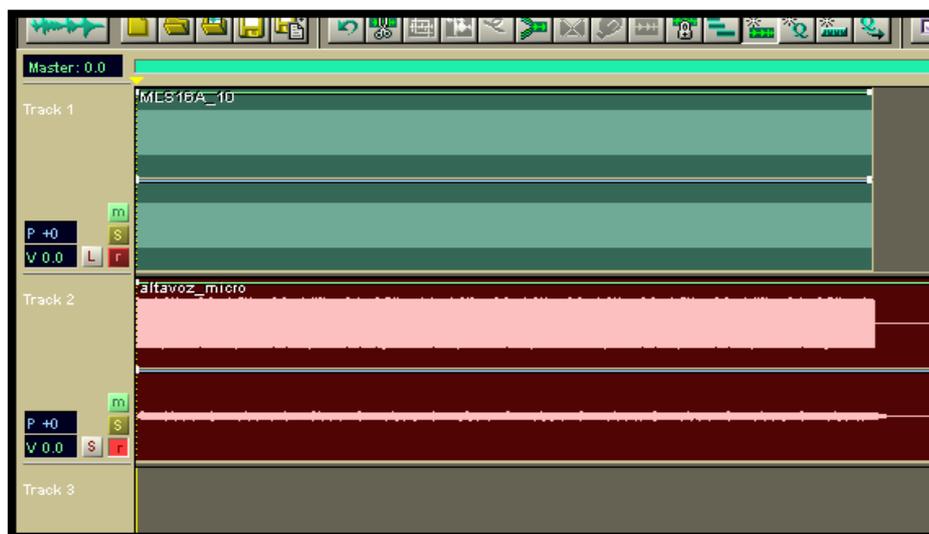
El modo multipista, clicando en el botón L, generamos un pista estéreo a 16 bits.



Una vez grabada le señal MLS que hemos lanzado la guardamos en formato wav. para posteriormente abrir un proyecto nuevo e insertarla en el COOL EDIT 2000.



Una vez tenemos únicamente la señal grabada en el canal derecho y el cortocircuito en el izquierdo, la desconvolucionaremos usando de nuevo el plugin aurora, Generate → Aurora → deconvol Multi MLS Signal y así obtenemos la respuesta al impulso.



ANEXO II: TABLA DE TIEMPOS DE REVERBERACIÓN DEL AULA MAGNA

Esta tabla se ha obtenido del PFC: Simulación Acústica del Aula Magna de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, realizado por Ricardo Císcar Bayarri (2007).

		125	250	500	1K	2K	4K
Receptor 1	T-15	1,75	1,79	1,39	1,14	1,14	0,86
	T-30	2,04	2,26	1,89	1,53	1,40	1,02
Receptor 2	T-15	1,71	1,78	1,41	1,18	1,09	0,89
	T-30	2,01	2,27	1,94	1,5	1,47	1,00
Receptor 3	T-15	1,67	1,77	1,35	1,13	1,09	0,88
	T-30	2,03	2,22	1,90	1,50	1,41	0,94
Receptor 4	T-15	1,72	1,78	1,49	1,26	1,2	0,95
	T-30	2,11	2,40	1,99	1,50	1,48	1,05
Receptor 5	T-15	1,72	1,77	1,50	1,20	1,25	0,98
	T-30	2,09	2,37	2,09	1,54	1,49	1,06

ANEXO III: BLOQUES DE SIMULINK UTILIZADOS EN EL PROGRAMA:

Hay múltiples “cajas” en todo el programa que serán las encargadas de guardar en archivos .m los datos de la simulación con los que se irán obteniendo los diferentes parámetros que nos interesan.

BLOQUE SUMADOR

Genera la suma de sus entradas (escalares y/o vectoriales) o la suma de los elementos de un vector simple, según el número de entradas al bloque:

-Si el bloque tiene más de una entrada, la salida es la suma, elemento a elemento, de las entradas. Si todas las entradas son escalares, la salida es escalar. Para un bloque con n entradas, si alguna de ellas es vectorial, cada elemento de la salida se genera como $y = u_1i + u_2i + \dots + u(n)i$.

Si el bloque tiene sólo una entrada vectorial, la salida es la suma escalar de todos los elementos de la entrada.

Todas las entradas deben tener el mismo tipo de datos. El parámetro ICON SHAPE permite elegir una forma rectangular o circular al bloque. El parámetro List of Signs establece los símbolos (+) y (-). El símbolo (|) crea espacio entre los puertos. Seleccionando la opción saturate on integer

overflow, la salida del bloque satura cuando, siendo de tipo entero, supere el máximo representable.

BLOQUE UNBUFFER

The Buffer block redistributes the input samples to a new frame size, larger or smaller than the input frame size. Buffering to a larger frame size yields an output with a *slower* frame rate than the input, as illustrated below for scalar input.

BLOQUE MAT.

Es el encargado de almacenar los resultados de la simulación en un archivo propio de Matlab.

BLOQUE GAIN

Genera la salida multiplicando su entrada por una constante, una variable o una expresión.

El icono del bloque visualiza el valor introducido en el parámetro gain o el nombre de la variable si la ganancia se especifica como tal. Si esta variable va entre paréntesis, el bloque evalúa y visualiza su valor. El valor por defecto de este parámetro es 1.

Si la entrada es de tipo entero y esta seleccionada la opción SATURATE ON INTEGER OVERFLOW, cuando se exceda del máximo valor representable, el bloque satura la salida.

Si esta opción no está seleccionada, Simulink muestra un mensaje de error (especificado como Data overflow en la página DIAGNOSTICS de la ventana simulation parametre