

Medición de amplificadores en frecuencias de audio

Carlos A. Zerbini

Cátedra Medidas Electrónicas 2

Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba

Año lectivo 2020

Agenda

- Conceptos generales
- Ganancia y potencias a frecuencia fija
- Respuesta en frecuencia (distorsión lineal en frecuencia)
- Distorsión alineal
 - Teoría
 - Distorsión armónica
 - Distorsión por inter-modulación
- Ruido

Mediciones en amplificadores de audio: conceptos generales

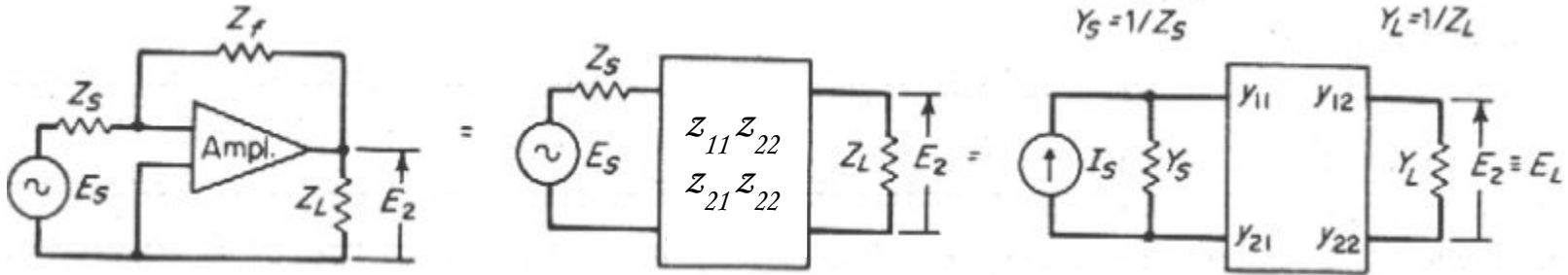
- Funciones generales de los amplificadores
 - **Incrementar la potencia disponible**
 - **Amplificar corriente/tensión disponibles**
 - Limitar corriente/tensión de carga
 - Proveer una función de transferencia prescrita (lineal ó no)
 - Proveer impedancia deseada entre fuente y carga
 - Rechazar o atenuar señales de modo común en un par de conductores (promedio)

Nos concentraremos en los dos primeros casos, en especial el primero de ellos.

- La **ganancia de transferencia** es la relación de *magnitud y fase* entre salida y entrada. La **función de transferencia** del amplificador es la variación de esta ganancia con la frecuencia compleja s . Para medirla completamente se requiere una *analizador vectorial de mallas*.
- Las variables de entrada y salida pueden ser tensiones o corrientes. Las ganancias, en tanto pueden ser de **tensión**, de **corriente**, de **trans-impedancia**, de **trans-conductancia**, o de **potencia (combinación de tensión y corriente)**.
- Si bien en este capítulo se tratará principalmente la medición de amplificadores de potencia en audio, al concepto de audio se refiere a amplificadores generales que trabajan en el rango ~ [20 Hz - 20 KHz]

Mediciones en amplificadores de audio: conceptos generales

- Generalmente se busca que las ganancias sean relativamente insensibles a las variaciones de condiciones ambientales, de Z_L , y de Z_S . Esto se logra mediante el diseño del amplificador, mediante realimentación negativa, para obtener resistencias internas de entrada Z_i y de salida Z_o adecuadas. Para el caso de ganancia de tensión, por ejemplo, se diseña de modo que $Z_i \gg Z_S$ y que $Z_o \ll Z_L$. **Para frecuencias de audio podemos asumir impedancias reales, por lo que hablaremos indistintamente de “Z” o “R”.**
- Los amplificadores se pueden modelar mediante sus equivalentes de **Thévenin (tensiones e impedancias)** o de **Norton (corrientes y admitancias)**. Debido a la facilidad para medir tensiones, el modelo de Thévenin suele ser más práctico.



Circuito básico del amplificador realimentado, y sus modelos equivalentes

Medición de amplificadores en frecuencias de audio

1) **Ganancia y potencia de salida** a frecuencia fija

- Ganancia de inserción
- Máxima Potencia Disponible
- Máxima ganancia de Potencia Disponible

2) **Respuesta en Frecuencia** (distorsión lineal en frecuencia)

- Respuesta en módulo
- Respuesta en fase

3) **Componentes no deseadas** que genera el amplificador: **Distorsión Alineal**

- **Ensayo monotonal:** Distorsión Armónica Total (THD) y Total mas ruido (THD+N)
- **Ensayo bitonal:** Distorsión por intermodulación (métodos SMPTE/DIN y CCIF)

4) **Tensiones y corrientes aleatorias** existentes en el amplificador: **Ruido**

- Piso de Ruido
- Relación señal-ruido
- Rango Dinámico

Agenda

- Conceptos generales
- Ganancia y potencias a frecuencia fija
- Respuesta en frecuencia (distorsión lineal en frecuencia)
- Distorsión alineal
 - Teoría
 - Distorsión armónica
 - Distorsión por inter-modulación
- Ruido

Ganancia y potencia de salida a frecuencia fija

- Para nuestro caso, la ganancia o amplificación se expresa como relación de **tensiones o potencias**, y suele expresarse en **decibeles**, por sus ventajas respecto a escalabilidad de cifras y reemplazo de operaciones de multiplicación/división por operaciones de suma/resta.
- En audio, los amplificadores suelen ser de **tensión** (Z_i alta, Z_o baja) o de **potencia** ($Z_i = Z_s$, $Z_o = Z_L$).

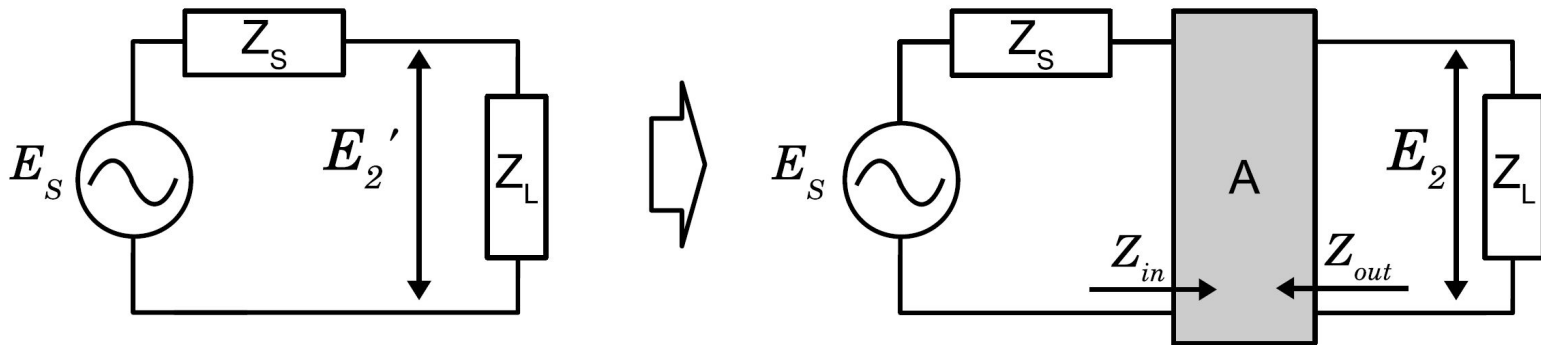
Ganancia de inserción

- En general, las impedancias de entrada y salida de un amplificador pueden **no ser las ideales (mínimas, infinitas o adaptadas)**. Por ejemplo, la impedancia de un micrófono, una línea telefónica o de audio, etapas previas o posteriores en una cadena de amplificación, etc.. Además, el amplificador podría tener libertad para colocarse en **distintos lugares de la cadena (por ej. amplis de TV por cable)**.
- En estos casos, nos interesa conocer el **aumento de tensión o potencia resultante de insertar el amplificador en cierto punto de una línea o circuito**. Para medir esto, se define la medición de **ganancia de inserción**.

Ganancia de inserción: “relación de la potencia P_2 o tensión E_2 , entregada a la impedancia de carga Z_L con el amplificador insertado, respecto a la potencia P_2' o tensión E_2' que se entregaría a la misma carga si el generador estuviera directamente conectado a ella”

- La ganancia de inserción de un amplificador **es función de las impedancias de generador y carga, así como del propio amplificador**. Por ello, la ganancia de inserción **siempre debe ir acompañada de las impedancias utilizadas para medirla!**
- La GI puede no corresponder con la **ganancia nominal del amplificador, o con su máxima ganancia**

Medición de la ganancia de inserción



$$GI_{potencia} = \frac{P_2}{P'_2} = \frac{|E_2|^2}{|E'_2|^2}$$

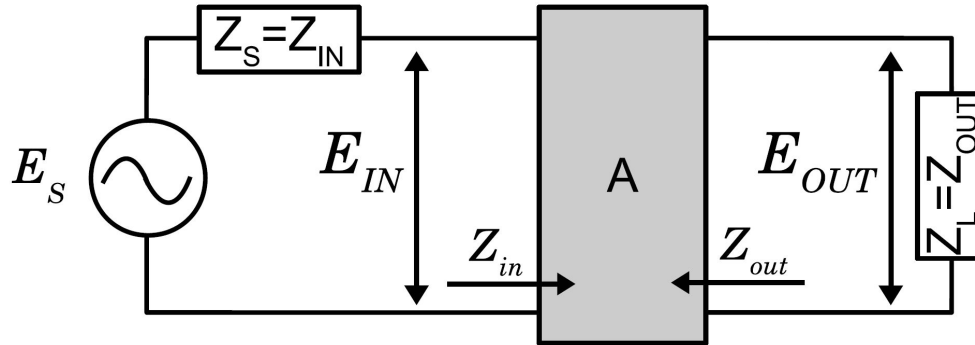
$$GI_{tension} = \frac{E_2}{E'_2}$$

Potencia disponible y ganancia de potencia disponible

- En general, las potencias y tensiones son dependientes de las siguientes variables:
 - Impedancia de **generador** $Z_S = R_S + j X_S$
 - Impedancias del **amplificador** Z_i (entrada) y Z_o (salida)
 - Impedancia de **carga** Z_L
- Si considero **casos especiales** de estas impedancias, puedo definir:
 - Máxima potencia disponible de entrada:** potencia que es capaz de entregar el **generador** a una carga adaptada para máx. transferencia de potencia.
 Carga ~~conjugada~~ $R_S - jX_S \Rightarrow$ corriente entregada por el generador $E_S / (2 R_S)$
 \Rightarrow tensión en la $Z_{IN} = E_S / 2 \Rightarrow$ **potencia en la $Z_{IN} (=R_S)$:** $P_{S, disp} = E_S \cdot I_S = E_S^2 / (4 R_S)$
 - Máxima potencia disponible de salida:** potencia $P_{O, disp} = E_L \cdot R_L$ que es capaz de entregar el **amplificador** a una carga adaptada para máx. transferencia de potencia
- Uniendo ambas condiciones (entrada y salida adaptadas), obtengo la **máxima ganancia de potencia disponible** $G_{disp} = P_{O, disp} / P_{S, disp}$
- La G_{disp} depende **sólo del amplificador**. **NO** depende de los valores de R_{IN} y R_{OUT} , ya que **tiene validez sólo cuando el generador y la carga están adaptados!** (por lo tanto no tendría sentido hablar de distintos R_{IN} y R_{OUT})

Medición de la máxima potencia disponible y la máxima ganancia de potencia disponible

- Se adaptan las impedancias (resistencias) de generador y carga a las impedancias (resistencias) de entrada y salida del amplificador respectivamente (ver siguiente slide)
- Se ajusta el generador para obtener **máxima señal de salida, con distorsión conocida (si se cuenta con medios para medirla) o simplemente con deformación despreciable**



$$P_{IN,disp} = \frac{E_{IN}^2}{Z_{in}}$$

$$P_{OUT,disp} = \frac{E_{OUT}^2}{Z_L}$$

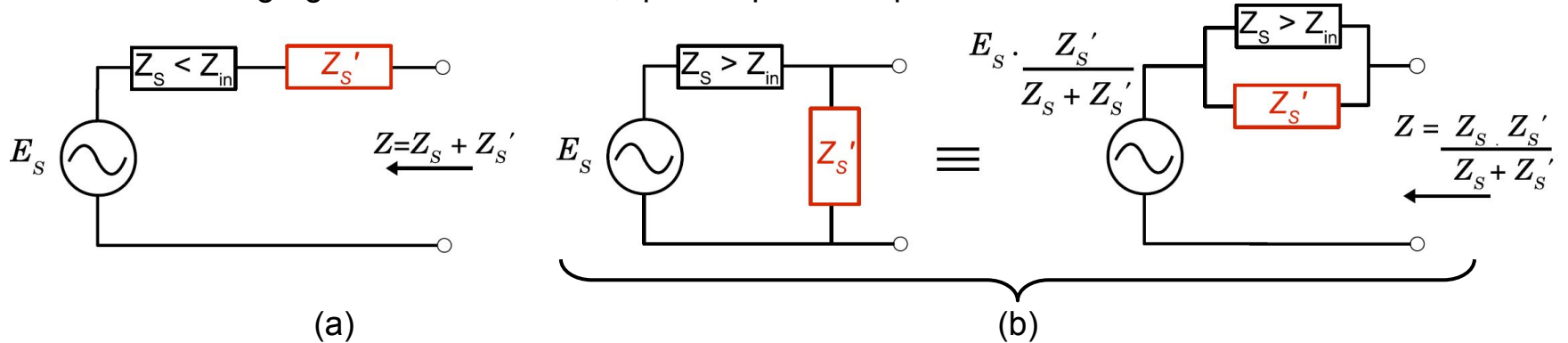
$$G_{Pdisp} = \frac{P_{IN,disp}}{P_{OUT,disp}}$$

Medición de la máxima potencia disponible y la máxima ganancia de potencia disponible

Por lo común, las condiciones anteriores $Z_S = Z_{IN}$ y $Z_L = Z_{OUT}$ requieren de **redes adaptadoras**. Para adaptar las impedancias de generador y de entrada, pueden darse dos casos:

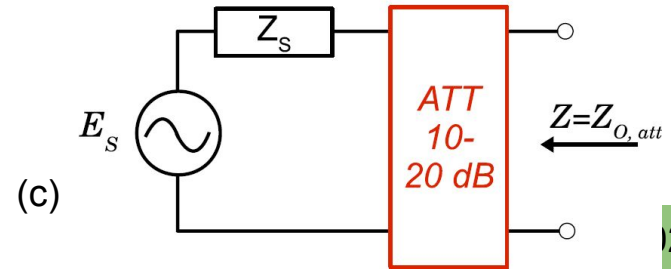
- $Z_{IN} > Z_S \rightarrow$ se agrega una resistencia **en serie**
- $Z_{IN} < Z_S \rightarrow$ se agrega una resistencia **en paralelo**

Otro método es agregando un **atenuador**, que adapta las impedancias.



Adaptación de impedancias:

- (a) $Z_{IN} > Z_S$
 (b) $Z_{IN} < Z_S$
 (c) Mediante atenuador



Algunos conceptos importantes

- **Medición de potencias vs. tensiones**
 - En **bajas frecuencias**, es más práctico medir tensiones y luego calcular los valores de potencia.
 - En **altas frecuencias**, debido a la existencia de ondas estacionarias, se miden potencias directamente. Para ello se requieren sensores especiales que se verán en la Unidad 10.
- En el ensayo de **ganancia de inserción** se mide tensión **en un único punto de la línea, con y sin el amplificador**.
- En los ensayos de **máxima potencia y ganancia disponible**, se miden tensiones **en la salida y en la entrada del amplificador**.

Uso del Decibel

- Una unidad muy utilizada para expresar **relación entre dos potencias genéricas P_2 y P_1** es el **Decibel**. Esa es una unidad **relativa**, es decir que expresa relaciones entre dos potencias.
- Como ya dijimos, en la práctica de baja frecuencia se suelen medir **tensiones**, por lo que la fórmula del decibel se **expresa reemplazando la fórmula de las potencias**. Queda una expresión que depende de las tensiones medidas, y de las resistencias donde ambas se midieron

$$Relacion [dB] = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\frac{V_2^2}{R_2}}{\frac{V_1^2}{R_1}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{V_2^2}{V_1^2} + 10 \cdot \log_{10} \frac{R_1}{R_2} = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_2}{V_1} + 10 \cdot \log_{10} \frac{R_1}{R_2}$$

- **SÓLO** en el caso especial donde $R_2 = R_1$, el segundo factor se anula y queda la exp. simplificada:

$$Relacion [dB] = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_2}{V_1}$$

Es importante tener en cuenta que todas estas expresiones **son distintas formas de la misma expresión original, es decir que todas ellas DEBEN ARROJAR EL MISMO RESULTADO!** Lo que cambia es el valor de la RELACIÓN de potencias, que será el CUADRADO de la relación de tensiones respect.:

Ej. si $V_2 = 4V_{rms}$, $V_1 = 2V_{rms}$, y $R_1 = R_2$:

$$\begin{aligned} & 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log 4 = +6 \text{ dB} \\ & 20 \log \frac{V_2}{V_1} = 20 \log 2 = +6 \text{ dB} \end{aligned}$$

Unidades ABSOLUTAS BASADAS en el Decibel

- A veces, el **nivel de referencia** para expresar decibeles se **asume como un valor standard**: por ejemplo, cuando se dice que un ripple es de “+- 2 dB” en la banda pasante de un amplif., asumo que la referencia es **la tensión o potencia de salida a 1 KHz (ver resp. en frecuencia)**.
- En otros casos, se **ADOSA** un indicador del nivel de referencia a fin de expresar un valor absoluto mediante el dB. Ejemplo **dBm (ref = 1mW)**, **dBV (ref. = 1V_{rms})**, **dBu (ref. = 0,223 V_{rms})**

dBm → “**dBs referidos a 1mW**”. Es una unidad de **potencia absoluta**. **Ya que los instrumentos suelen medir tensiones, para expresar en dBm TENGO que conocer sobre QUÉ CARGA medí cada tensión.**

Antiguamente, los amplis eran ADAPTADOS entre etapas a valor standard 600Ω por lo que se podía asumir este valor. Hoy suelen trabajar cómo amplis de TENSION (Z_{IN} alta, Z_{OUT} chica) por lo que esto no es necesariamente válido.

dBu → “**dBs REFERIDOS A LA TENSIÓN EFICAZ que produce 1mW sobre 600Ω**”. Al referirse **directamente a un valor de tensión de referencia**, permite **independizarse de los valores de carga**, por lo que **es la unidad más utilizada en las especificaciones de audio**. Valores comunes son 0 dBu y +4dBu:

$$1 \text{ mW} = \frac{V^2}{R} \Rightarrow V = \sqrt{0,001 \text{ W} \times 600\Omega} = 0,776 \text{ V}_{rms}$$

$$\Rightarrow V [\text{dBu}] = 20 \log_{10} \frac{V}{0,776}$$

Ejemplos :

$$0 \text{ dBu} \Rightarrow V = 0,776 \times 10^0 = 0,776 \text{ V}$$

$$+ 4 \text{ dBu} \Rightarrow V = 0,776 \times 10^{(4/20)} = 1,23 \text{ V}_{rms}$$

Agenda

- Conceptos generales
- Ganancia y potencias a frecuencia fija
- Respuesta en frecuencia (distorsión lineal en frecuencia)
- Distorsión alineal
 - Teoría
 - Distorsión armónica
 - Distorsión por inter-modulación
- Ruido

Respuesta en frecuencia (distorsión lineal en frecuencia)

La señal de audio consiste en general de una *suma de componentes en frecuencia en el rango $\sim [20\text{Hz} - 20\text{KHz}]$* . Por ello, es importante observar cómo responde el amplificador en *módulo y fase* a cada una de ellas. En particular, interesa buscar posibles **puntos de inestabilidad**.

La respuesta en frecuencia se relaciona con las **distorsiones lineales en frecuencia y en fase**:

- **Distorsión lineal en frecuencia:** debida a que la respuesta en frecuencia no es “plana” \Rightarrow algunas componentes se amplifican más que otras, y puede haber frecuencias en que el amplificador se vuelve inestable
- **Distorsión lineal en fase:** las distintas componentes de frecuencia de la señal son **retardadas distintos tiempos**, donde el retardo depende del defasaje como $\Delta\theta / \Delta f$. **La distorsión de fase puede destruir ciertas señales, como las cuadradas.**

En amplificadores destinados a reproducir sonidos, estas distorsiones no son críticas ya que el oído no es sensible a ellas. Sí lo son las **frecuencias de corte, y las inestabilidades** que pueden llevar al amplificador a **oscilación, dañándolo. Nos concentraremos entonces en estos factores.**

Medición de Respuesta en frecuencia

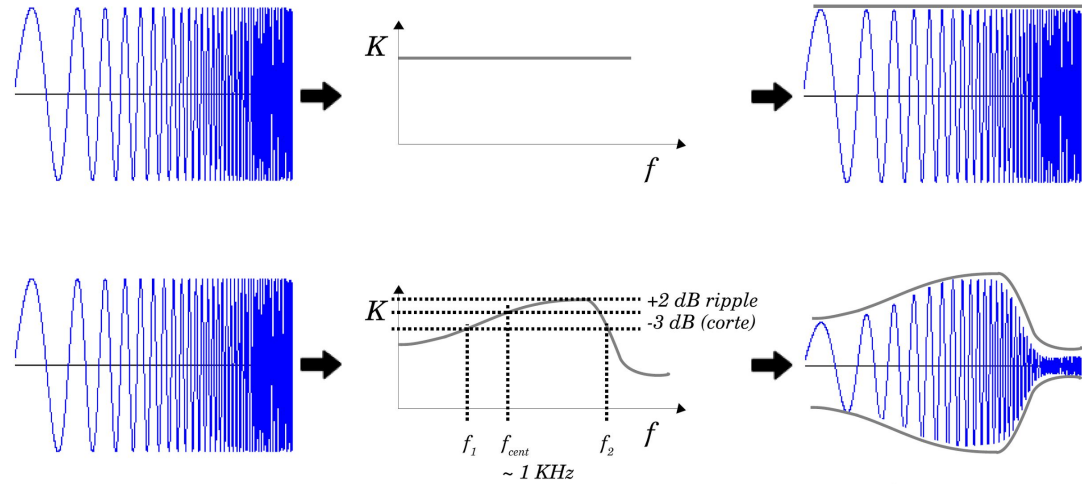
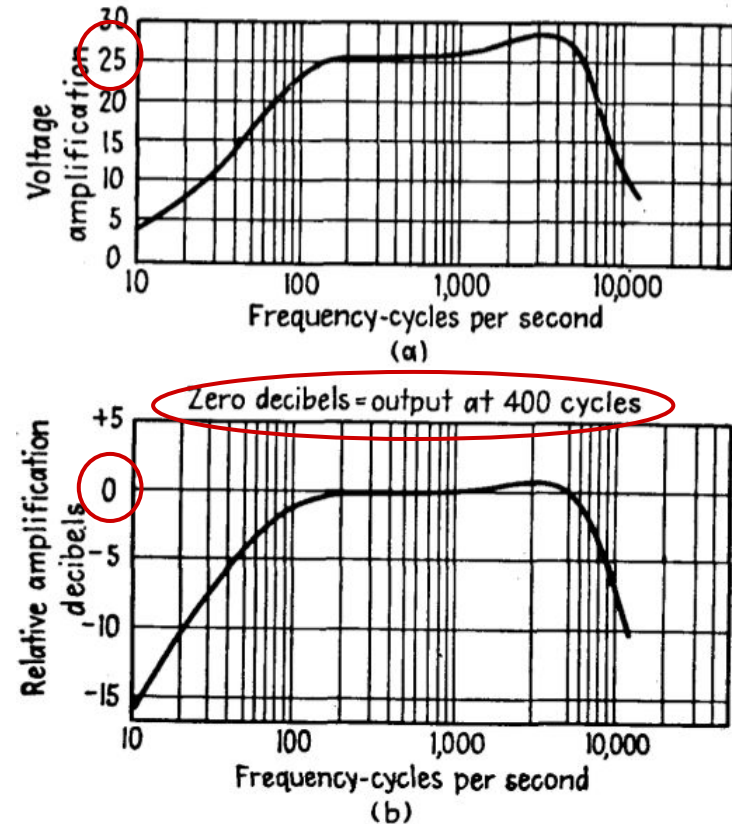
- Se ajusta máxima amplificación y generador para producir señal de salida sin deformación apreciable. Se selecciona una frecuencia central estimada en **1KHz** y **se mide la ganancia en ese punto. Esta será nuestra referencia de “0 dB” para evaluar la respuesta en frecuencia**
- Se barre hasta llegar a los puntos inferior f_1 y superior f_2 de -3dB **respecto al punto central elegido**, que definirán el **ancho de banda del amplificador**
- Se corrobora que la frec. central de 1KHz sea próxima a la **media geométrica** $f_c = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$. **Si se encuentra muy lejos, se corrige y se repite el proceso**
- Se evalúa la **respuesta en frecuencia**:
 - **Por barrido manual**: se obtienen mediciones precisas de puntos precisos
 - **Con generador de barrido**: se utiliza el modo X-Y del osciloscopio o analizador de distorsión. Se obtiene una visión global de la respuesta en frecuencia para corroborar zonas intermedias
- La especificación incluirá las **frecuencias de corte, así como el ripple de ganancia DENTRO DE LA BANDA PASANTE. En especial, se releva el pico máximo de ganancia** para evaluar estabilidad.

$$\text{Frequency Response} = x - x \text{ kHz}, +x / - x \text{ dB}$$

Ancho de banda

ripple de ganancia

Medición de Respuesta en frecuencia



Respuesta en frecuencia evaluada mediante generador de barrido

Respuesta para ganancias absoluta (a) y relativa (b) en decibels, con punto central $\sqrt{f_1 f_2} = 400 \text{ Hz}$. En nuestro caso utilizaremos ganancia relativa al punto central, como en (b)

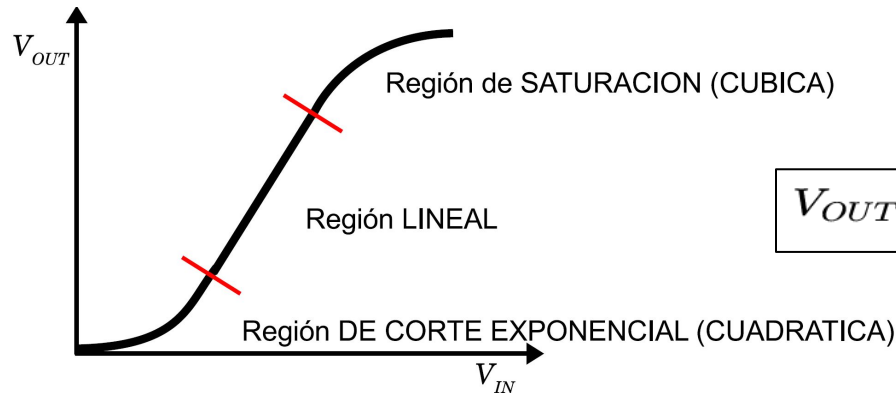
<https://www.soundguys.com/frequency-response-explained-16507/>

Agenda

- Conceptos generales
- Ganancia y potencias a frecuencia fija
- Respuesta en frecuencia (distorsión lineal en frecuencia)
- **Distorsión alinear**
 - Teoría
 - Distorsión armónica
 - Distorsión por inter-modulación
- Ruido

Teoría de distorsión alineal

- El principal efecto de la distorsión alineal es producir a la salida del amplificador componentes en frecuencia que no están presentes en su entrada.
- Se debe a la **característica de transferencia** de los dispositivos activos. A iguales incrementos (lineales) de la variable de entrada (v o i), llega un punto en que la variable de salida no registra incrementos lineales
- Esta deformación **no se mide directamente, sino mediante los ensayos de distorsión alineal**



$$V_{OUT} = A \cdot V_{IN} + B \cdot V_{IN}^2 + C \cdot V_{IN}^3 + \dots + N \cdot V_{IN}^n$$

Teoría de distorsión alineal: *distorsión armónica (tono único de entrada)*

Si $V_{IN} = V_1 \cos \omega_1 t$:

$$V_{OUT} = AV_1 \cos \omega_1 t + BV_1^2 \cos^2 \omega_1 t + CV_1^3 \cos^3 \omega_1 t + \dots$$

Aplicamos las identidades :

$$\cos^2 \omega_1 t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega_1 t)$$

$$\cos \omega_1 t \cdot \cos 2\omega_1 t = \frac{1}{2}(\cos 3\omega_1 t + \cos \omega_1 t)$$

$$V_{OUT} = AV_1 \cos \omega_1 t + \frac{BV_1^2}{2}(1 - \cos 2\omega_1 t) + \frac{CV_1^3}{2} \cos \omega_1 t(1 - \cos 2\omega_1 t)$$

$$V_{OUT} = \underbrace{\frac{BV_1^2}{2}}_{\text{DC}} + \underbrace{\left(AV_1 + \frac{CV_1^3}{4}\right) \cos \omega_1 t}_{\text{FUNDAMENTAL (deseada) + auto-compresion/expansion}} + \underbrace{\frac{BV_1^2}{2} \cos 2\omega_1 t - \frac{CV_1^3}{4} \cos 3\omega_1 t}_{\text{ARMÓNICAS indeseadas}}$$

CUADRATICO (distorsión por cruce) CUBICO (saturacion,) recorte o "clipping")

Teoría de distorsión alinear: *distorsión por inter-modulación (múltiples tonos de entrada)*

Si $V_{IN} = V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t$ (caso mas simple) :

$$V_{OUT} = A(V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t) + B(V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t)^2 + C(\dots)^3 + \dots$$

Aplicando identidades y desarrollando, obtenemos:

Componentes de segundo orden:

- 2 componentes de continua
- **2 batidos (mezclas) suma/diferencia por inter-modulación (IMD de 2° orden)**
- 2 armónicas segundas

Componentes de tercer orden:

- 2 armónicas terceras
- **4 batidos (mezclas) por inter-modulación (IMD de 3° orden)**
- 2 auto-compresiones (si $C > 0$) o auto-expansiones (si $C < 0$)
- 2 compresiones cruzadas ($C > 0$) o expansiones cruzadas ($C < 0$)

Teoría de distorsión alineal

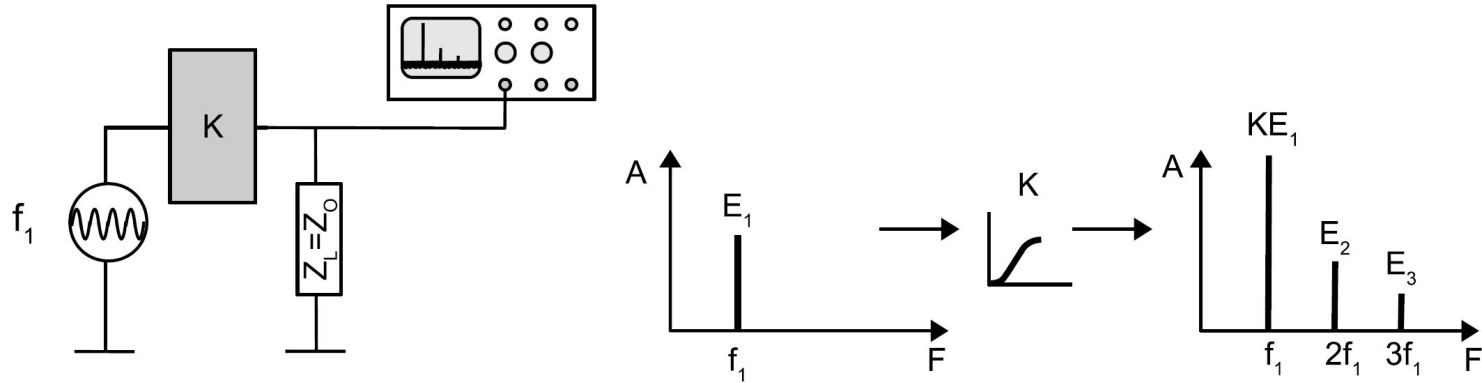
- En la práctica, los EFECTOS DE 2° ORDEN (armónicas 2° y suma/diferencia) son LOS MÁS IMPORTANTES. Le siguen los efectos de 3° orden (armónicas 3° y sumas/diferencias de 3° orden)
- En la práctica, la señal de audio contiene múltiples componentes. A la salida, se presentarán todos estos efectos aplicados sobre todas estas componentes, lo cual es muy difícil de evaluar sin una metodología
- Para CARACTERIZAR estos efectos, se diseñan ensayos que MAXIMICEN UNO U OTRO EFECTO y MINIMICEN LOS DEMÁS EFECTOS \Rightarrow NORMAS
- Es MUY IMPORTANTE que las especificaciones INCLUYAN LAS CONDICIONES RELEVANTES PARA EL ENSAYO, a fin de que RESULTADOS DE DISTINTOS FABRICANTES SEAN COMPARABLES EN FORMA OBJETIVA
- La PRUEBA DE AUDICIÓN es siempre la EVALUACIÓN PRÁCTICA FINAL, que depende también del tipo de sonido, la acústica del lugar y otros efectos psicológicos

Agenda

- Conceptos generales
- Ganancia y potencias a frecuencia fija
- Respuesta en frecuencia (distorsión lineal en frecuencia)
- **Distorsión alineal**
 - Teoría
 - **Distorsión armónica**
 - Distorsión por inter-modulación
- Ruido

Medidas de distorsión alineal armónica: distorsión armónica total (THD)

- Se aplica una señal senoidal según los siguientes criterios:
 - **Salida claramente diferenciable del ruido**
 - **Frecuencia igual a la media geométrica de las frecuencias de corte. Se estima en 1 KHz**
- Si la frecuencia es **muy baja**, la **fundamental** se atenúa y la **THD resultará mayor a su real valor**
- Si la frecuencia es **muy alta**, las **armónicas** se atenúan y la **THD resultará menor a su real valor**

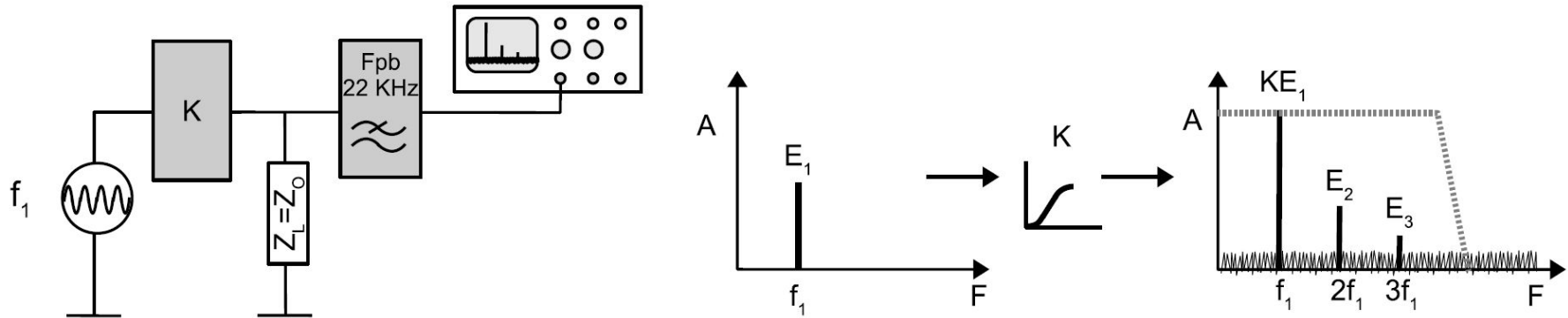


$$D(\%) = \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_m^2}}{E_1} \times 100 \simeq \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_m^2}}{E_0} \times 100; E_0 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_m^2}$$

THD(x order) less than x%, xdBu, x - x KHz, x gain

Medidas de distorsión alineal armónica: distorsión armónica total **más ruido** (THD+N)

- Además de las componentes armónicas, considera el **ruido a la salida del amplificador**. Ya que el ruido se encuentra siempre presente, **la THD+N es una medición más realista que la THD**
- El nivel de ruido es **una integral en un ancho de banda determinado**. Para fijar este ancho de banda, **se coloca un FPB**. Luego, el ruido se mide como un valor RMS total (ver sección ruido).



$$D(\%) = \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_{noise}^2}}{E_1} \times 100 \simeq \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_{noise}^2}}{E_0} \times 100; E_0 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_{noise}^2}$$

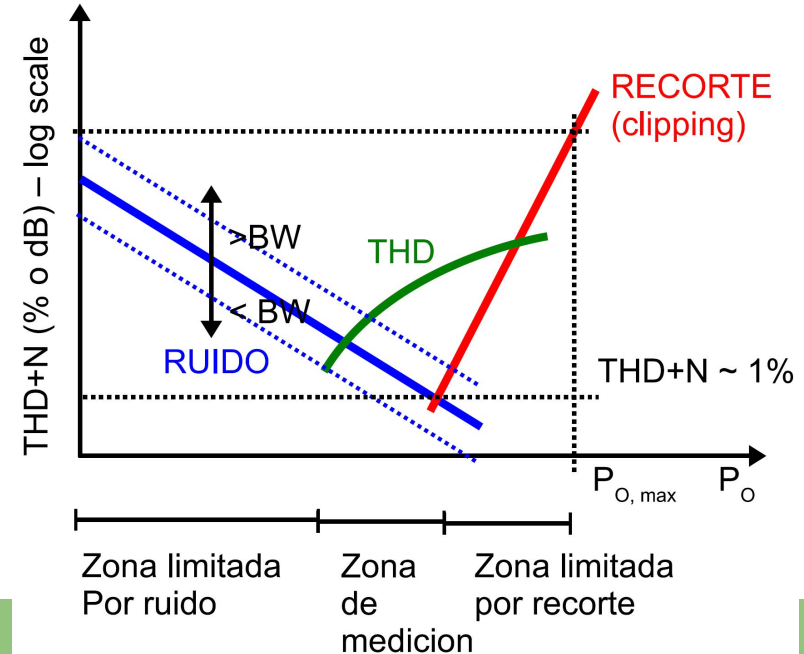
THD + N(x order) less than x%, xdBu, x - x KHz, x gain, x BW

Medidas de distorsión alineal armónica: distorsión armónica total **más ruido** (THD+N)

Las curvas de THD+N vs. P_o son tres:

- Zona dominada por el **ruido**
- Zona dominada por la THD del amplificador
- Zona de recorte o clipping, con crecimiento abrupto de la distorsión porcentual

Las mediciones de THD+N se deberían realizar en la **zona dominada por THD**, que representa la zona de trabajo normal del amplificador. Es decir, NO se mide ni con señal tan baja para ser dominada por el ruido, ni con señal tan alta como para que se produzca saturación del amplificador.

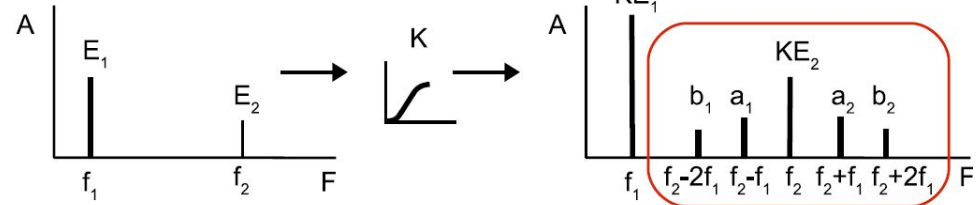
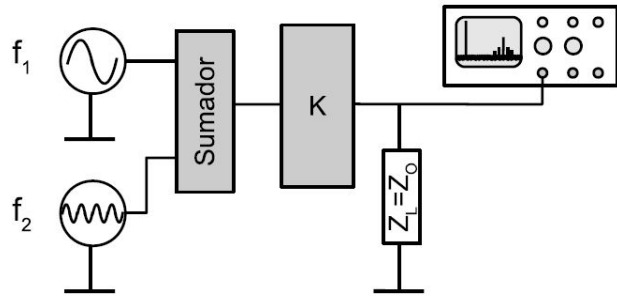


Agenda

- Conceptos generales
- Ganancia y potencias a frecuencia fija
- Respuesta en frecuencia (distorsión lineal en frecuencia)
- **Distorsión alineal**
 - Teoría
 - Distorsión armónica
 - **Distorsión por inter-modulación**
- Ruido

Medidas de distorsión alineal por inter-modulación: método SMPTE

- Standard **RP120-1983**, propuesto por la *Society of Motion Picture and TV Engineers (SMPTE)*
- Aplica una componente **grande en baja frecuencia** y una componente **chica en alta frecuencia**, con frecuencias **no relacionadas armónicamente**
- **Efecto no lineal:** la amplificación experimentada por la componente de alta (f_2) VARÍA AL RITMO de la componente de baja (f_1). Es decir f_2 **se encuentra modulada por f_1 a la salida**.
- $f_1 = 60 \text{ Hz}$ / $f_2 = 7 \text{ KHz}$. $E_1 = +4 \text{ dBu}$ ($\sim 1,23 \text{ V}$); $E_2 = 0,25 E_1$ (relación 4:1 o 12 dB) $\Rightarrow E_2 = -8 \text{ dBu}$

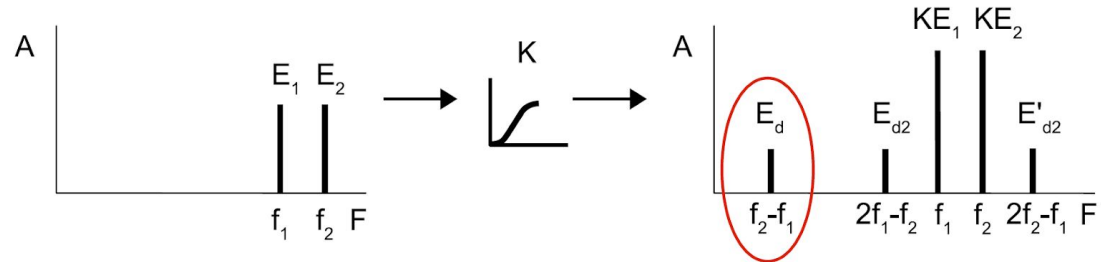
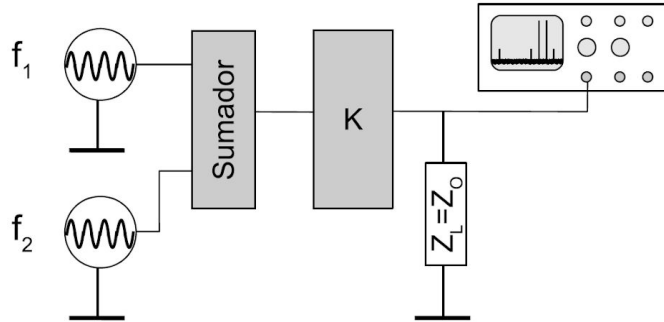


$$D(\%) = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + \dots} = \frac{\sqrt{(a_1 + a_2)^2 + (b_1 + b_2)^2 + \dots}}{E_2} \times 100$$

IMD(x order, SMPTE) less than x%, x Hz / x Hz, x : x, +x dBu

Medidas de distorsión alineal por inter-modulación: método CCIF

- Standard propuesto por el *Comité Consultivo Telefónico Internacional (CCIF)*
- Dos señales de igual amplitud, en frecuencias altas y cercanas
- **Efecto no lineal:** aparece una **componente en baja frecuencia $f_2 - f_1$ (las otras NO INTERESAN)**
- Algunos analizadores realizan un barrido, con espaciado ($f_2 - f_1$) cte o variable
- $f_1 = 19 \text{ KHz}$ / $f_2 = 20 \text{ KHz}$. $E_1 = +4 \text{ dBu}$ ($\sim 1,23 \text{ V}$); $E_2 = E_1$ (relación 1:1 o 0 dB)



$$D(\%) = \frac{E_d}{E_1 + E_2} \times 100$$

IMD(x order, CCIF) less than x%, x Hz / x Hz, x : x, +x dBu

Agenda

- Conceptos generales
- Ganancia y potencias a frecuencia fija
- Respuesta en frecuencia (distorsión lineal en frecuencia)
- Distorsión alineal
 - Teoría
 - Distorsión armónica
 - Distorsión por inter-modulación
- Ruido

Concepto de Ruido en amplificadores de audio

- Mínima señal que puede amplificarse → limitada por **tensiones/corrientes de variación aleatoria** en los circuitos del amplificador. Ellas reciben la denominación general de **ruido**, y son limitantes para amplificadores que trabajan con señales débiles [TermanPettit]
- Tanto el **ruido** como la **interferencia** empeoran la calidad de las señales procesadas en equipos tales como amplificadores, repetidores, o detectores. Por ejemplo, en un receptor, el ruido/interferencia limitan la **sensibilidad**, mientras que en un sistema digital pueden generar **errores en los datos recibidos** [Grazzini]
- El ruido y la interferencia tienen **efectos parecidos**, pero **orígenes muy distintos**
- **Interferencia**: es **predecible** → por lo general se puede **eliminar**
- **Ruido**: señales **aleatorias** y por tanto **impredecibles** → se puede **minimizar**, pero **no eliminar**
- **En un amplificador**, se busca en general que se produzca una corriente/tensión eléctrica en carga **en respuesta a una señal de excitación de entrada**. **Sin embargo**, en la salida habrá también otras componentes:
 - **Distorsión** armónica y por intermodulación (sólo con señal, ya se vió anteriormente)
 - **Interferencia** de otros equipos/sistemas (por ej. la línea) y **ruido** (llamado “hiss” o “buzz”): **se producen aún sin excitación aplicada**

Tipos de ruido

1. **Ruido de disparo, granalla, o *shot noise*:** debido a la naturaleza discontinua de los portadores de carga en conductores y semi-conductores. Actualmente tiene poca importancia.

$$I_{sn} = \sqrt{2qiB}; \quad q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; \quad i = \text{corriente promedio}$$

2. **Ruido térmico, blanco, de resistencia o de Johnson:** movimiento aleatorio de portadores de carga en un **medio conductor con temperatura > cero absoluto**. Todo conductor eléctrico produce tensión variable entre sus terminales, por el movimiento aleatorio de electrones libres por agitación térmica.

Tensión producida a **circuito abierto en un ancho de banda $f_2 - f_1$** (valor medio del **cuadrado** de la tensión de ruido):

$$e_n^2 = 4kT \int_{f_1}^{f_2} R \cdot df$$

$k = 1,374 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ $R = \text{Parte resistiva de la impedancia}$
En general, variable con f

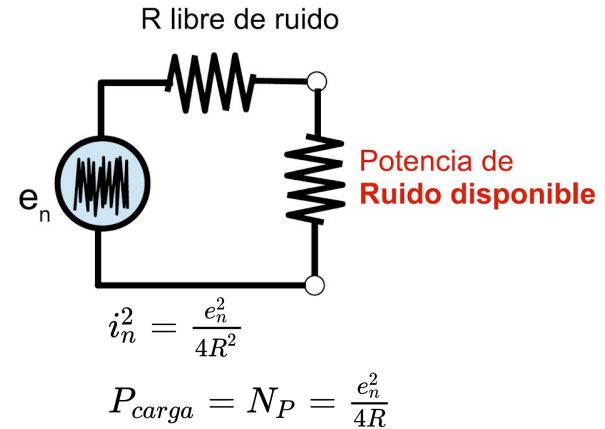
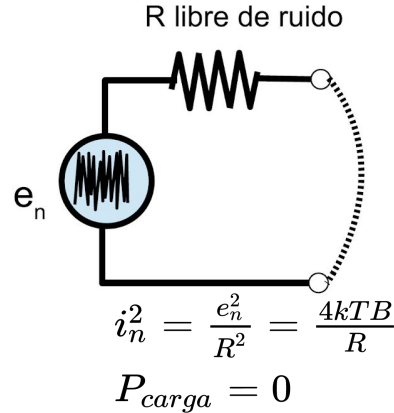
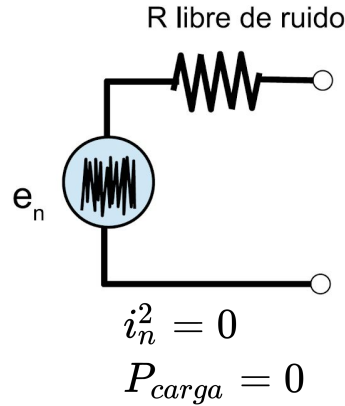
Ahora bien; si la componente resistiva R es **constante en el rango $[f_1; f_2]$** , esto se simplifica:

$$e_n^2 = 4kTR(f_2 - f_1) = 4kTRB$$

Se observa que esta tensión **es proporcional al ancho de banda B pero independiente de su punto central, por ello se llama BLANCO** (en la práctica se considera blanco si es +- uniforme hasta $\sim 10^{13} \text{ Hz}$). **Sin embargo**, el ruido observado sobre un **circuito conectado** a esta resistencia (ej. un C, una L, un ampli) **depende de la Respuesta en Frecuencia de ese circuito!**

Efectos de ruido blanco en los amplificadores de audio

Consideremos ahora ese modelo de la resistencia R , pero conectado a **diferentes cargas**:



Potencia de ruido disponible: potencia de ruido que **se entregaría a una resistencia de carga $R_L = R$** .

Es independiente del valor de R , ya que **por definición es válida sólo para el caso $R_L = R$!**

$$N_P = V_{R_L} \times I_{R_L} = i_n^2 \times R_L = \frac{e_n^2}{4R^2} \times R = \frac{e_n^2}{4R} = kTB \quad \text{A } T_{amb}, N_P \text{ depende sólo de } B!$$

$$\text{Si } T = 290K : N_{dBm} = 10 \log \frac{kTB}{1mW} = 10 \log \frac{kT}{1mW} + 10 \log B = -174dBm + 10 \log B$$

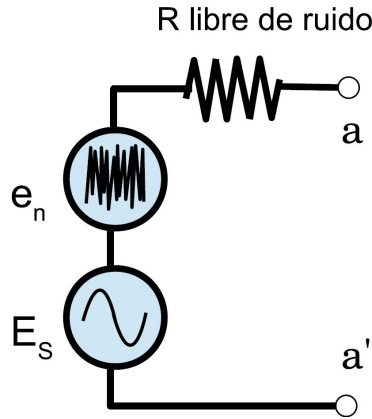
La potencia de ruido disponible es **teórica** ya que supone que R_L (o lo que esté conectado) **no suma ruido térmico**. Para obtener el total, deberíamos sumar lo que **aporta** R_L (o el circuito que se conecta en la carga)

Relación señal-ruido

- Medida de la **calidad de señal de salida** que entrega un dispositivo [Grazzini]
- Medida en que **el ruido está asociado con la señal**
- Relación de **potencias (promedio)** señal/ruido, o **el equivalente expresado en base a tensiones eficaces**. Dado que suelen ser **números muy grandes**, se expresa **en decibeles**

$$SNR[veces] = \frac{E_s^2}{e_n^2} \quad SNR [dB] = 10 \cdot \log \frac{S_{prom}}{N_{prom}} = 20 \cdot \log \frac{V_{signal}}{V_{noise}}$$

1) **Máxima SNR** → cuando se tiene una fuente con resistencia interna R **en circuito abierto**:



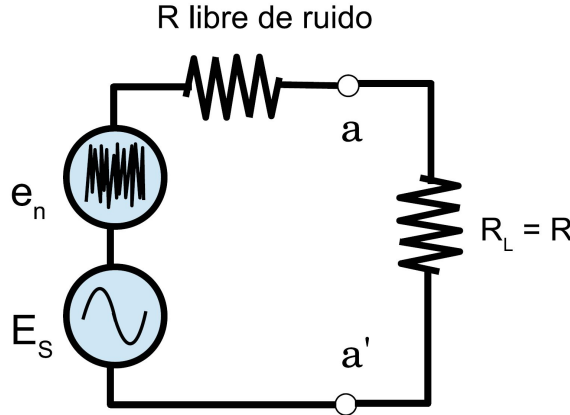
Tension senal en a – a' : E_s

Tension ruido en a – a' : $\sqrt{4kTBR}$

$$SNR_{max}[veces] = \frac{E_s^2}{e_n^2} = \frac{E_s^2}{4kTBR} = \frac{E_s^2}{4R} \frac{1}{kTB} = \frac{N_P}{S_P}$$

Relación señal-ruido

2) Si ahora **conecto una carga $R_L = R$** , la **SNR se verá reducida respecto a su máximo**:



$$\text{Tension senal en } a - a' : \frac{E_s}{2}$$

$$\text{Tension ruido en } a - a' : \sqrt{4ktB(R/2)}$$

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} = \frac{E_s^2}{4kTB(R/2)} = \frac{E_s^2}{8kTBR} = \boxed{\frac{SNR_{max}}{2}}$$

3) Finalmente, si en lugar de conectar una carga conecto un **amplificador** en $a-a'$, **se amplifican igualmente señal y ruido**. Además, **el amplificador introduce ruido adicional** por lo que **la SNR se degrada**
 \Rightarrow **número o figura de ruido** (y ancho de banda equivalente de ruido [TermanPettit])

Figura de ruido de un amplificador

Especifica el **deterioro de la SNR** provocado por un amplificador (o cualquier red de 4 puertos, en general)

$$F = \frac{SNR \text{ en ENTRADA [veces]}}{SNR \text{ en SALIDA [veces]}} = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_o}{N_o}} \geq 1$$

$$F = SNR \text{ en ENTRADA [dB]} - SNR \text{ en SALIDA [dB]} \geq 0$$

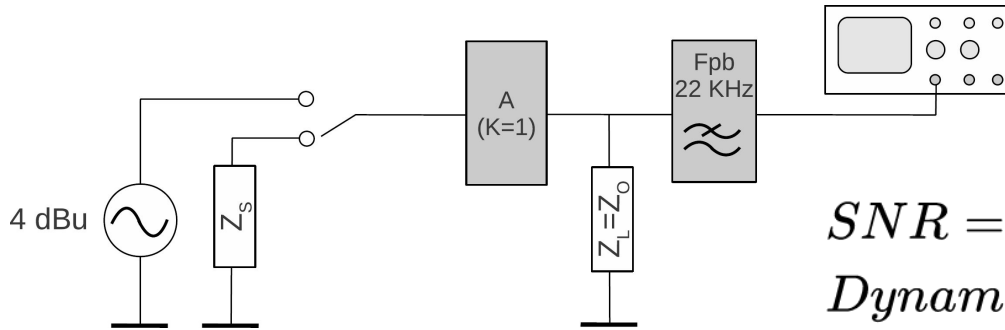
Si tomamos como RUIDO DE ENTRADA la **potencia de ruido disponible $k.T.B$** (ver pág. 35):

$$F = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_o}{N_o}} = \frac{\frac{P_s}{kTB}}{\frac{G \cdot P_s}{N_o}} \Rightarrow \boxed{N_o = F \cdot GkTB}$$

Ruido de salida
Si el amplif. fuera IDEAL
($F = 1$ o 0 dB)

Medidas de ruido en amplificadores de audio

- **Nivel de ruido de salida:** se mide como la **integral del piso de ruido en el ancho de banda del amplificador (kTB)**. Para ello:
 - se reemplaza el generador por su resistencia equivalente generadora de ruido térmico
 - se coloca a la salida un filtro pasabajo limitador de ruido (B), de ancho ~ 22 KHz (margen para que el filtro deje pasar hasta 20 KHz)
 - se mide **directamente el resultado de la integral**, mediante un voltímetro true rms
 - **la ganancia, de ser posible, se hace unitaria**
- **SNR:** se aplica una señal y se mide la relación entre esta señal y el ruido medido
- **Rango dinámico:** finalmente, se lleva a señal máxima y se aplica su relación respecto al ruido anterior

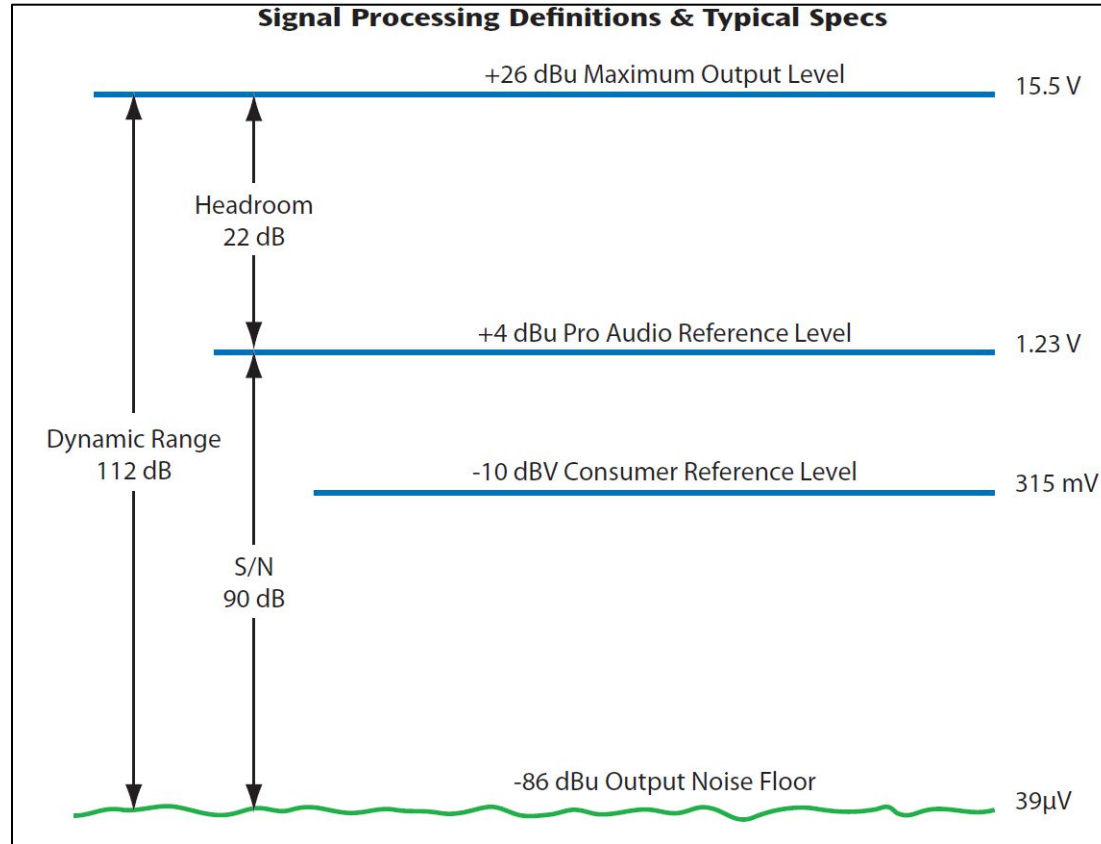


$$SNR = x \text{ dB rel. } x \text{ dBu, } x \text{ BW, } x \text{ gain}$$

$$\text{Dynamic Range} = x \text{ dB rel. } x \text{ dBu, } x \text{ BW}$$

(se ASUME MÁXIMA SEÑAL)

Medidas de ruido en amplificadores de audio



Ejemplo de las relaciones entre piso de ruido, SNR, y rango dinámico [Rane145]

Bibliografía

Básica:

- F. E. Terman, J. M. Pettit, ***Mediciones Electrónicas, Ch. 8: Mediciones en los amplificadores***. Ed. Arbó
B. M. Oliver, J. M. Cage, ***Electronic Measurements and Instrumentation, Ch. 13: Measurements on audio and video amplifiers***. McGraw-Hill, 1971
B. Metzler, ***Audio Measurement Handbook***. Audio Precision, Inc., 1993

Complementaria:

- R. Cabot, ***Fundamentals of Modern Audio Measurement***, Journal of the Audio Engineering Society, 1997
Guidelines for measuring audio power amplifier performance, TI App. Report SLOA068, Oct. 2001

Especificación de mediciones:

- D. Mathew, ***How to write and read audio specifications***, Audio Precision White Paper, 2010
D.Bohn, ***Audio Specifications***, Application Note 145, Rane Corp., 2000

