

Comunicaciones de Datos

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura.
Universidad Nacional del Nordeste

Guía Serie de Trabajos Prácticos N° 3

Transmisión de Señales. Transmisión de Datos

Introducción

Todos los formatos de información (datos, voz, imágenes, video) pueden ser representados mediante *señales electromagnéticas*. Dependiendo del medio de transmisión (guiado / no guiado) y del entorno donde se realicen las comunicaciones, para transmitir información se pueden utilizar señales analógicas o digitales.

Cualquier señal electromagnética, está formada por una serie de frecuencias constituyentes. Un parámetro fundamental en la caracterización de la señal, es el ancho de banda. En términos generales, cuanto mayor es el ancho de banda de la señal, mayor es su capacidad de transportar información.

En cualquiera de sus formas (senoidal, cuadrada, diente de sierra, etc.), los trenes de ondas periódicas constituyen señales. En el esquema de la Teoría de la Información de Shannon, se considera señal a todo conjunto de *ondas electromagnéticas* que viajan de un emisor a un receptor con el propósito de transportar un mensaje.

Circuitos amplificadores y atenuadores

Para transportar un mensaje, la señal atraviesa un conjunto de vínculos y de componentes electrónicos activos y pasivos denominado *circuito*, estos son capaces de mejorar o degradar la calidad de las señales que los atraviesan.

Los circuitos pueden ser *amplificadores* o *atenuadores* lineales, cuando modifican los parámetros lineales de una señal, es decir, aquellos que se miden como amplitudes respecto del tiempo (potencia o tensión).

Un circuito es *amplificador lineal* (Fig. 1), cuando permite obtener los parámetros de amplitud de la señal a la salida, amplificados respecto a la entrada.

Un circuito es *atenuador lineal* (Fig. 2), cuando los parámetros de amplitud de la señal a la salida, son menores que a la entrada. Un circuito atenuador puede ser el mismo medio por el cual transita la señal, se comporta como un circuito atenuador lineal porque el medio no es ideal.

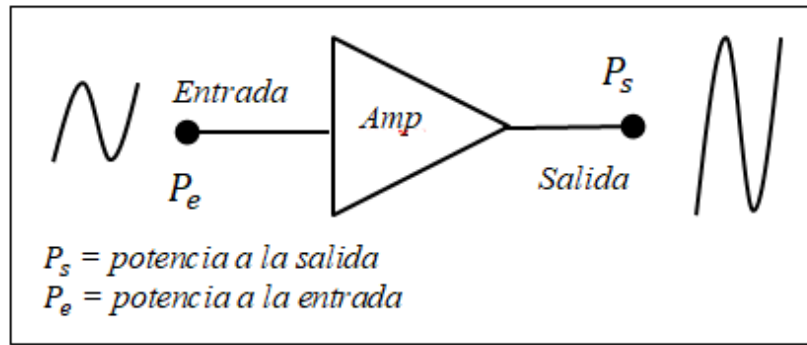


Fig. 1. Representación de un circuito amplificador lineal.

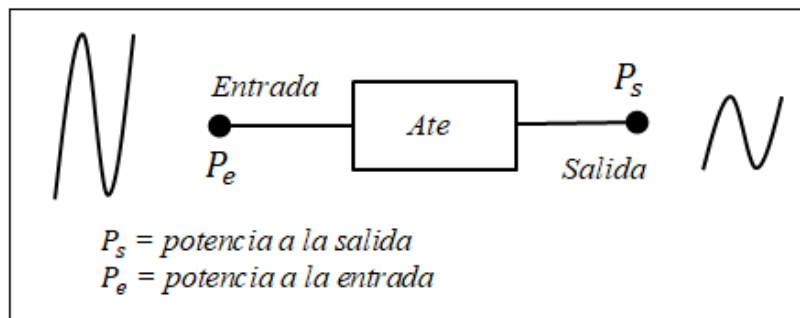


Fig. 2. Representación de un circuito atenuador lineal.

Relación de ganancia y pérdida de una señal

La *relación de ganancia* o *ganancia de la señal* se define como el logaritmo en base 10 del cociente entre el valor del parámetro a la salida y un valor de comparación del mismo parámetro que puede ser su valor a la entrada del circuito o la unidad. Por ejemplo, el logaritmo del cociente entre la potencia a la entrada a la salida y la potencia a la entrada.

Por ser una ganancia, el cociente es mayor que uno, el logaritmo es positivo, el circuito es amplificador.

La *relación de pérdida* o *pérdida de la señal* se define en el caso inverso. El cociente es entre el valor del parámetro a la entrada y el valor del parámetro a la salida, nunca la unidad.

Por ser una pérdida, el cociente será mayor que uno, el logaritmo será positivo, el resultado recibe el nombre de pérdida y el circuito es atenuador.

Se debe tener presente que tanto la ganancia como la pérdida (ambas) pueden tener valores positivos o negativos.

Cuando se calcula una ganancia como tal (salida respecto a la entrada) se espera un valor positivo. Si arroja un valor negativo se tendrá una pérdida, significa que el parámetro medido tenía mayor valor a la entrada. El circuito supuestamente amplificador esta atenuando.

Cuando se calcula una pérdida como tal (entrada respecto a la salida) se espera un valor positivo. Si arroja un valor negativo se tendrá una ganancia, significa que el parámetro medido tenía mayor valor a la salida que a la entrada. El circuito supuestamente atenuador está amplificando.

Mediciones relativas y absolutas

Las mediciones son *relativas* cuando usan el cociente entre salida y entrada para medir la ganancia del circuito. La unidad es el *decibelio* y se denota *dB*: $1\text{ dB} = 10\text{ Bell}$.

La ganancia como relación entre las potencias se expresa por:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right)$$

La relación de pérdida o pérdida es la menos ganancia:

$$P(\text{dB}) = -G(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right)$$

La ganancia absoluta es una forma de medir el valor del parámetro en un punto dado pero con unidades logarítmicas, es una ganancia respecto a la unidad patrón. Cuando se mide ganancia absoluta se mide en un punto cualquiera de interés y respecto a una unidad.

El *dBm* es una unidad de ganancia absoluta, que mide la potencia respecto a un valor fijo de 1mW :

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_i}{1\text{mW}}; \forall P_i \text{ en mW}$$

En los casos en que se manejan potencias grandes, se toma como valor fijo 1W y en ese caso la unidad se denomina *dBW*.

En muchos medios de comunicaciones, se conoce el valor de lo que se denomina *coeficiente de atenuación*, que se indica normalmente con la letra griega α , y se expresa en *dB/km*. Este coeficiente sirve para calcular la atenuación en un medio de comunicación a una distancia dada l . Para una frecuencia dada a la que se debe especificar el valor de α , la pérdida se puede expresar como:

$$\text{Pérdida total en dB} = 8,68 \cdot \alpha \cdot l$$

Ejemplo 1. La atenuación de una señal es -10dB . ¿Cuál es la potencia final de la señal si originalmente tenía 5W ?

La relación de pérdida o pérdida es la menos ganancia:

$$P(\text{dB}) = -G(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right)$$

Por lo tanto:

$$-10\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{5\text{W}} \right)$$

Entonces:

$$P_s = 10^{(-\frac{10}{10})} \cdot 5W = 10^{-1} \cdot 5W = 0.5W$$

La señal tiene una potencia final $P_s = 0.5W$

Es posible verificar el resultado mediante:

$$P(dB) = -G(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{0.5W}{5W} \right) = -10dB$$

Ejemplo 2. Un acces point (AP) dispone de una potencia de transmisión inalámbrica de $500mW$. Expresar el valor en dBm .

Siendo:

$$dBm = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_i}{1mW}; \forall P_i \text{ en } mW$$

Se tiene:

$$dBm = 10 \cdot \log_{10} \frac{500mW}{1mW} = 2,70dBm$$

Ejemplo 3. Calcular la atenuación en un par de abonado sabiendo que $\alpha = 2 dB/km$ operando a $1KHz$ y la distancia de la línea desde la central telefónica hasta el domicilio del usuario es de $20 km$.

Para $1 KHz$, un coeficiente de atenuación $\alpha = 2 dB/km$ y una distancia $l = 20 km$, la pérdida total en dB resulta:

$$\text{Pérdida total en } dB = 8,68 \cdot 2 \frac{dB}{km} \cdot 20 km = 347.2dB$$

Ejemplo 4. Una señal ha pasado a través de tres amplificadores en cascada (Fig. 3), cada uno de los cuales tenía una ganancia de $4dB$. ¿Cuál es la ganancia total? ¿Cuánto se ha amplificado la señal?

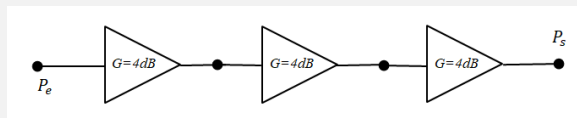


Fig. 3. Amplificadores en cascada.

Una razón para utilizar dB para medir cambios en la potencia de una señal es poder sumarlos o

restarlos cuando se miden varios puntos.

Sumando las ganancias de los amplificadores en cascada:

$$Ganancia\ total = 4dB + 4dB + 4dB = 12\ dB$$

Sabiendo que la ganancia como relación entre las potencias se expresa por:

$$G(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right)$$

Podemos escribir:

$$12dB = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right)$$

Resulta entonces:

$$P_s = 10^{1.2} \cdot P_e \cong 15.85 \cdot P_e$$

Es decir, que la potencia de salida (P_s) equivale a 15.85 veces la potencia de entrada (P_e) o, en otras palabras, la potencia de la señal ha amplificado 15.85 veces.

Podemos verificar el resultado, siendo:

$$\frac{P_s}{P_e} \cong 15.85$$

Resulta entonces:

$$G(dB) = 10 \cdot \log_{10} 15.85 \cong 12dB$$

Ejemplo 5. Se transmite una señal de 5mW a través de un cable de 5 km. Calcular la ganancia que deberá tener el amplificador en el extremo final para obtener una potencia de recepción equivalente a la potencia transmitida, sabiendo que la pérdida en el medio es de 0.3 dB/km.

Representando esquemáticamente en la Fig. 4 los componentes del circuito planteado en el problema, se observa que es posible calcular la potencia de salida en el extremo final del cable (P_{s1}) que será el dato a utilizar como potencia de entrada (P_{e2}) para calcular la ganancia (G) del amplificador en el extremo final, para obtener una potencia de recepción (P_{s2}) equivalente la potencia transmitida (P_{e1}):

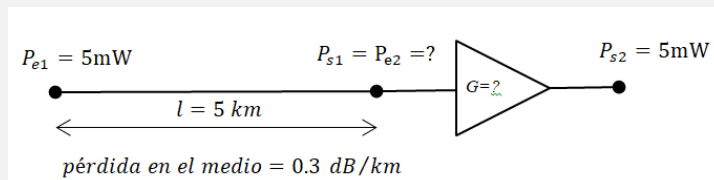


Fig. 4. Representación esquemática del circuito.

Sabiendo que el medio se comporta como un circuito atenuador, podemos calcular la potencia de salida P_{s1} , sabiendo que:

$$P(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_e} \right)$$

Entonces:

$$P_s = 10^{P(\text{dB})/10} \cdot P_e$$

La pérdida es:

$$\text{pérdida total en el medio} = 0.3 \text{ dB/km} \cdot 5 \text{ km} = -1.5 \text{ dB}$$

Resulta entonces:

$$P_{s1} = 10^{-1.5 \text{ dB}/10} \cdot 5 \text{ mW} \cong 3.53 \text{ mW}$$

Haciendo $P_{e2} = P_{s1} = 3.53 \text{ mW}$, es posible calcular la ganancia del circuito amplificador para obtener una potencia de recepción $P_{s2} = 5 \text{ mW}$, equivalente a la potencia transmitida:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{s2}}{P_{e2}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{5 \text{ mW}}{3.53 \text{ mW}} \right) = 1.51 \text{ dB}$$

Es posible verificar el resultado, calculando:

$$P_{s2} = 10^{G(\text{dB})/10} \cdot P_{e2} = 10^{1.51 \text{ dB}/10} \cdot 3.53 \text{ mW} \cong 5 \text{ mW}$$

Ruido eléctrico

Una manifestación de energía es *ruido* siempre que perturbe a una señal. Las condiciones necesarias son:

- Tener una energía perceptible no deseada.
- Ser de naturaleza electromagnética.
- Estar presente en el pasabanda útil.

Por ejemplo, en una emisión de radio que es perturbada por los ruidos electrostáticos de las descargas atmosféricas, se cumplen las tres condiciones.

Los ruidos que no dependen de la señal y que son independientes de su presencia se llaman *ruidos no correlacionados*. Pueden ser *internos* o *externos* al circuito.

Los ruidos no correlacionados internos, interferencias electromagnéticas generadas dentro del circuito (térmico o plano, de disparo y de transito), pueden ser hasta cierto punto manejados y calculados.

Los ruidos no correlacionados externos, producidos fuera del circuito por la naturaleza (atmosférico, solar o cósmico) o por el hombre (industrial) son más inmanejables aunque algunos son también ponderables.

Los ruidos que existen solo ligados a la existencia de la señal se llaman *correlacionados*. Aparecen cuando se comienza a transmitir una señal por un circuito, persisten mientras dura la señal y cesan cuando cesa la señal y porque la señal cesa. Al estar ligados a la existencia misma de la

señal, son internos. Los principales son el ruido de distorsión armónica y el ruido de intermodulación.

Relación entre la señal y el ruido

Una de las formas más usuales de medir los niveles de ruido es comparándolos con los niveles de la señal. No se utilizan valores absolutos, es una forma relativa de medición.

Para reproducir adecuadamente la señal, los receptores necesitan una buena diferenciación entre señal y ruido, cuando mejor es esa diferenciación, mejor es la lectura de la señal.

A esta relación entre el nivel de la señal y el nivel de ruido, se la denomina *relación señal a ruido* o simplemente S/N o SNR .

La SNR es el cociente entre los valores de los parámetros de la señal y del ruido en el mismo punto y con resultado adimensional. La relación en potencia adimensional se define como:

$$SNR = \frac{P_S}{P_N}$$

El mejoramiento del parámetro se da con el aumento de su valor, a mayor SNR son mejores las posibilidades de reconstruir la señal. Es mejor la calidad del sistema.

La relación dada puede resultar en números muy grandes y es mejor manejada en modo logarítmico, utilizando decibels:

$$SNR(dB) = 10 \cdot \log SNR \Leftrightarrow SNR = 10^{SNR(dB)/10}$$

Ejemplo 6. Para un amplificador con potencia de señal de salida de 10W y potencia de ruido de salida de 0.01W, determinar la relación de potencia de señal a ruido.

La SNR , en potencia adimensional, se expresa por:

$$SNR = \frac{P_S}{P_N}$$

Resulta entonces:

$$SNR = \frac{10W}{0.01W} = \frac{10W}{10^{-2}W} = 1000$$

Recordando que:

$$SNR(dB) = 10 \cdot \log SNR \Leftrightarrow SNR = 10^{SNR(dB)/10}$$

Podemos expresarla en dB :

$$SNR = 10 \cdot \log 1000 = 30dB$$

Capacidad del canal

Es la velocidad a la que se pueden transmitir los datos. Los conceptos relacionados con la capacidad son:

- La velocidad de los datos, es la velocidad a la que se pueden transmitir los datos, expresada en *bps* (bits por segundo).
- El ancho de banda de la señal, en hercios (*Hz*), que estará limitado por el transmisor y por la naturaleza del medio de transmisión.
- La tasa de errores, razón a la que ocurren los errores, considerándose un error cuando se recibe un 1 habiéndose transmitido un 0 o viceversa.

Para un ancho de banda determinado, sería deseable conseguir la mayor velocidad de datos posible no superando la tasa de errores permitida. El mayor inconveniente para conseguir este propósito es la existencia de ruido.

Los principales aspectos a considerar son:

- El ancho de banda de Nyquist.
- La capacidad de canal de Shannon.
- El cociente E_b/N_0 .

Para un canal sin ruido (ideal), según Nyquist, si la velocidad de transmisión es de $2 \cdot W$, entonces una señal con frecuencias no superiores a W es suficiente para conseguir esta velocidad de datos. Dado un ancho de banda de W , la velocidad mayor de transmisión que se puede conseguir es de $2 \cdot W$.

Si las señales a transmitir son binarias (2 niveles de tensión), la velocidad de transmisión que se puede lograr con W *Hz* es de $2 \cdot W$ *bps*.

Ejemplo 7. Un canal de voz se utiliza con un modem para transmitir datos digitales, el ancho de banda es 3100 *Hz*, la capacidad es:

$$C = 2 \cdot W = 2 \cdot 3100 \text{ Hz} = 6200 \text{ bps}$$

Si se utilizan señales con más de dos niveles, cada elemento de señal puede representar más de dos bits. Por ejemplo, en una señal con cuatro niveles de tensión, cada elemento de la misma podrá representar 2 bits.

La fórmula de Nyquist para señales multinivel es:

$$C = 2 \cdot W \cdot \log_2 M$$

M es el número de señales discretas o niveles de tensión.

Ejemplo 8. Para el canal de voz del ejemplo 7, si $M = 8$, resulta:

$$C = 2 \cdot W \cdot \log_2 M = 2 \cdot 3100 \text{ Hz} \cdot \log_2 8 = 18.600 \text{ bps}$$

Duplicar el ancho de banda, duplica la velocidad de transmisión si se mantiene todo lo demás inalterado.

Dado un nivel de ruido, cuanto mayor es la velocidad de transmisión, mayor es la tasa de errores, más bits se ven afectados (los bits se hacen más “cortos” al aumentar la velocidad de transmisión).

Dado un nivel de ruido, incrementando la energía de la señal se mejoraría la recepción de los datos en presencia de ruido. La SNR medida en el receptor y expresada en dB , es importante en la transmisión de datos digitales ya que establece la máxima velocidad de transmisión que se puede conseguir.

Según Shannon, la capacidad máxima del canal con ruido es:

$$C = W \cdot \log_2(1 + SNR)$$

Ejemplo 9. Un modem transmite datos digitales sobre un canal de voz con un ancho de banda de $W = 3100 \text{ Hz}$ y una $SNR(dB) = 30 \text{ dB}$, la capacidad del canal en bps será¹:

$$C = W \cdot \log_2(1 + SNR) = 3100 \text{ Hz} \cdot \log_2(1 + 1000) = 30.894 \text{ bps}$$

Representa el máximo teórico, no práctico, ya que sólo se ha considerado el ruido blanco.

Ejemplo 10. Relación entre las fórmulas de Shannon y Nyquist.

El espectro de un canal está entre 3 MHz y 4 MHz y la $SNR(dB) = 24 \text{ dB}$:

$$W = 4\text{MHz} - 3\text{MHz} = 1\text{MHz}$$

$$SNR = 10^{\frac{24\text{dB}}{10}} = 251$$

Según Shannon,

$$C = W \cdot \log_2(1 + SNR)$$

el límite teórico es:

$$C = 1 \cdot 10^6 \text{ Hz} \cdot \log_2(1 + 251) \cong 7.977.279 \text{ bps} \cong 8 \text{ Mbps}$$

¹ En la fórmula de capacidad del canal de Shannon la SNR se expresa de manera adimensional:

$$SNR = 10^{\frac{30\text{dB}}{10}} = 1000$$

Según Nyquist,

$$C = 2 \cdot W \cdot \log_2 M$$

se puede calcular el número de niveles de señalización para lograrlo:

$$8 \cdot 10^6 bps = 2 \cdot (1 \cdot 10^6 Hz) \cdot \log_2 M$$

$$4 = \log_2 M$$

$$M = 16$$

Bibliografía recomendada

[1] David Luis La Red Martínez. Presentaciones de Clases Teóricas. Comunicaciones de Datos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. Universidad Nacional del Nordeste.