Un dibujo animado con letras

Descripción generada automáticamente con confianza bajaUniversidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Rosario

Especialidad: Ing. En Sistemas de Información.

Asignatura: Comunicación de datos.

Comisión: 302

Fecha: 21/10/2024

INFORME N°6 – Asignación (Capacidad del canal)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Alumno** | **Legajo** | **Firma** |
| DEL POPOLO, Chiara | 49941 |  |
| MONDINO, Juan Cruz | 51922 |  |
| MORENO, Natan | 47962 |  |
| PONTELLI, Juan Martín | 51315 |  |

Contenido

[Glosario 3](#_Toc180745853)

[Introducción 6](#_Toc180745854)

[Teoría de la información 7](#_Toc180745855)

[El problema de la codificación 8](#_Toc180745856)

[Medidas de información 10](#_Toc180745857)

[Teoremas de Shannon 12](#_Toc180745858)

[Teorema de Nyquist 15](#_Toc180745859)

[Ley de Hartley 16](#_Toc180745860)

[Teorema de codificación de canal 18](#_Toc180745861)

[Teorema de Shannon-Hartley 19](#_Toc180745862)

[Capacidad del canal 20](#_Toc180745863)

[Tipos de canales 21](#_Toc180745864)

[Eficiencia del canal 22](#_Toc180745865)

[Eficiencia espectral 23](#_Toc180745866)

[Asignación de capacidad en canales físicos y redes 24](#_Toc180745867)

[Asignación de Capacidad 25](#_Toc180745868)

[Técnicas de acceso múltiple 25](#_Toc180745869)

[QoS (Quality of Service): 28](#_Toc180745870)

[Control de congestión 33](#_Toc180745871)

[Optimización y algoritmos para la asignación de capacidad 35](#_Toc180745872)

[Algoritmos de asignación de capacidad 35](#_Toc180745873)

[Algoritmos de asignación estática 35](#_Toc180745874)

[Algoritmos de asignación dinámica 35](#_Toc180745875)

[Algoritmos basados en programación lineal y entera 37](#_Toc180745876)

[Asignación de espectro 41](#_Toc180745877)

[Conclusión 41](#_Toc180745878)

[Cuestionario 42](#_Toc180745879)

[Bibliografía 44](#_Toc180745880)

# Glosario

**Ancho de banda:** es el rango de frecuencias que un canal de comunicación puede transmitir sin atenuación significativa. Se mide como la diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja en el espectro de frecuencias que puede manejar un sistema.

**Canales discretos**: Son aquellos donde tanto las señales de entrada (transmitidas) como las de salida (recibidas) pertenecen a un conjunto discreto de posibles valores. Ejemplos de esto incluyen canales de texto o sistemas de comunicación digital que trabajan con secuencias de bits o símbolos.

**Canales continuos**: En estos, las señales transmitidas y recibidas son variables continuas (por ejemplo, en señales analógicas o de radiofrecuencia).

**Ralph V. L.** **Hartley** fue un ingeniero eléctrico y teórico de la información que hizo contribuciones significativas al campo de la teoría de la información. Su trabajo sobre la medida de información y la función logarítmica influyó en Claude Shannon, quien desarrolló la teoría de la información moderna. Hartley propuso que la cantidad de información podría ser medida por la función logarítmica, lo que se conoció como la Teoría de la Información de Hartley. Esta idea fue fundamental para Shannon al desarrollar su concepto de entropía y su teorema de Shannon-Hartley, que describe la capacidad de un canal de comunicación.

**Aliasing** es un fenómeno que ocurre cuando una señal se muestrea de forma insuficiente, lo que provoca que las frecuencias altas de la señal original se mezclen y se interpreten como frecuencias más bajas en la señal muestreada. Esto genera una distorsión o error en la representación de la señal, ya que las frecuencias aliasadas se superponen con las verdaderas, creando una versión incorrecta o irreconocible de la señal original.

Este fenómeno no se limita solo al procesamiento de señales, sino que también puede ocurrir en otros contextos, como gráficos digitales. En gráficos, el aliasing aparece como bordes dentados o líneas escalonadas cuando se representan formas curvas o diagonales con una baja resolución de píxeles. Para reducir este problema, se utilizan técnicas como el anti-aliasing, que suaviza los bordes en gráficos o elimina las frecuencias no deseadas en señales antes del muestreo.

**Ruido Gaussiano:**

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Ilustración

Observando la ilustración 1, el valor promedio es cero en el dominio del tiempo. Si el valor promedio no fuese cero, entonces se podría restar el valor promedio, llamarlo sesgo, y quedaría un promedio de cero. Los puntos individuales en el gráfico no son “uniformemente aleatorios”, es decir, los valores más grandes son más raros, la mayoría de los puntos están más cerca de cero.

A este tipo de ruido se lo llama “ruido gaussiano”. Es un buen modelo para el tipo de ruido que proviene de muchas fuentes naturales, como las vibraciones térmicas de los átomos en el silicio de los componentes de radiofrecuencia del receptor de un canal de comunicación.

El teorema del límite central dice que la suma de muchos procesos aleatorios tenderá a tener una distribución gaussiana, incluso si los procesos individuales tienen otras distribuciones. En otras palabras, cuando suceden y se acumulan muchos eventos aleatorias, el resultado parece aproximadamente gaussiano, incluso cuando los eventos individuales no tienen una distribución gaussiana.

Imagen que contiene Diagrama

Descripción generada automáticamente

Ilustración

La distribución gaussiana también se llama distribución “normal” (una curva de campana o acampanada).

La distribución gaussiana tiene dos parámetros: media y varianza. La media puede considerarse cero porque siempre se puede eliminar la media, o el sesgo, si no es cero. La variación cambia qué tan “fuerte” es el ruido. Una variación mayor dará como resultado números mayores. Es por esta razón que la varianza define la potencia del ruido. La varianza es igual a la desviación estándar al cuadrado.

# Introducción

La capacidad de un canal es la cantidad máxima de información que puede ser transmitida a través de un canal de comunicaciones, medida en bits por segundo (bps). Depende principalmente de dos factores: el ancho de banda y la relación señal-ruido (S/N). El ruido electromagnético es un factor limitante, ya que reduce la cantidad de información que puede ser transmitida sin errores. Para medir esta influencia, se utiliza la relación señal-ruido (SNR), donde un mayor valor de SNR permite aumentar la tasa de transmisión de datos y reducir los errores producidos por el ruido.

El teorema de codificación para canales ruidosos establece que la capacidad de un canal es la tasa de transmisión máxima que se puede lograr con una probabilidad de error arbitrariamente baja. En telecomunicaciones, la optimización del uso del espectro electromagnético es fundamental, ya que se trata de un recurso limitado cuya demanda ha crecido de manera acelerada. Por esta razón, es crucial maximizar la eficiencia de los canales de transmisión.

En las redes de comunicaciones, existe un número limitado de canales disponibles. Para soportar una gran cantidad de conexiones, es necesario reutilizar los mismos canales para diferentes comunicaciones simultáneamente, respetando un conjunto de restricciones que aseguren la transmisión confiable de la información. El problema de asignación de canales (CAP) aborda esta limitación, proponiendo métodos que permiten asignar los canales disponibles de manera eficiente. El objetivo es garantizar que la información pueda ser transmitida entre un emisor y un receptor de manera segura, utilizando la menor cantidad de recursos posible, mientras se minimizan las interferencias.

Los distintos modelos de CAP dependen de las restricciones impuestas en la asignación de canales, las cuales responden a las necesidades del usuario final. En general, existen dos tipos de asignación: la asignación estática, que resuelve el problema para una demanda fija de canales, y la dinámica, que lo hace para una demanda variable.

El concepto de capacidad de canal ha sido clave en el avance de los sistemas de comunicación modernos, tanto alámbricos como inalámbricos, permitiendo que nuevas técnicas de codificación y corrección de errores acerquen el rendimiento de las transmisiones a los límites teóricos definidos por la capacidad del canal.

# Teoría de la información

Lo cierto es que el estudio de los problemas técnicos asociados a la transmisión, medición y procesamiento de la información ha cobrado vital importancia para las relaciones sociales y comerciales de la sociedad globalizada. Sin ir más lejos, los mercados actuales dependen fuertemente de que los canales informacionales entre los distintos agentes económicos funcionen en forma fluida y eficiente. Pero la importancia del estudio de los flujos informacionales y su correcto funcionamiento va más allá de la esfera estrictamente económica y abarca fines militares, científicos y recreativos.

En este contexto, el estudio de la Teoría de la Información ha tenido un creciente desarrollo, en el que cada vez más investigadores aúnan esfuerzos para resolver los desafíos planteados por la existencia de unos volúmenes de flujo de información muy difíciles de manejar y administrar. Y es especialmente importante que estos desarrollos contemplen el aspecto matemático formal de la noción de información, de forma tal que ésta se pueda medir y cuantificar para ser aplicada con fines tecnológicos. El desarrollo de una teoría matemática de la información, que permita describir adecuadamente los problemas que los ingenieros comunicacionales encuentran en su trabajo diario es el objetivo que persiguió Claude Shannon cuando desarrolló su formalismo.

La Teoría de la Información de Claude E. Shannon es sin duda uno de los avances científicos más importantes del siglo XX. Estableció la noción de la cantidad de información medida en bits, introdujo el concepto de entropía como medida de incertidumbre, y formuló la idea de la capacidad de canal, que determina la cantidad máxima de información que se puede transmitir a través de un canal de comunicación. Esta teoría proporcionó una base matemática sólida para el estudio de la comunicación y sentó las bases para el desarrollo de algoritmos de compresión de datos, codificación de canales y sistemas de transmisión de señales.

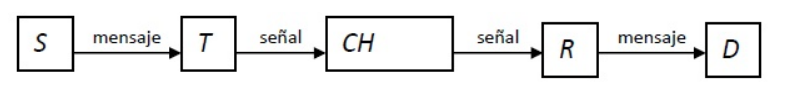
El principal objetivo de esta teoría es el de proporcionar una definición rigurosa de la noción de información que permita cuantificarla, con esto se logra medir la eficiencia con la que es trasmitida. Fue desarrollada con el objetivo de encontrar límites fundamentales en las operaciones de procesamiento de señales tales como compresión de datos, almacenamiento y comunicación. Sus aplicaciones se extienden a campos diversos, entre ellos la física, la química, la biología, la inferencia estadística, la robótica, la criptografía, la computación, la lingüística, el reconocimiento de patrones y la teoría de la comunicación.

Establece que es posible transmitir información a una tasa de hasta la capacidad del canal, C, con un error arbitrariamente pequeño si se utiliza un código adecuado. Sin embargo, si se intenta transmitir a una tasa superior a C, el error no se puede evitar.

Shannon demostró que los datos pueden ser codificados de manera eficiente para minimizar la redundancia, haciendo posible la compresión de datos sin pérdida de información, hasta el límite determinado por la entropía de la fuente. Además, definió el problema principal de la comunicación: “El principal problema de la comunicación es el de reproducir en un punto exacta o aproximadamente un mensaje enviado desde otro punto”.

## El problema de la codificación

De acuerdo a Shannon (1948), un sistema de comunicación general consta de varias partes. Una fuente, la cual genera un mensaje a ser recibido en el destinatario. Un transmisor, que transforma el mensaje generado en la fuente en una señal a ser transmitida. En los casos en los que la información es codificada, el proceso de codificación también es implementado por el transmisor. Un canal es cualquier medio que sirva para que la señal se transmita desde el transmisor al receptor.



Ilustración

La fuente S es un sistema que contiene un conjunto de estados diferentes s1, ..., sn, llamados usualmente letras. Un aspecto central de la teoría de Shannon es que es posible asignar probabilidades de ocurrencia para los distintos estados de la fuente. Es decir, los estados s1, ..., sn son producidos con probabilidades p(s1), ..., p(sn). La cantidad de información generada por la fuente debido a la ocurrencia del estado si se define como:

Dado que S produce sucesiones de estados (estas sucesiones son usualmente llamadas mensajes), la entropía de la fuente S se define como la cantidad promedio de información producida por la fuente:

En forma análoga, el destinatario D es un sistema con un rango de estados posibles d1, ..., dm, a los cuales se le asignan probabilidades p(d1), ..., p(dm). La cantidad de información I(dj) recibida en el destinatario debido a la ocurrencia de dj se define como:

Y la entropía del destinatario se define como la cantidad promedio de información recibida:

## Medidas de información

En su artículo, Shannon menciona que usar una función logarítmica para definir entropías es conveniente. Esto es porque el número de mensajes en un conjunto finito, o cualquier función que varíe linealmente, puede servir como una medida de la información obtenida al seleccionar un mensaje, siempre y cuando todas las opciones sean igualmente probables. Hartley sugirió que la función logarítmica es la elección más natural para esto. Shannon añade que, aunque esta definición necesita ser generalizada cuando se considera la estadística del mensaje o un rango continuo de mensajes, siempre se utiliza una medida esencialmente logarítmica.

Shannon destaca que esta definición tiene muchos usos prácticos, ya que varios parámetros en ingeniería cambian linealmente con el logaritmo del número de posibilidades. Esto no solo la convierte en una medida intuitiva, puesto que suele medirse comparando magnitudes linealmente con unidades estándar, sino que también es matemáticamente apropiada, haciendo que muchas operaciones sean más simples que con otras formas funcionales.

La elección de una base logarítmica se corresponderá con la elección de una unidad de medida de la información. Si la base usada es 2, la unidad resultante se llamará ‘bit’. Este término proviene de la contracción del término en inglés ‘binary digit’. Con estas definiciones, un bit terminará siendo la cantidad de información que se obtiene cuando una de dos alternativas igualmente probables es especificada. En otras palabras, una fuente S con dos estados que puede adoptar los valores 1 y 2 con la misma probabilidad, tendrá una cantidad de información de un bit. Otras bases dan lugar a diferentes unidades de la información. Por ejemplo, si se usan logaritmos naturales, la unidad de medida en este caso será el nat (que es la contracción del término en inglés natural unit). Cuando se usa la base 10 de los logaritmos, la unidad se llama Hartley. La posibilidad de usar diferentes unidades para cuantificar la información muestra la diferencia entre la cantidad de información asociada a un evento y el número de símbolos binarios necesarios para codificarlo. Es importante mencionar que el “bit” es una unidad de medida, y el hecho de que distintas unidades de medida puedan ser usadas no afecta a la naturaleza de la información.

De las definiciones es bastante claro que H(S) y H(D) son cantidades de información promedio. Sin embargo, en la literatura son llamadas usualmente entropías. Efectivamente, la forma funcional que poseen estas medidas de la información es completamente análoga a las formas funcionales que la entropía adquiere en distintas teorías físicas. Esta terminología refleja una problemática profunda en los fundamentos de la teoría de la información. Esto es así a tal punto que el carácter intrigante de esta magnitud y sus propiedades se manifestó al comienzo de la formulación de la teoría. En su búsqueda de un nombre para su nueva medida, Shannon consideró llamarla "información" pero pensó que el término estaba demasiado usado, por lo que optó por "incerteza". Al discutirlo con John von Neumann, este le sugirió "entropía" dado que ya se usaba en la estadística bajo ese nombre.

La relación entre las entropías de la fuente H(S) y del destinatario H(D) se puede representar intuitivamente por el siguiente diagrama:

Un dibujo de una cara feliz

Descripción generada automáticamente con confianza media

Ilustración

Donde:

* I(S;D) es la información mutua: la cantidad promedio de información generada en la fuente S y recibida en el destinatario D.
* E es la equivocación: la cantidad promedio de información generada en S pero no recibida en D.
* N es el ruido: la cantidad promedio de información recibida en D pero no generada en S.

Como el diagrama sugiere desde un punto de vista intuitivo, la información mutua se define como:

La equivocación E y el ruido N son medidas de la independencia entre la fuente y el destinatario, dado que si S y D son completamente independientes, los valores de E y N son máximos (E = H(S) y N = H(D)), y el valor de I(S;D) es mínimo (I(S;D)=0). Por otro lado, si la dependencia entre S y D es máxima, los valores de E y N son mínimos (E = N = 0), y el valor de I(S;D) es máximo (I(S;D)=H(S)=H(D)).

Los valores de E y N son funciones no solo de la fuente y del destinatario, sino también del canal de comunicación CH. La introducción del canal de comunicación lleva directamente a la posibilidad de que se produzcan errores en el proceso de transmisión. El canal CH se puede definir como una matriz [p(dj|si)], donde p(dj|si) es la probabilidad condicional de ocurrencia de dj en el destinatario dado que si ocurrió en la fuente S. Los elementos de cada columna de [p(dj|si)] suman uno. De este modo, E y N se pueden expresar como:

Donde:

## Teoremas de Shannon

Los dos resultados más importantes que obtuvo Shannon son los teoremas conocidos como primer teorema de Shannon y segundo teorema de Shannon.

De acuerdo al primer teorema, o teorema de codificación sin ruido, el valor de la entropía H(S) de la fuente es igual al número de símbolos necesarios en promedio para codificar una letra de la fuente usando un código ideal: H(S) mide la compresión óptima de los mensajes de la fuente. La prueba del teorema se basa en el hecho de que los mensajes de longitud N que produce S pueden ser clasificados en dos clases. Una de estas clases tiene aproximadamente 2NH(S) mensajes típicos, la otra, contiene los mensajes atípicos. Cuando N → ∞, la probabilidad de un mensaje atípico se vuelve despreciable. Por ello, se puede concebir a la fuente como que produce sólo 2NH(S) mensajes posibles. Esto sugiere una estrategia natural para codificar: cada mensaje típico es codificado en una secuencia binaria de longitud NH(S), que es en general más corta que la longitud N del mensaje original.

En los años 40 se pensaba que el incremento de la tasa de transmisión de información sobre un canal de comunicación siempre aumentaría la probabilidad de error. El segundo teorema, conocido como teorema de codificación en un canal con ruido, sorprendió a la comunidad de la teoría de la comunicación probando que esa hipótesis no era cierta si se mantenía la tasa de comunicación por debajo de la capacidad del canal. La capacidad del canal es igual a la tasa máxima con la cual la información puede ser enviada por el canal y recuperada en el destinatario con una probabilidad de error despreciable.

La fuente consiste en un sistema S de n estados si, que se pueden pensar como letras de un alfabeto As = {s1, ..., sn}, cada una con su propia probabilidad p(si). Las secuencias de letras son llamadas mensajes. La entropía de la fuente H(S) se puede calcular exclusivamente en términos de estos elementos, y se mide en bits cuando el logaritmo tiene base 2. A su vez, el transmisor codifica el mensaje de la fuente y esto equivale a hacer una conversión entre el alfabeto de la fuente As = {s1, ..., sn}, y el código del alfabeto del transmisor T, que viene dado por AC = {c1, ..., cq}. Los elementos ci son llamados símbolos. La secuencia de símbolos producidos por el transmisor y que entran al canal se llama señal. El alfabeto de n símbolos AS puede variar mucho dependiendo de los distintos dispositivos empleados. Por otro lado, en muchos ejemplos de interés, conviene elegir un AC binario, es decir, con q = 2. En este caso, los símbolos son directamente dígitos binarios. Pero en el caso más general, el alfabeto del código se puede implementar físicamente por medio de sistemas que tengan una cantidad q de estados disponibles. Para el caso particular en que q = 2, los sistemas de dos niveles se pueden llamar cbits.

En el contexto de la teoría de la información de Shannon, codificar implica establecer un mapa entre las letras si del alfabeto de la fuente AS y el conjunto de cadenas de longitud finita de símbolos del alfabeto del código AC. Estas suelen llamarse palabras-código. En general, las palabras-código no tienen la misma longitud. Cada palabra-código wi que corresponde a la letra si, va a tener una longitud li. Pero las longitudes li de las distintas palabras-código pueden variar. Es entonces útil definir una longitud de palabra-código promedio como:

L es entonces una medida de cuán compacto es el código. En otras, palabras, un código con un valor de L más pequeño será más eficiente, dado que en promedio, economiza más recursos informacionales para codificar los mensajes. El Teorema del Canal Sin ruido afirma que existe un proceso de codificación óptimo tal que la longitud de palabra-código promedio L está tan cerca como se quiera del límite inferior Lmin para L:

En la fórmula de arriba, si H(S) se mide en bits, log es el logaritmo en base 2.

Es importante enfatizar la diferencia entre el proceso de generación de la información en la fuente y la codificación de la información en el transmisor. La información generada en la fuente se mide con H(S), y sólo depende de las características de la fuente, puede ser expresada en bits o en cualquier otra medida de la información. Además, la información generada de esta manera puede ser codificada mediante un alfabeto código de un número arbitrario de símbolos y la longitud promedio de las palabras código depende esencialmente de ese número.

## Teorema de Nyquist

El teorema de Nyquist establece un límite teórico sobre la máxima tasa de transmisión de datos que puede lograrse en un canal libre de ruido, en función de su ancho de banda y del número de niveles de señal utilizados. Formulado por Harry Nyquist, este teorema indica que la velocidad máxima de transmisión (en bits por segundo) es el doble del ancho de banda del canal (en Hz) multiplicado por el logaritmo en base dos del número de niveles de señal posibles. Este principio es clave para entender la capacidad de los sistemas de comunicación y la optimización del uso del canal.

Mediante una señal temporalmente discreta no es posible representar infinitos valores de frecuencias altas porque no es posible tomar muestras a períodos infinitamente pequeños. Por lo tanto, la frecuencia más alta que se puede representar depende de la frecuencia de muestreo que se emplee para discretizar la señal.

El teorema de Nyquist define formalmente cuál es la frecuencia máxima que se puede representar digitalmente a determinada frecuencia de muestreo, a esta frecuencia máxima se la denomina frecuencia de Nyquist.

La frecuencia de Nyquist (N) equivale a N = SR/2 y define que para una determinada tasa de muestreo (Sample Rate - SR), la máxima frecuencia que se puede representar es la mitad de SR. Por ejemplo, a una SR de 44100 Hz, la máxima frecuencia que se puede representar es 44100/2 = 22050 Hz. Si se quisieran muestrear o generar frecuencias mayores a la frecuencia de Nyquist se genera un fenómeno denominado aliasing.

El teorema de Nyquist sostiene que un movimiento oscilatorio se puede representar con un mínimo de dos muestras, una para el semiciclo positivo y otra para el negativo.

Forma

Descripción generada automáticamente

Ilustración

En los gráficos A, B y C de la figura se muestra solo un ciclo de un movimiento sinusoidal a frecuencia de Nyquist. Dos muestras discretas de un ciclo en A, convertidas en una función continua en B que luego de pasar por el filtro pasa bajos, dan como resultado la forma de onda en C.

Digitalmente podría parecer que la forma de onda que se está representando es una onda cuadrada, sin embargo al pasar por el filtro pasa bajos luego de la conversión digital-analógica, todos los componentes que estén por sobre la frecuencia de Nyquist se eliminan dando como resultado una sinusoide.

## Ley de Hartley

Hartley formuló una manera de cuantificar la información y su tasa de transmisión a través de un canal de comunicaciones. Este método, conocido más adelante como ley de Hartley, se convirtió en un importante precursor para la sofisticada noción de capacidad de un canal, formulada por Shannon.

Hartley indicó que el número máximo de pulsos distintos que se pueden transmitir y recibir, de manera fiable, sobre un canal de comunicaciones está limitado por el rango dinámico de la amplitud de la señal y de la precisión con la cual el receptor puede distinguir distintos niveles de amplitud.

De manera específica, si la amplitud de la señal transmitida se restringe al rango de [−A...+A] voltios, y la precisión del receptor es +/- ΔV voltios, entonces el número máximos de pulsos distintos M está dado por:

M=1+A/ΔV

Tomando la información para ser el logaritmo del número de los mensajes distintos que podrían ser enviados, Hartley después construyó una medida de la información proporcional al ancho de banda del canal y a la duración de su uso. A veces sólo se habla de dicha proporcionalidad cuando se cita a la ley de Hartley.

Posteriormente, Hartley combinó la observación de Nyquist,y su propia cuantificación de la calidad o ruido de un canal en términos del número de niveles de pulso que podían ser distinguidos, de manera fiable y denotados por M, para llegar a una medida cuantitativa de la tasa de información que se puede obtener.

La ley de Hartley se explica, cuantitativamente, de manera usual, como la tasa de información alcanzable de R bits por segundo, (b/s):

R=2B . log2(M)

Hartley no resolvió, de manera precisa cómo el parámetro M debe depender de las estadísticas de ruido del canal, o cómo la comunicación podía ser fiable incluso cuando los pulsos individuales correspondientes a símbolos no se pudieran distinguir, de manera fiable, de los niveles de M; con las estadísticas del ruido gaussiano.

Los diseñadores de sistemas tienen que elegir un valor muy conservador de M para alcanzar la mínima tasa de error.

El concepto de una capacidad libre de errores aguardó hasta que Claude Shannon investigó sobre las observaciones de Hartley con respecto a la medida logarítmica de la información y las observaciones de Nyquist sobre el efecto de las limitaciones del ancho de banda del canal.

El resultado de la tasa de Hartley se puede ver como la capacidad de un canal M sin errores de 2B símbolos por segundo. Algunos autores se refieren a ello como capacidad. Pero ese supuesto canal, libre de errores, es un canal ideal, y el resultado es, necesariamente, menor que la capacidad de Shannon de un canal con ruido de ancho de banda B, que es el resultado Hartley-Shannon que se estimó más adelante.

## Teorema de codificación de canal

El desarrollo de la teoría de la información de Claude Shannon durante la Segunda Guerra Mundial estimuló el siguiente gran paso para entender qué cantidad de información se podría comunicar, sin errores y de manera fiable, a través de canales con ruido gaussiano de fondo.

Fundamentado sobre las ideas de Hartley, el teorema de Shannon de la codificación de canales con ruido (1948) describe la máxima eficiencia posible de los métodos de corrección de errores versus los niveles de interferencia de ruido y corrupción de datos. La prueba del teorema muestra que un código corrector de errores construido aleatoriamente es, esencialmente, igual de bueno que el mejor código posible. El teorema se prueba con la estadística de tales códigos aleatorios.

El teorema de Shannon demuestra cómo calcular la capacidad de un canal sobre una descripción estadística del canal y establece que, dado un canal con ruido con capacidad C e información transmitida en una tasa R, entonces si

R < C

existe una técnica de codificación que permite que la probabilidad de error en el receptor se haga arbitrariamente pequeña. Esto significa que, teóricamente, es posible transmitir información casi sin error hasta un límite cercano a C bits por segundo.

El inverso también es importante. Si:

R > C

la probabilidad del error en el receptor se incrementa sin límite mientras se aumente la tasa. De esta manera no se puede transmitir ninguna información útil por encima de la capacidad del canal. El teorema no trata la situación, poco frecuente, en que la tasa y la capacidad son iguales.

## Teorema de Shannon-Hartley

El teorema de Shannon-Hartley establece cuál es la capacidad del canal, para un canal con ancho de banda finito y una señal continua que sufre un ruido gaussiano. Conecta el resultado de Hartley con el teorema de Shannon de la capacidad del canal en una forma que es equivalente a especificar la M en la fórmula de Hartley de la tasa de información en términos de la relación señal/ruido, pero alcanzando fiabilidad a través de la codificación correctora de errores, más fiable, que los niveles de pulso distinguibles.

Si existiera una cosa tal como un canal analógico con ancho de banda infinito y sin ruido, uno podría transmitir cantidades ilimitadas de datos sin error, sobre este, por cada unidad de tiempo. Sin embargo, los canales de comunicación reales están sujetos a las limitaciones impuestas por el ancho de banda finito y el ruido.

Entonces, ¿cómo el ancho de banda y el ruido afectan a la tasa en la que la información puede ser transmitida sobre un canal analógico?

Aunque parezca sorprendente, las limitaciones del ancho de banda, por sí solas, no imponen restricciones sobre la tasa máxima de información. Esto es porque sigue siendo posible, para la señal, tomar un número infinitamente grande de valores distintos de voltaje para cada pulso de símbolo, siendo cada nivel levemente distinto del anterior que representa a un determinado significado o secuencia de bits. Sin embargo, si se combina ambos factores, es decir, tanto el ruido como las limitaciones del ancho de banda, se encuentra un límite a la cantidad de información que se puede transferir por una señal de potencia limitada, aun cuando se utilizan técnicas de codificación de niveles múltiples.

En el canal considerado por el teorema de Shannon-Hartley, el ruido y la señal se suman. Es decir, el receptor mide una señal que sea igual a la suma de la señal que codifica la información deseada y una variable aleatoria continua que represente el ruido. Esta suma crea incertidumbre en cuanto al valor de la señal original.

Si el receptor tiene cierta información sobre el proceso aleatorio que genera el ruido, se puede, en principio, recuperar la información de la señal original considerando todos los posibles estados del proceso del ruido. En el caso del teorema de Shannon-Hartley, se asume que el ruido es generado por un proceso gaussiano con una varianza conocida. Puesto que la varianza del proceso gaussiano es equivalente a su potencia, normalmente se llama a esta varianza la potencia de ruido.

Tal canal es llamado canal aditivo del ruido blanco gaussiano, porque el ruido gaussiano es añadido a la señal; blanco significa igual cantidad de ruido en todas las frecuencias dentro del ancho de banda del canal.

# Capacidad del canal

La capacidad del canal (para canales discretos, ya que en este informe no se hablará de canales continuos) es la máxima tasa de información (medida en bits por símbolo) que se puede transmitir de manera confiable a través de un canal de comunicación, es decir, con un error arbitrariamente pequeño. Está basada en la Teoría de la Información de Claude Shannon que se explicará más adelante.

Formalmente, la capacidad C de un canal discreto está definida como:

donde:

* I(X;Y) es la información mutua entre las variables aleatorias X (señal transmitida) y Y (señal recibida), que mide la cantidad de información compartida entre X e Y, es decir, la reducción de incertidumbre sobre Y dada X.
* pX(x) es la distribución de probabilidad de las señales transmitidas X, que se selecciona para maximizar la información mutua.
* Donde el máximo se toma sobre todas las posibles distribuciones p(si) en la fuente.

La magnitud C se interpreta como la cantidad de información promedio más grande que puede ser transmitida por el canal de comunicación CH.

En resumen, la capacidad de un canal discreto es la tasa de transmisión de datos más alta que el canal puede soportar, tomando en cuenta las características del canal y el ruido, de manera que los datos puedan ser recuperados con un error mínimo o nulo.

## Tipos de canales

A continuación se enumeran los diferentes canales que existen:

Canal ideal: debería tener una entrada y una salida. Sin embargo, nunca está aislado totalmente del exterior y siempre se acaban introduciendo señales no deseadas que alteran en mayor o menor medida los datos que se quieren enviar a través de él. Por lo tanto, esa única entrada puede producir varias salidas, y distintas entradas pueden terminar en la misma salida.

Canal discreto sin memoria: con entrada y salida discreta. Ofrecen una salida que depende exclusivamente del símbolo de entrada actual, independientemente de sus valores anteriores.

Canal binario simétrico: canal binario que puede transmitir uno de dos símbolos posibles (0 y 1). La transmisión no es perfecta, y ocasionalmente el receptor recibe el bit equivocado.

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Ilustración

# Eficiencia del canal

La eficiencia E de un canal de comunicación, es la relación entre su capacidad y su ancho de banda, e indica el número de bits por segundo de información que se puede transmitir por cada herzio de su ancho de banda:

E = C / B (bps/Hz)

La eficiencia de un canal está establecida por el número máximo de estados distintos que puede adoptar la señal que se transmite por él para codificar la información. La capacidad de un canal de ancho de banda determinado podría elevarse a infinito utilizando señales con un número infinito de niveles. Pero esto solo se puede obtener con un canal ideal, sin ruidos ni distorsión alguna, los cuales no existen en el mundo real. Por tanto, el número de estados posibles está limitado por la sensibilidad y la capacidad de resolución del propio receptor para diferenciar entre niveles contiguos de la señal que recibe junto con el ruido.

Todo canal de comunicaciones, en la práctica se verá afectado por el ruido electromagnético, limitándose de esta forma la capacidad de un canal para transmitir información.

Es lógico pensar que a medida que aumenta el ruido (N) de un canal disminuye su capacidad de transmisión, ya que el mismo estará usando el espacio del canal que corresponde a la información. Una forma de ponderar esta circunstancia es cuantificar la relación S/N es decir la relación señal a ruido, también conocida como NSR. La ecuación que los relaciona corresponde a la primera ley de Shannon y dice:

C = B log2( 1 + S / N )

Dónde:

* C es la capacidad máxima del canal en bps.
* B es el ancho de banda del canal medido en Hertz.
* S/N representa la relación señal / ruido medido en veces.

Por ejemplo si se supone un canal telefónico donde B = 4000Hz; S/N = 1000 se tendrá que 40000bps es la máxima capacidad posible de este canal. Si bien de la expresión se puede inferir que aumentando la potencia de la señal transmitida (S) y el ancho de banda utilizable (B) o disminuyendo la potencia de ruido (N) se mejoraría la capacidad del canal, estas soluciones podrían resultar en la mayoría de los casos físicamente irrealizables o económicamente prohibitivas.

# Eficiencia espectral

El concepto de eficiencia espectral es importante en sistemas de radio digitales contrastantes. La eficiencia espectral tiene su origen en el teorema de Shannon, que expresa la capacidad portadora de información de un canal como:

C^ = Bc . log2(1 + SNR)

Donde C^ es la capacidad en unidades de bits por segundo (bit/s), Bc es el ancho de banda del canal en hercios, y SNR es la relación señal/ruido. N se supone que es ruido gaussiano, por lo que la interferencia que se puede aproximar como gaussiana se puede incorporar agregando las potencias de ruido e interferencia, y entonces es más apropiado usar la SIR. Así la ecuación de arriba se convierte en

C^ = Bc . log2[ 1 + S / (N + I) ] = Bc . log2(1 + SIR)

El teorema de Shannon es ampliamente aceptado como el límite superior en la capacidad de transporte de información de un canal. Entonces, cuanto más fuerte sea la señal, o cuanto menor sea la señal interferente, mayor será la capacidad de transporte de información de un canal. En efecto, si no hay ruido ni interferencia, la capacidad de transporte de información es infinita. La fórmula de capacidad de Shannon indica que aumentar el nivel de interferencia (menor SIR) tiene un efecto más debilitado en la disminución de la capacidad de lo que inicialmente se puede esperar; es decir, duplicar el nivel de interferencia no se reduce a la mitad C^. Esta es la visión conceptual que apoya el uso de celdas estrechamente empaquetadas y la reutilización de frecuencias, ya que el aumento resultante en la interferencia, y su efecto moderado en la capacidad, se compensa al tener más celdas y dar soporte a más usuarios.

No se ha alcanzado el límite de capacidad de carga de Shannon, pero los sistemas de radio de hoy están muy cerca. Los sistemas actuales operan con SNR a solo unos decibelios alejados del límite. Diferentes esquemas de modulación y radio se acercan al límite, y aquí se introducirán dos cantidades para describir el desempeño de diferentes esquemas. A partir de la fórmula de capacidad, se puede definir una métrica útil para el desempeño de esquemas de modulación. Esta es la eficiencia de modulación (también conocida como la eficiencia del canal, la eficiencia del espectro del canal y la eficiencia espectral del canal),

ηc = Rc / Bc

donde Rc (bit/s) es la velocidad de bits transmitida en el canal. El resultado, ηc​, tiene unidades de bit/s/Hz, lo que significa que describe cuántos bits por segundo pueden transmitirse por cada hercio de ancho de banda disponible. Esta métrica es clave para evaluar la eficiencia del uso del espectro en diferentes esquemas de modulación.

Entonces, resumiendo, la definición de eficiencia espectral es la eficiencia del espectro de canal (también conocida como la eficiencia de modulación) ηc, que caracteriza la eficiencia de un esquema de modulación.

# Asignación de capacidad en canales físicos y redes

La asignación de capacidad en canales físicos y redes es un aspecto fundamental en la comunicación de datos, ya que determina la eficiencia y efectividad con las que se transmiten la información y los recursos disponibles.

**Canales Físicos**: Son los medios a través de los cuales se transmiten datos. Pueden ser cables de cobre, fibra óptica, ondas de radio, etc. Cada tipo de canal tiene una capacidad limitada, conocida como ancho de banda, que define la cantidad de datos que se pueden transmitir por unidad de tiempo.

**Redes**: Combinan múltiples canales físicos y dispositivos (routers, switches, etc.) para permitir la comunicación entre diferentes nodos. Las redes pueden ser LAN (Local Area Network), WAN (Wide Area Network), etc.

## Asignación de Capacidad

La asignación de capacidad implica distribuir eficientemente los recursos disponibles para maximizar el rendimiento de la red. Esto se puede realizar de diversas maneras:

* **Multiplexión**: Técnicas como FDM (Frequency Division Multiplexing), TDM (Time Division Multiplexing) y CDM (Code Division Multiplexing) permiten que múltiples señales compartan el mismo canal físico, maximizando su uso.
* **Quality of Service (QoS)**: Políticas que garantizan el rendimiento adecuado para diferentes tipos de tráfico. Por ejemplo, el tráfico de voz puede tener prioridad sobre el tráfico de datos, asegurando que las llamadas se mantengan claras y sin interrupciones.
* **Control de Congestión**: Métodos para regular el flujo de datos y evitar la saturación de la red, lo que podría resultar en pérdida de paquetes o retrasos. Protocolos como TCP incluyen mecanismos para el control de congestión.

### Técnicas de acceso múltiple

Para que varios dispositivos puedan compartir un mismo canal de comunicación sin interferir entre sí, se utilizan diferentes técnicas de acceso múltiple. Estas técnicas se basan en diferentes estrategias para dividir el canal en subcanales virtuales, permitiendo que cada dispositivo tenga su propio espacio dentro del canal compartido.

#### Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA):

En TDMA, el canal se divide en intervalos de tiempo. Cada dispositivo tiene asignado un intervalo de tiempo específico durante el cual puede transmitir datos.

Mientras un dispositivo está transmitiendo, los demás permanecen en silencio. Este método es eficiente para canales con un tráfico bajo, ya que cada dispositivo puede aprovechar al máximo su intervalo de tiempo.

#### Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA):

En FDMA, el canal se divide en diferentes bandas de frecuencia. Cada dispositivo tiene asignada una banda de frecuencia específica para transmitir y recibir datos. Este método es útil para canales con un tráfico alto, ya que permite que varios dispositivos transmitan simultáneamente sin interferir entre sí.

**Principales características**

1. Es un esquema de multicanalización analógico que consiste en amontonar dos o más canales independientes uno al lado del otro en el dominio de la frecuencia y después modulando una portadora de alta frecuencia.
2. Se aplica a sistemas de radio.
3. Requiere de una estación base para controlar su funcionamiento.
4. El ancho de banda total se divide en varias sub-bandas de frecuencias o canales.
5. Una vez se asigna el canal, se utiliza durante todo el periodo de transmisión de la trama.
6. Los canales se asignan por demanda mediante un canal de señalización.
7. No es una forma eficiente para compartir recursos radioeléctricos limitados en un sistema móvil público.

#### Acceso Múltiple por División de Código (CDMA):

En CDMA, los datos de cada dispositivo se codifican con una secuencia única de código. Todos los dispositivos pueden transmitir simultáneamente en la misma banda de frecuencia, pero el receptor solo decodifica los datos que corresponden a su código específico. Este método es muy eficiente para canales con un tráfico alto, ya que permite que varios dispositivos transmitan simultáneamente sin interferir entre sí.

#### Acceso Múltiple por División de Espacio (SDMA):

En SDMA, los dispositivos se dividen en diferentes zonas o celdas. Cada celda tiene su propia frecuencia o código único, lo que permite que los dispositivos en diferentes celdas transmitan simultáneamente sin interferir entre sí. Este método es útil para redes celulares, donde los dispositivos se encuentran en diferentes ubicaciones geográficas.

**Ventajas del acceso múltiple:**

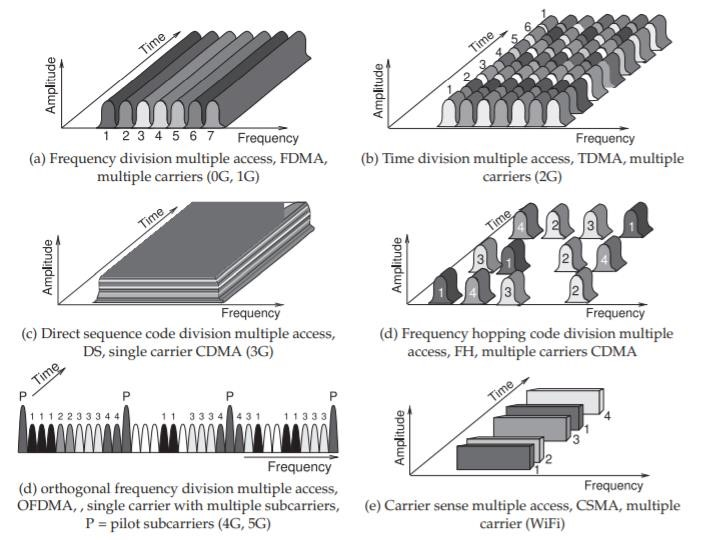
Las redes de acceso múltiple ofrecen una serie de ventajas, incluyendo:

* **Mayor eficiencia**: Al compartir el mismo canal, se reduce la cantidad de infraestructura necesaria, lo que permite que más dispositivos se conecten a la red.
* **Mayor capacidad**: Las técnicas de acceso múltiple permiten que varios dispositivos transmitan y reciban datos simultáneamente, lo que aumenta la capacidad de la red.
* **Mayor flexibilidad**: Las redes de acceso múltiple permiten que los dispositivos se conecten y desconecten de la red de forma dinámica, lo que aumenta la flexibilidad de la red.
* **Mayor resistencia a la interferencia**: Las técnicas de acceso múltiple, como CDMA, son muy robustas y resistentes a la interferencia, lo que garantiza una conexión fiable.

**Desventajas del acceso múltiple:**

A pesar de sus numerosas ventajas, las redes de acceso múltiple también tienen algunas desventajas:

* **Interferencias**: En algunos casos, puede haber interferencias entre los dispositivos que comparten el mismo canal, lo que puede afectar la calidad de la señal.
* **Complejidad**: Estas técnicas pueden ser complejas de implementar y requieren un hardware y software especializado.
* **Limitaciones de rendimiento**: El rendimiento de la red puede verse afectado si hay demasiados dispositivos que comparten el mismo canal.



Ilustración

Esquemas de acceso múltiple para soportar múltiples usuarios con cada usuario indicado por un número excepto para (b) TDMA, donde los números indican intervalos de tiempo.

### QoS (Quality of Service):

La calidad de servicio (QoS) es el uso de mecanismos o tecnologías que funcionan en una red para controlar el tráfico y garantizar el rendimiento de aplicaciones críticas con capacidad de red limitada. Permite a las organizaciones ajustar su [tráfico de red](https://www.fortinet.com/lat/resources/cyberglossary/network-traffic) general al priorizar aplicaciones específicas de alto rendimiento.

La QoS generalmente se aplica a redes que transportan tráfico para sistemas con uso intensivo de recursos. Los servicios comunes para los que se requiere incluyen televisión por protocolo de Internet (IPTV), juegos en línea, medios de transmisión, videoconferencias, video a pedido (VOD) y voz sobre IP (VoIP).

Al utilizar QoS en redes, las organizaciones tienen la capacidad de optimizar el rendimiento de múltiples aplicaciones en su red y obtener visibilidad de la velocidad de bits, el retraso, la fluctuación y la velocidad de paquetes de su red. Esto garantiza que puedan diseñar el tráfico en su red y cambiar la forma en que los paquetes se enrutan a Internet u otras redes para evitar demoras en la transmisión. También garantiza que la organización logre la calidad de servicio esperada para las aplicaciones y brinde las experiencias de usuario esperadas.



Ilustración

La asignación de capacidad debe minimizar la interferencia entre usuarios. Las técnicas de optimización se centran en cómo minimizar esta interferencia. La optimización de la capacidad del canal también debe considerar la calidad de servicio (QoS) para garantizar que los usuarios reciban un nivel aceptable de rendimiento.

#### Métricas de calidad de servicio (QoS) en redes

1. **Ancho de banda:** la velocidad de un enlace. QoS puede indicar a un enrutador cómo usar el ancho de banda. Por ejemplo, asignar una cierta cantidad de ancho de banda a diferentes colas para diferentes tipos de tráfico.
2. **Demora:** el tiempo que tarda un paquete en pasar de su origen a su destino final. Esto a menudo puede verse afectado por un retraso en la cola, que ocurre durante los tiempos de congestión y un paquete espera en una cola antes de ser transmitido. QoS permite a las organizaciones evitar esto creando una cola de prioridad para ciertos tipos de tráfico.
3. **Pérdida:**la cantidad de datos perdidos como resultado de la pérdida de paquetes, que generalmente ocurre debido a la congestión de la red. La QoS permite a las organizaciones decidir qué paquetes dejar caer en este evento.
4. **Fluctuación:** velocidad irregular de los paquetes en una red como resultado de la congestión, lo que puede dar lugar a la llegada tardía y fuera de secuencia de los paquetes. Esto puede causar distorsión o brechas en el audio y video que se entrega.

#### Técnicas

Existen varias técnicas que las empresas pueden utilizar para garantizar el alto rendimiento de sus aplicaciones más críticas. Estos incluyen:

* **Priorización del tráfico de VoIP sensible al retraso a través de enrutadores y conmutadores:** Muchas redes empresariales pueden estar demasiado congestionadas, lo que permite que los enrutadores y los conmutadores comiencen a dejar caer paquetes a medida que entran y salen más rápido de lo que se pueden procesar. Como resultado, las aplicaciones de streaming sufren. La priorización permite que el tráfico se clasifique y reciba diferentes prioridades según su tipo y destino. Esto es particularmente útil en una situación de alta congestión, ya que los paquetes con mayor prioridad pueden enviarse antes que otro tráfico.
* **Reserva de recursos:** El protocolo de reserva de recursos (RSVP) es un protocolo de capa de transporte que reserva recursos a través de una red y se puede utilizar para entregar niveles específicos de calidad de servicio QoS para flujos de datos de aplicaciones. La reserva de recursos permite a las empresas dividir los recursos de red por el tráfico de diferentes tipos y orígenes, definir límites y garantizar el ancho de banda.
* **Cola de espera:**La cola de espera es el proceso de creación de políticas que proporcionan un trato preferencial a ciertos flujos de datos en lugar de otros. Las colas son búferes de memoria de alto rendimiento en enrutadores y conmutadores, en los que los paquetes que pasan se mantienen en áreas de memoria dedicadas. Cuando se asigna una prioridad más alta a un paquete, este se mueve a una cola dedicada que envía datos a una velocidad más rápida, lo que reduce las posibilidades de que se caiga. Por ejemplo, las empresas pueden asignar una política para dar prioridad al tráfico de voz sobre la mayor parte del ancho de banda de la red. El dispositivo de enrutamiento o conmutación moverá entonces los paquetes y tramas de este tráfico al frente de la cola y los transmitirá inmediatamente.
* **Marcado de tráfico:** Cuando se han identificado aplicaciones que requieren prioridad sobre otro ancho de banda en una red, se debe marcar el tráfico. Esto es posible a través de procesos como Clase de servicio (CoS), que marca un flujo de datos en el encabezado de trama de capa 2 y Punto de código de servicios diferenciados (DSCP), que marca un flujo de datos en el encabezado de paquete de capa 3.

#### Mejores prácticas

Además de estas técnicas, también existen varias prácticas mejores que las organizaciones deben tener en cuenta al [determinar sus requisitos de QoS.](https://docs.fortinet.com/document/fortigate/6.2.0/cookbook/67342/determining-your-qos-requirements)

* Asegurarse de que los límites máximos de ancho de banda en la interfaz de origen y la política de seguridad no estén demasiado bajos para evitar el descarte excesivo de paquetes.
* Considerar la proporción en la que los paquetes se distribuyen entre las colas disponibles y las colas que utilizan los servicios. Esto puede afectar los niveles de latencia, la distribución de colas y la asignación de paquetes.
* Colocar garantías de ancho de banda únicamente en servicios específicos. Esto evitará la posibilidad de que todo el tráfico utilice la misma cola en situaciones de alto volumen.
* Configurar la priorización para todo el tráfico a través de cualquier tipo de prioridad basada en el servicio o prioridad de política de seguridad, no ambos. Esto simplificará el análisis y la resolución de problemas.
* Intentar minimizar la complejidad de la configuración de QoS para garantizar un alto rendimiento.
* Para obtener resultados de comprobación precisos, utilizar el Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP) y no sobrepasar la capacidad de proceso de ancho de banda.

#### Ventajas

La implementación de la calidad de servicio QoS es crucial para las empresas que desean garantizar la disponibilidad de sus aplicaciones críticas para la empresa. Es vital para ofrecer un ancho de banda diferenciado y garantizar que la transmisión de datos se lleve a cabo sin interrumpir el flujo de tráfico ni causar pérdidas de paquetes. Las principales ventajas de implementar QoS incluyen:

* **Priorización de aplicaciones sin límites:** QoS garantiza que las aplicaciones de misión crítica de las empresas siempre tendrán prioridad y los recursos necesarios para lograr un alto rendimiento.
* **Mejor gestión de recursos:**QoS permite a los administradores administrar mejor los recursos de Internet de la organización. Esto también reduce los costos y la necesidad de inversiones en expansiones de enlaces.
* **Experiencia del usuario mejorada:**El objetivo final de la QoS es garantizar el alto rendimiento de las aplicaciones críticas, lo que se reduce a ofrecer una experiencia de usuario óptima. Los empleados disfrutan de un alto rendimiento en sus aplicaciones de alto ancho de banda, lo que les permite ser más efectivos y hacer su trabajo más rápidamente.
* **Administración de tráfico punto a punto:**Administrar una red es vital independientemente de cómo se entregue el tráfico, ya sea de extremo a extremo, de nodo a nodo o de punto a punto. Esta última permite a las organizaciones entregar paquetes de clientes en orden de un punto a otro a través de Internet sin sufrir ninguna pérdida de paquetes.
* **Prevención de pérdida de paquetes:**La pérdida de paquetes puede ocurrir cuando los paquetes de datos se caen en tránsito entre redes. Esto a menudo puede deberse a una falla o ineficiencia, congestión de la red, un enrutador defectuoso, una conexión suelta o una señal deficiente. QoS evita la posibilidad de pérdida de paquetes al priorizar el ancho de banda de las aplicaciones de alto rendimiento.
* **Reducción de la latencia:** La latencia es el tiempo que tarda una solicitud de red en pasar del remitente al receptor y lo que tarda el receptor en procesarla. Esto generalmente se ve afectado por los enrutadores que tardan más tiempo en analizar la información y las demoras de almacenamiento causadas por los conmutadores y puentes intermedios. QoS permite a las organizaciones reducir la latencia o acelerar el proceso de una solicitud de red al priorizar su aplicación crítica.

### Control de congestión

Antes de comprender qué es el control de congestión, se debe conocer qué significa la congestión de una red. Así pues, esta es definida como un estado de los sistemas ocurrido en la capa de red, en las situaciones en las que el tráfico de mensajes aumenta tanto que ralentiza los tiempos de respuesta normales de una red determinada.

La congestión de una red también trae consigo otros efectos negativos en los sistemas, como, por ejemplo, que el retraso de respuesta impacte directamente sobre el rendimiento, llegando, en las peores circunstancias, a ser el causante de una retransmisión. Es por esto queresulta necesario un mecanismo a cargo de manejar adecuadamente la congestión de la red.

El control de congestión de red se define como una metodología encargada del manejo de la entrada de los paquetes de datos a la red**,** por lo que contribuye a utilizar la infraestructura compartida de red, al tiempo que impide una congestión de red en el sistema.

De la misma manera, un control de congestión se enfoca en ordenar el sistema de tráfico, compartiendo el ancho de banda entre los clientes que lo requiera. Todo esto de manera organizada para poder garantizar que todos tengan una buena experiencia y que se le dé respuesta a una solicitud o petición.

#### Características del control de congestión

El control de congestión de red incluye una serie de propiedades y elementos característicos, dentro de los que destaca su capacidad para identificar maneras en las que el tráfico usa la red eficientemente**.**

De igual modo, es importante reconocer que el control de congestión se lleva a cabo con el objetivo deevitar y responder a las sobrecargas de red que puedan presentarse y que pueden ocasionar pérdidas de paquetes de datos e información.

Otra de las características del control de congestión, es que hace uso de los llamados Algoritmos que Evitan la Congestión (CAA) con el objetivo de prevenir el colapso causado por la congestión de una red. Estos algoritmos son implementados en la capa TCP o capa de transporte de red, es decir, donde se aseguran que los paquetes de datos se trasladen secuencialmente y sin fallos (control de congestión TCP).

Algunos de los beneficios de la implementación del control de congestión son que mejora el rendimiento al evitar la congestión, las redes pueden funcionar a velocidades óptimas; mantiene la disponibilidad, el control de congestión evita bloqueos que podrían dejar la red inaccesible; y optimiza los recursos, permite un uso más eficiente de la infraestructura de red.

**¿Por qué es crucial el control de congestión?**

La congestión de red puede tener consecuencias significativas, como:

* Rendimiento Degradado: Las velocidades de transferencia más lentas y los tiempos de respuesta prolongados pueden afectar la experiencia del usuario.
* Pérdida de Datos: En casos extremos, la congestión puede provocar la pérdida de datos críticos.
* Desgaste de Recursos: La saturación de la red puede agotar los recursos, lo que resulta en una experiencia degradada para todos los usuarios.

# Optimización y algoritmos para la asignación de capacidad

## Algoritmos de asignación de capacidad

### Algoritmos de asignación estática

Estos algoritmos distribuyen los recursos de forma fija y no cambian en función de la demanda. Por ejemplo, en redes de telecomunicaciones donde el número de conexiones es predecible, los recursos se asignan de manera constante. Algunos de estos son TDMA, SDMA, CDMA o FDMA que fueron mencionados anteriormente.

### Algoritmos de asignación dinámica

Este tipo de algoritmos ajusta la asignación de recursos en tiempo real, dependiendo de las fluctuaciones en la demanda de usuarios o tráfico de datos. Son más complejos, pero permiten una utilización más eficiente de los recursos. Por ejemplo, la versión dinámicas de los algoritmos de asignación estáticos (DTDMA, DFDMA o DCMA) o Asignación de Acceso Múltiple bajo Demanda (DAMA).

Esta última, es una tecnología utilizada para asignar un canal a clientes que no necesitan usarlo de manera constante. Los sistemas DAMA asignan canales de comunicación basados en solicitudes emitidas desde terminales de usuario a un sistema de seguridad de red. Cuando el canal ya no se usa, los canales son devueltos a la reserva central para ser reasignados a otros usuarios.

Los canales suelen ser un par de frecuencias portadoras (una para transmitir y otra para recibir), pero también pueden ser otros recursos de ancho de banda fijo, como ranuras de tiempo en un plan de ráfaga TDMA o incluso canales de línea física compartidos. Una vez que un canal se asigna a un par específico de nodos, no está disponible para otros usuarios de la red hasta que su sesión finalice.

DAMA permite que un canal (frecuencia de radio o de banda base, ranura de tiempo, etc.) sea utilizado por muchos usuarios secuencialmente en diferentes momentos. Esta tecnología es especialmente útil en redes con clientes transitorios que usan el sistema de forma esporádica, a diferencia de PAMA (Acceso Múltiple Asignado Permanente). Al usar la tecnología DAMA, el número de nodos que pueden utilizar un conjunto limitado de canales aumenta significativamente, pero a costa de no poder proporcionar acceso simultáneo para todos los posibles pares de nodos. Una red DAMA de cinco canales solo puede tener cinco conversaciones simultáneas, pero podría tener cualquier número de nodos. Una red PAMA de cinco canales admite permanentemente cinco conversaciones simultáneas, con la propiedad del canal permaneciendo con sus nodos asignados de manera permanente, incluso cuando están inactivos.

DAMA y PAMA están relacionados únicamente con la asignación de canales/recursos y no deben confundirse con los métodos de acceso múltiple/multiplexación (como frecuencias FDMA, ranuras TDMA, códigos CDMA u otros) destinados a dividir un solo canal de comunicación en múltiples canales virtuales. Estos sistemas suelen usar protocolos de asignación de recursos que permiten una asignación rápida (aunque a menudo menos determinista, considerando las colisiones en CDMA) casi en tiempo real de ancho de banda basado en la demanda y la prioridad de los datos. Sin embargo, en canales de acceso múltiple escasamente asignados, DAMA puede usarse para asignar los recursos de canal virtual proporcionados por el canal de acceso múltiple. Esto es más común en entornos con una utilización lo suficientemente esporádica que no se necesita agregar complejidad solo para recuperar los periodos de inactividad entre conversaciones.

DAMA se usa ampliamente en comunicaciones satelitales, especialmente en sistemas VSAT. Es muy efectivo en entornos que comprenden múltiples usuarios, cada uno con un perfil de uso bajo a moderado.

### Algoritmos basados en programación lineal y entera

Métodos como la programación lineal (PL) o la programación entera (PE) pueden utilizarse para resolver problemas de asignación de recursos en redes de telecomunicaciones. Se utilizan para resolver problemas de optimización, donde se busca maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones. Ambos enfoques son ampliamente utilizados en áreas como logística, telecomunicaciones, planificación de redes y asignación de recursos.

Estas son técnicas de optimización matemática, son esenciales para asignar la capacidad del canal de forma eficiente, maximizando el uso de los recursos disponibles (ancho de banda, potencia, etc.) mientras se minimizan las interferencias. Investiga sobre algoritmos de optimización convexa y algoritmos heurísticos (como búsqueda local, algoritmos genéticos, y optimización por enjambre de partículas).

#### Algoritmos de Programación Lineal (PL)

La programación lineal se refiere a problemas de optimización donde la función objetivo y las restricciones son lineales. Se busca encontrar el valor óptimo de las variables continuas que maximicen o minimicen la función objetivo, cumpliendo las restricciones.

Algoritmos más comunes:

##### Método Simplex:

El algoritmo Simplex es uno de los más utilizados para resolver problemas de programación lineal. Busca soluciones viables al problema moviéndose a lo largo de los vértices del conjunto de soluciones factibles (poliedro) hasta alcanzar el óptimo.

Ventajas: Funciona muy bien en la práctica para la mayoría de los problemas y es eficiente para problemas grandes.

Desventajas: En algunos casos, puede ser lento, especialmente en problemas degenerados.

##### Método de Puntos Interiores:

Es una alternativa al Simplex y no se mueve por los vértices del conjunto de soluciones factibles, sino que sigue un camino dentro del poliedro. Está basado en la teoría de la dualidad de la programación lineal.

Ventajas: Tiene buen desempeño en problemas de gran escala y en algunos casos puede ser más rápido que Simplex.

Desventajas: Es más complicado en términos de implementación y comprensión.

##### Método de Dualidad:

Se basa en resolver el problema dual asociado al problema de programación lineal original. En algunos casos, es más eficiente resolver el dual en lugar del problema primal.

Ventajas: Ofrece información valiosa sobre la estructura del problema original y puede ser más eficiente en ciertos casos.

Desventajas: Requiere formular el problema dual, lo que puede no ser intuitivo para todos los problemas.

#### Algoritmos de Programación Entera (PE)

La programación entera es una extensión de la programación lineal, donde algunas o todas las variables de decisión están restringidas a tomar valores enteros. Esto es útil cuando las soluciones deben ser discretas, como en el caso de asignar tareas, planificar horarios o distribuir recursos indivisibles.

Algoritmos más comunes:

##### Método de Ramificación y Acotación (Branch and Bound):

Este algoritmo descompone el problema en subproblemas más pequeños, que son más fáciles de resolver, y utiliza técnicas de acotación para evitar explorar ramas que no pueden contener soluciones óptimas. Comienza resolviendo una relajación continua del problema, luego explora las soluciones fraccionarias generadas y decide si seguir explorando.

Ventajas: Es flexible y puede manejar problemas grandes. También puede ser aplicado en combinación con otros métodos.

Desventajas: Puede ser lento para problemas complejos debido al crecimiento exponencial del árbol de decisiones.

##### Método de Ramificación y Corte (Branch and Cut):

Este es un refinamiento del método de ramificación y acotación. Integra técnicas de generación de cortes (inequaciones adicionales) para mejorar la relajación del problema y reducir el número de nodos en el árbol de búsqueda.

Ventajas: Es muy efectivo para problemas de programación entera grande y se utiliza en solvers comerciales de alto rendimiento como CPLEX.

Desventajas: Requiere técnicas avanzadas de generación de cortes, lo que lo hace más complejo de implementar.

##### Método de Planificación Dinámica Entera:

La planificación dinámica divide un problema en subproblemas más pequeños que se resuelven recursivamente. Para problemas de programación entera, puede utilizarse para resolver algunos tipos específicos de problemas donde hay una estructura secuencial, como la optimización de inventarios o cadenas de producción.

Ventajas: Funciona bien para problemas con estructura especial y es fácil de implementar para problemas pequeños.

Desventajas: Es difícil de aplicar a problemas grandes o con muchas variables de decisión enteras.

##### Método de Planificación por Columnas (Column Generation):

Es un enfoque utilizado en problemas de programación lineal y entera de gran tamaño, como la optimización de rutas o la planificación de recursos. Divide el problema en un problema maestro y subproblemas, donde se generan columnas (variables) que se añaden de manera iterativa al problema maestro.

Ventajas: Permite resolver problemas extremadamente grandes de forma más eficiente que con métodos estándar.

Desventajas: Complejo de implementar y requiere una comprensión profunda del problema.

#### Algoritmos Híbridos de Programación Lineal y Entera

Algunos problemas requieren una combinación de programación lineal y entera, en los que parte de las variables son continuas y otras enteras. Los métodos comunes para resolver estos problemas incluyen:

##### Método de Descomposición de Benders

Divide el problema original en dos problemas más pequeños: uno que contiene las variables enteras y otro con las variables continuas. Se resuelven de manera iterativa hasta alcanzar una solución óptima.

Ventajas: Eficaz para problemas grandes y estructurados, donde las variables enteras tienen un papel importante.

Desventajas: Requiere dividir el problema de manera adecuada, lo cual no siempre es fácil de realizar.

##### Métodos Metaheurísticos

Son técnicas de búsqueda aproximada que, aunque no garantizan encontrar el óptimo global, pueden encontrar buenas soluciones en problemas complejos. Se usan comúnmente en combinación con técnicas de programación entera para encontrar soluciones rápidamente cuando los métodos exactos son demasiado lentos.

Ventajas: Son útiles cuando los algoritmos exactos no son viables o son demasiado lentos.

Desventajas: No garantizan encontrar la solución óptima y pueden requerir un ajuste fino de los parámetros.

## Asignación de espectro

La asignación de espectro en un canal de comunicación es un proceso clave para garantizar el uso eficiente y efectivo de las frecuencias de radio o ancho de banda disponibles. Sirve para distribuir y gestionar el recurso limitado del espectro electromagnético entre los diferentes usuarios o dispositivos que comparten el mismo medio de comunicación.

**Esquemas de reutilización de frecuencia**: Estos esquemas permiten que diferentes usuarios o celdas reutilicen el espectro en áreas no contiguas para maximizar la capacidad del canal.

**Asignación de espectro en 5G**: Las redes 5G implementan técnicas avanzadas de asignación de espectro utilizando multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) y beamforming para optimizar la capacidad.

**Asignación cognitiva de espectro**: Es una técnica donde los sistemas de radio cognitivos detectan automáticamente las frecuencias libres y asignan dinámicamente el espectro de manera más eficiente.

# Conclusión

La asignación eficiente de la capacidad en los canales de comunicación es esencial para garantizar el máximo rendimiento en la transmisión de información, especialmente en un contexto donde las redes enfrentan un crecimiento exponencial en la demanda de ancho de banda. A través del estudio de la *Teoría de la Información* de Claude Shannon, se han establecido los límites teóricos de transmisión de datos, considerando factores como el ruido y el ancho de banda, lo cual ha permitido desarrollar estrategias para acercarse al máximo rendimiento teórico de un canal.

Las técnicas de acceso múltiple, como TDMA, FDMA y CDMA, junto con los algoritmos de asignación de capacidad, tanto estáticos como dinámicos, proporcionan las herramientas necesarias para gestionar de manera eficiente los recursos en redes modernas. Además, la implementación de mecanismos de *Quality of Service* (QoS) y control de congestión es fundamental para priorizar tráfico crítico, reducir la pérdida de paquetes y asegurar una experiencia de usuario óptima.

# Cuestionario

**¿Qué es la capacidad de un canal?**

La capacidad de un canal es la máxima cantidad de información que se puede transmitir de manera confiable a través de un canal de comunicación, medida en bits por segundo (bps). Está determinada por factores como el ancho de banda y la relación señal-ruido (SNR).

**¿Cuál es el aporte fundamental de Claude Shannon a la teoría de la información?**

Claude Shannon desarrolló la teoría de la información, introduciendo conceptos clave como la entropía (medida de la incertidumbre), el teorema de codificación de canal y la capacidad del canal, estableciendo los límites teóricos para la transmisión de datos en canales con ruido.

**¿Qué establece el Teorema de Shannon-Hartley?**

El Teorema de Shannon-Hartley describe la capacidad máxima de un canal en términos de su ancho de banda y la relación señal-ruido (SNR). Define la cantidad de información que se puede transmitir a través de un canal con ruido de manera confiable.

**¿Qué son los canales discretos y cuál es su capacidad?**

Los canales discretos son aquellos donde las señales transmitidas y recibidas pertenecen a un conjunto finito de valores. Su capacidad es la máxima tasa de información que puede transmitirse con un error arbitrariamente pequeño, basada en la información mutua entre las señales de entrada y salida.

**¿Cómo afecta el ruido a la capacidad de un canal?**

El ruido reduce la capacidad del canal al interferir con la señal transmitida, lo que disminuye la cantidad de información que puede ser recuperada de manera precisa. Cuanto mayor es el ruido, menor es la capacidad de transmisión efectiva del canal.

**¿Qué son las técnicas de acceso múltiple y cuáles son las principales?**

Las técnicas de acceso múltiple permiten que varios dispositivos compartan un mismo canal de comunicación sin interferir entre sí. Las principales técnicas son TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo), FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia), CDMA (Acceso Múltiple por División de Código) y SDMA (Acceso Múltiple por División de Espacio).

**¿Qué es la eficiencia del canal y cómo se calcula?**

La eficiencia del canal es la relación entre la capacidad del canal (C) y su ancho de banda (B). Se calcula como E = C / B, y mide cuántos bits por segundo se pueden transmitir por cada hercio de ancho de banda disponible.

**¿Qué importancia tiene la QoS (Quality of Service) en las redes de comunicación?**

La QoS es fundamental para garantizar que aplicaciones críticas, como las comunicaciones en tiempo real (VoIP, videoconferencias), reciban prioridad en la red, evitando retrasos, pérdida de paquetes y fluctuaciones, lo que asegura una transmisión de datos fluida y eficiente.

**¿Qué son los algoritmos de asignación estática y dinámica de capacidad?**

Los algoritmos de asignación estática distribuyen los recursos de manera fija, sin cambios en función de la demanda, mientras que los algoritmos de asignación dinámica ajustan la asignación de recursos en tiempo real, dependiendo de las fluctuaciones del tráfico o la demanda de usuarios.

**¿Qué es el control de congestión y por qué es crucial en las redes?**

El control de congestión es una técnica que regula el flujo de datos en la red para evitar la saturación de los canales, lo que podría causar retrasos y pérdida de paquetes. Es crucial para mantener el rendimiento óptimo de la red y garantizar una buena experiencia para los usuarios.

# Bibliografía

* <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7024/tesis471.pdf?sequence=1>
* <https://dia.austral.edu.ar/Teor%C3%ADa_de_la_informaci%C3%B3n_de_Claude_E._Shannon>
* <https://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad_de_canal>
* <https://www.cisinformatica.cat/es/claude-shannon-teoria-de-la-informacion/#:~:text=La%20teor%C3%ADa%20de%20la%20informaci%C3%B3n%20de%20Claude%20Shannon%20se%20basa,en%20su%20estructura%20y%20transmisi%C3%B3n>.
* <https://cooplalonja.com.ar/adsl-acceso-multiple/>
* [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Dise%C3%B1o\_de\_microondas\_y\_RF\_I\_\_Sistemas\_de\_radio\_(Steer)/05%3A\_Sistemas\_de\_RF/5.04%3A\_Esquemas\_de\_ acceso\_m%C3%BAltiple](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Dise%C3%B1o_de_microondas_y_RF_I_-_Sistemas_de_radio_(Steer)/05%3A_Sistemas_de_RF/5.04%3A_Esquemas_de_acceso_m%C3%BAltiple)
* <https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642008000100011>
* <https://www.fortinet.com/lat/resources/cyberglossary/qos-quality-of-service>
* <https://keepcoding.io/blog/que-es-control-de-congestion-de-red/#:~:text=El%20control%20de%20congesti%C3%B3n%20de%20red%20se%20define%20como%20una,de%20red%20en%20el%20sistema>.
* <https://en.wikipedia.org/wiki/Channel_capacity>
* <https://ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/582.pdf>
* <https://static.uvq.edu.ar/mdm/TSD/unidad-05-07.html>
* <https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Dise%C3%B1o_de_microondas_y_RF_I_-_Sistemas_de_radio_(Steer)/05%3A_Sistemas_de_RF/5.05%3A_Eficiencia_del_espectro>
* <https://es.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_Shannon-Hartley>