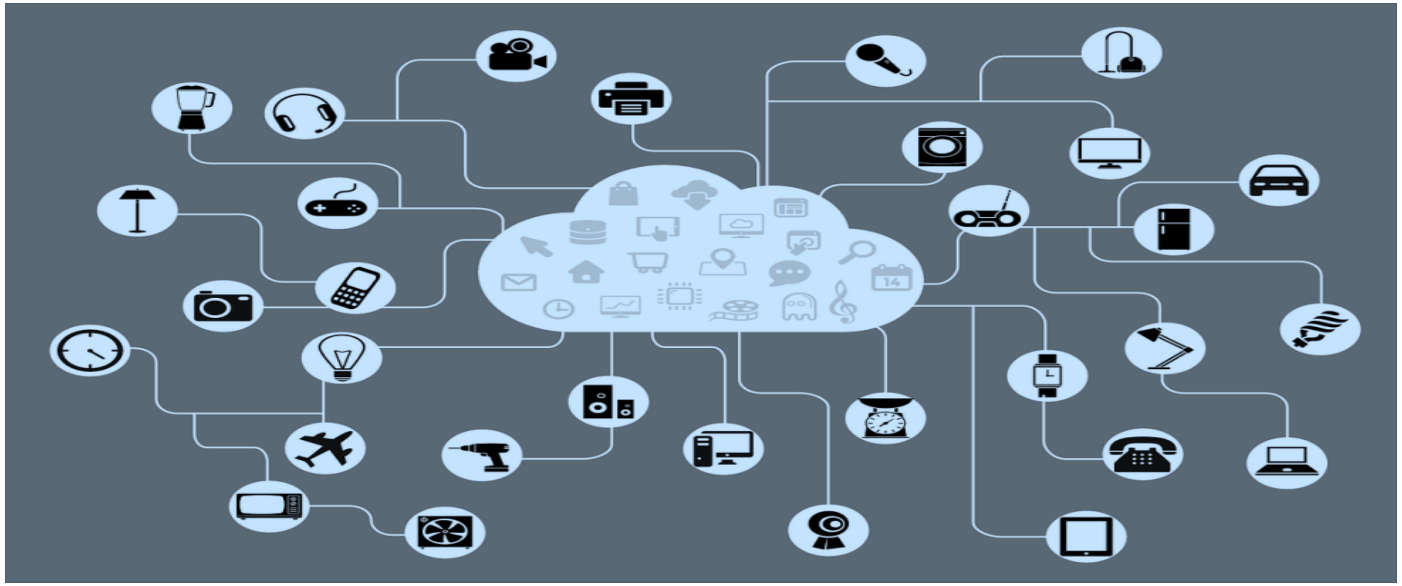
¡Bienvenidas y Bienvenidos!



Teoría de las Comunicaciones (a.k.a. Redes)

Rodrigo Castro - Claudio Righetti

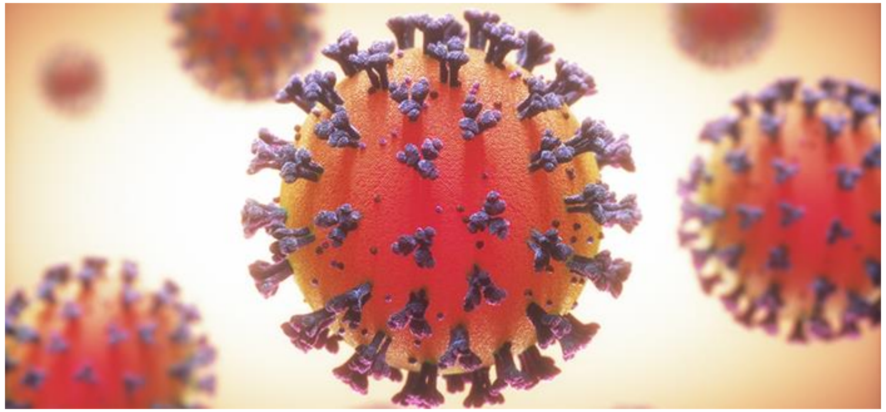
Primer Cuatrimestre

23 de marzo de 2021

Departamento de Computación
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires
Argentina

La materia en modalidad COVID19

- Docentes:
  - Rodrigo, Esteban, Leo, Martín, Paula y Julián.
- Clases: **Cuatrimestre Virtual COVID19**
  - Dada la actual situación de aislamiento social la materia se dictará de manera virtual, usando prioritariamente la herramienta zoom.
- Los horarios serán los habituales de la materia:
  - Teóricas: Martes de 19 a 22 hs.
  - Prácticas: Miércoles de 19 a 22 hs.
- **Por favor les pedimos que lean en detalle este link oficial de FCEyN sobre la herramienta zoom:**
  - https://campus.exactas.uba.ar/course/view.php?id=1916&section=6



zoom

https://zoom.us/

La materia

- Clases:
  - 10 teóricas, 10 prácticas (3 incluyen taller)
- Informes grupales:
  - 3 informes de los talleres
- Parciales: 1 único **Parcial Integrador** al final del cuatrimestre
  - A la semana: Resultados
  - A las 2 semanas: **Recuperatorio** y **Examen de Promoción** (Teoría, 2 o 3 temas)
- Requisitos para Promoción de la Materia
  - Aprobar la 1er. Instancia el Parcial Integrador
  - Tener todos los Informes de Taller aprobados, y con pregunta extra opcional
- Página de la materia:
  - https://campus.exactas.uba.ar/login/index.php

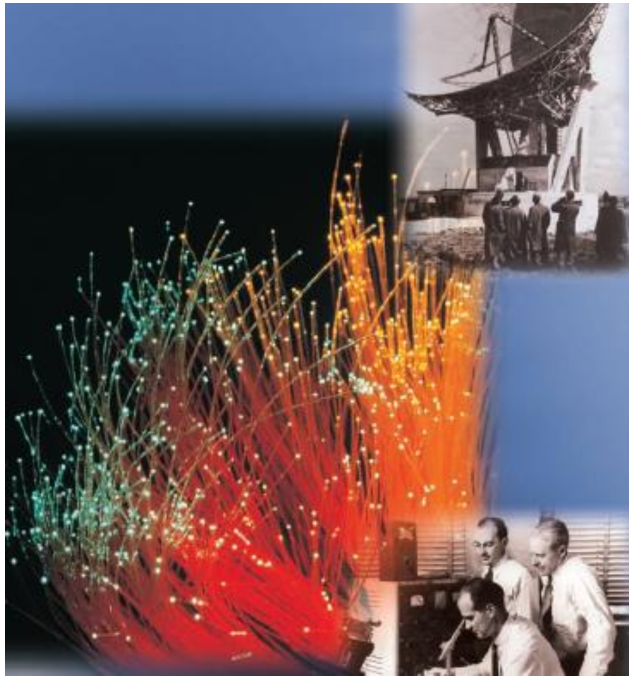
La materia (cont.)

- Listas de mails: **úsenlas!**
  - tdc-alu
  - tdc-doc
  - Dado la modalidad home office, buscaremos respetar las “desconexión digital“
- Modalidad: **Hay que asistir a las teóricas!**
  - No se repiten conceptos de teoría durante la práctica
  - En la teórica hacemos hincapié en cuales temas son de especial interés en el Examen Final o en la modalidad Examen de Promoción
- Encuestas y rol del alumno
  - http://encuestas_finales.exactas.uba.ar/mat/m15108.html
  - **Mirar bien los criterios** de calidad definidos para materias y desempeño docente
  - Acercarse a los docentes **durante la cursada** a plantear casos especiales, conflictos, etc.
    - Podemos ayudar a resolver situaciones especiales solo si las detectamos a tiempo!

La materia (cont.)

- Equidad de género
  - Somos protagonistas de un cambio cultural
  - Involucrarse!
  - Cuenten con los docentes para tratar cualquier tema relacionado
- **Programa GenEx** en Exactas
  - https://exactas.uba.ar/institucional/programa-de-genero/genex-informacion-de-interes/
- El dictado de este cuatrimestre será dedicado a

Rebeca Cherep de Guber (Avellaneda, 2 de julio de 1926-Buenos Aires, 25 de agosto de 2020) fue doctora en matemáticas, docente universitaria y una de las pioneras en el desarrollo de la informática en Argentina.
Entre 1960 y 1966, se desempeñó como Secretaria Técnica del Instituto de Cálculo, en ese momento columna vertebral de la matemática aplicada y de la computación en la UBA, durante la dirección de Manuel Sadosky.
https://www.dc.uba.ar/homenaje-a-una-precursora-de-la-computacion-argentina/



Introducción

Fundamentos

Imagen de la tapa del libro **A Brief History of Communications** IEEE Communications Society
A Fifty Year Foundation for the Future - 1952-2002
https://www.amazon.com/A-Brief-History-of-Communications/dp/0780398254

Agenda

- Introducción: Telegrafía y la red telefónica
- Los dos grandes paradigmas:
  Conmutación de Circuitos vs. Conmutación de Paquetes
- Arquitectura de Redes: Modelo de Referencia OSI-ISO y TCP/IP
- Los dominios del Tiempo y de las Frecuencias
- Teoría de la Información

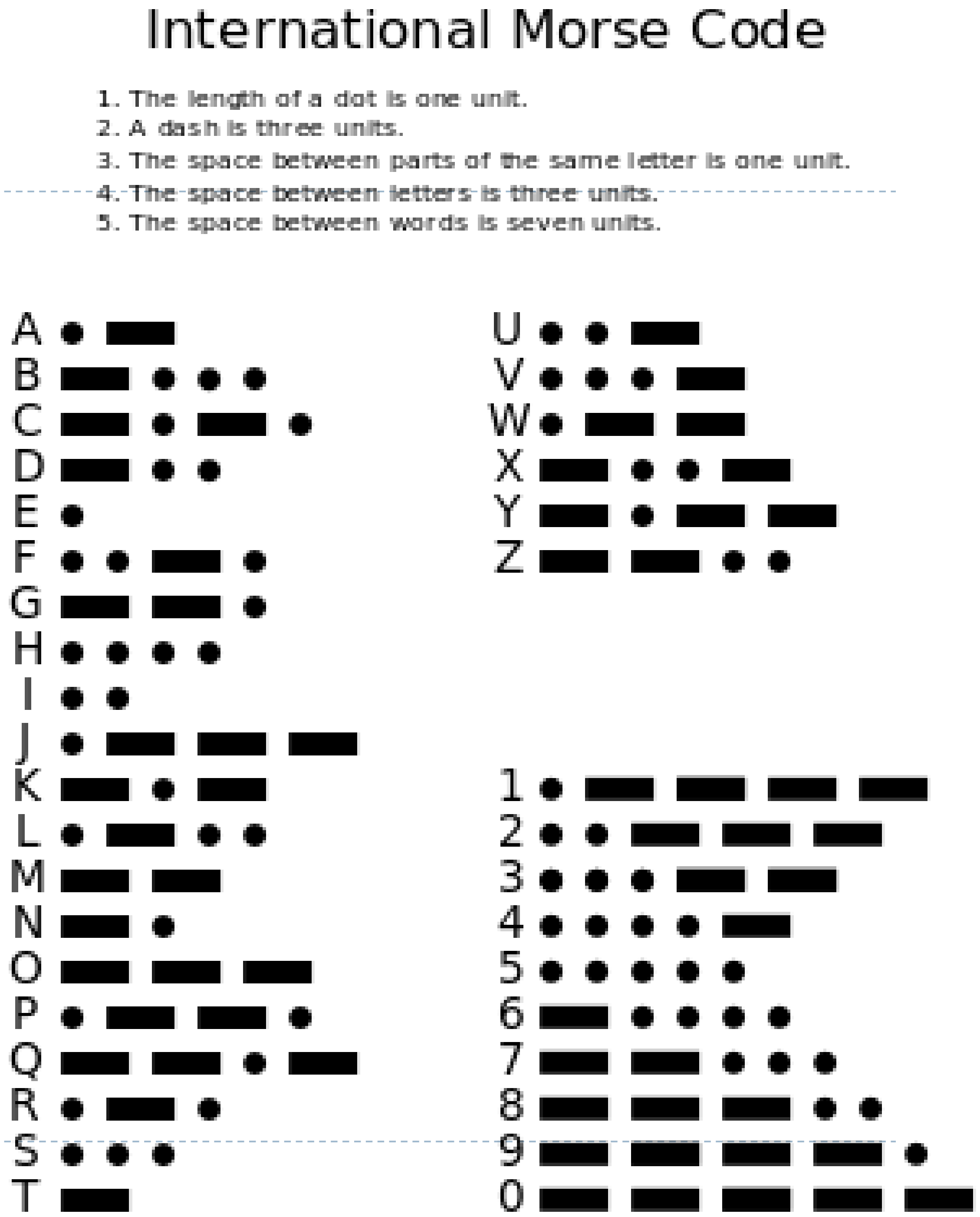
Bibliografía

- Andrew S. Tanenbaum and David J. Wetherall. 2010. *Computer Networks* (5th ed.). Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA
  - Los capítulos 1 (Introducción) y 2 (Nivel Físico)

- Larry L. Peterson and Bruce S. Davie, 2011. *Computer Networks, Fifth Edition: A Systems Approach* (5th ed.) Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
  - La mayor parte de la materia

- Norman Abramson, 1963. *Information Theory and Coding.* First edition McGraw Hill, USA.
  - Libro sobre Teoría de la Información y Codificación
  - Sus primeros capítulos son el texto oficial de la materia para estos temas.
  - Versión en español: Teoría de la Información y Codificación, 1986. Sexta Edición, Paraninfo, Madrid.

Y fue el telégrafo …



- Samuel Morse y su Código

Circa 1850

- Y llegamos al teléfono

… Graham Bell was the first to obtain a patent, in 1876, for an "apparatus for transmitting vocal or other sounds telegraphically"…

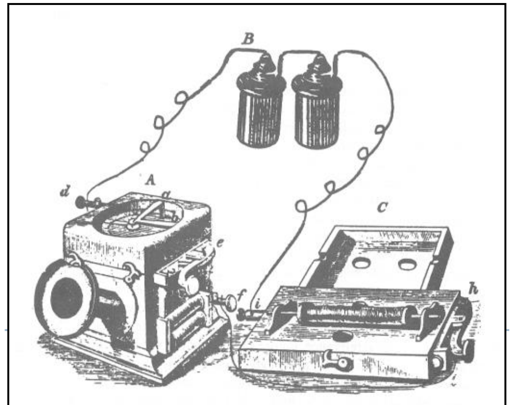


Figure 1.1 Back to the future: the first integrated voice/data communication system.

~1870 - ~1970 casi un siglo de la
Central de Conmutación de Circuitos

Inicios de la conmutación de **paquetes**: la "semilla" de Internet

- Ideas evolucionando desde 1958 hasta a 1969
- Objetivos:
  - Una red más tolerante a fallas
- Estrategia
  - Red descentralizada con múltiples caminos entre 2 puntos
  - División de mensajes en fragmentos que puedan seguir caminos distintos
- DARPA, RAND, UCLA, MIT, NPL

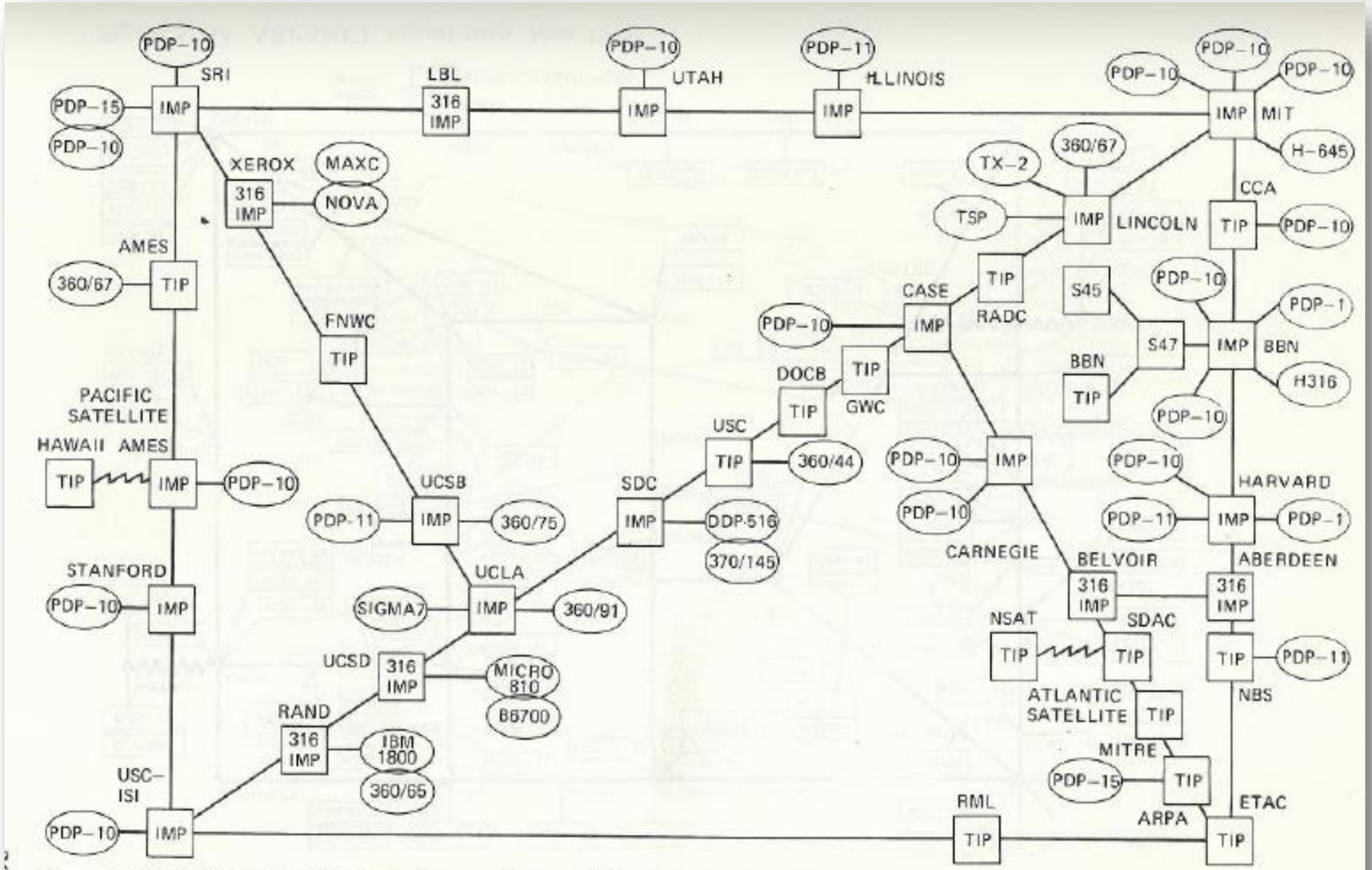
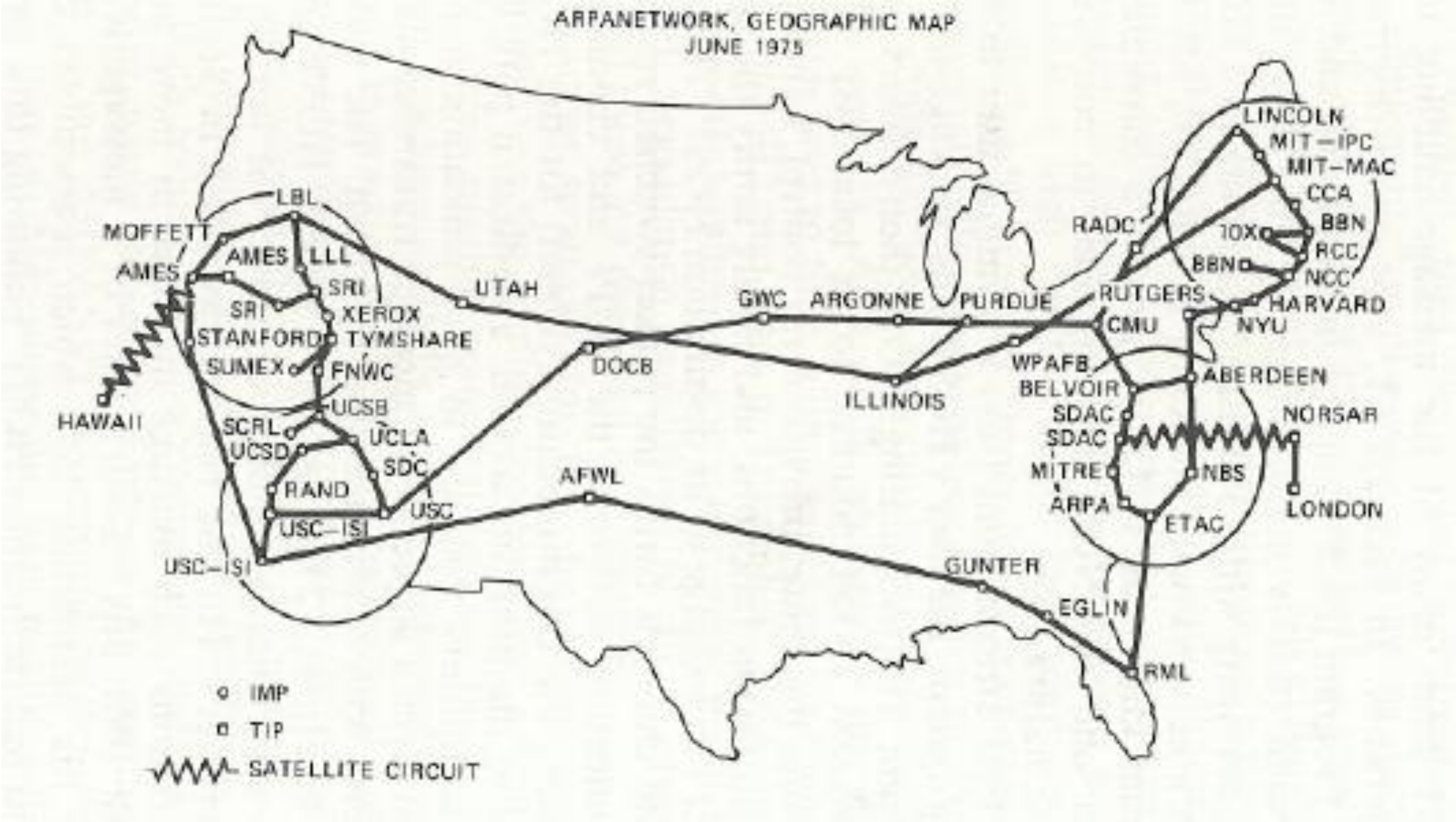


Figure 5.21 (*a*) ARPANET, logical map, August 1973.

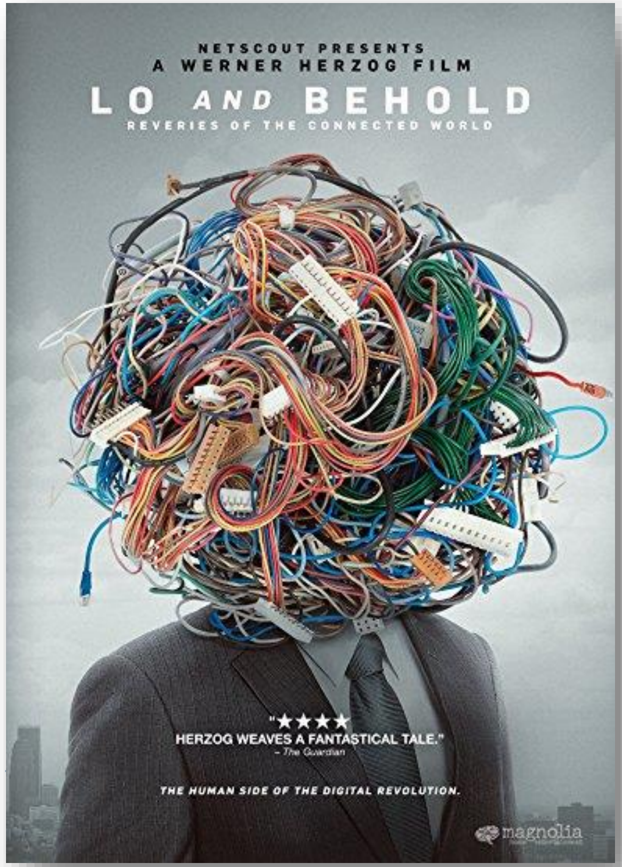
The **Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET)** was an early packet switching network and the first network to implement the protocol suite TCP/IP.

Inicios de la conmutación de **paquetes**: la "semilla" de Internet



Algunos Trabajos fundacionales

- **Kleinrock**, L. "**Models for Computer Networks**", Conference Record, *IEEE International Conf. on Communications*, Boulder, Colorado, pp. 21-9 to 21-16, June **1969**
- **Kleinrock**, L. and W. Naylor, "**On Measured Behavior of the ARPA Network**", AFIPS Conf. *Proceedings, Vol. 43, National Computer Conf.* Chicago, Illinois, AFIPS Press, Montvale, New Jersey, pp. 767-780, May **1974**
- Recomendado:
  Leonard Kleinrock contando **el inicio de Internet**
  - Documental **(2016)**
    "LO and BEHOLD: reveries of the connected world"
    del gran cineasta Werner Herzog. NETFLIX
  - http://www.loandbehold-film.com/trailer
  - **Internet "nació" con una falla, el 29 de Oct. de 1969 en UCLA:**
    "LO" no llegó a ser "LOGIN"



MODELS FOR COMPUTER NETWORKS†

Leonard Kleinrock
Associate Professor
School of Engineering and Applied Science
University of California at Los Angeles
Los Angeles, California 90024

Abstract

The important task of predicting performance of computer networks is considered. In this initial approach, both mathematical and simulation models are described, and the results obtained are compared so as to identify their differences. Suggestions are made with regard to creating more sophisticated mathematical models which will predict more accurately the behavior of computer networks. The driving force which motivates this analysis is the experimental computer network currently being implemented through the efforts of the Advanced Research Projects Agency in the Department of Defense.

I. Introduction

!!!!! Computer networks are not new. SAGE[1] was one of the first as was the American Airlines reservation system.[2] Numerous military nets have been created and, of course, there is the huge electronically-switched telephone system. Recently CDC announced their nationwide com-

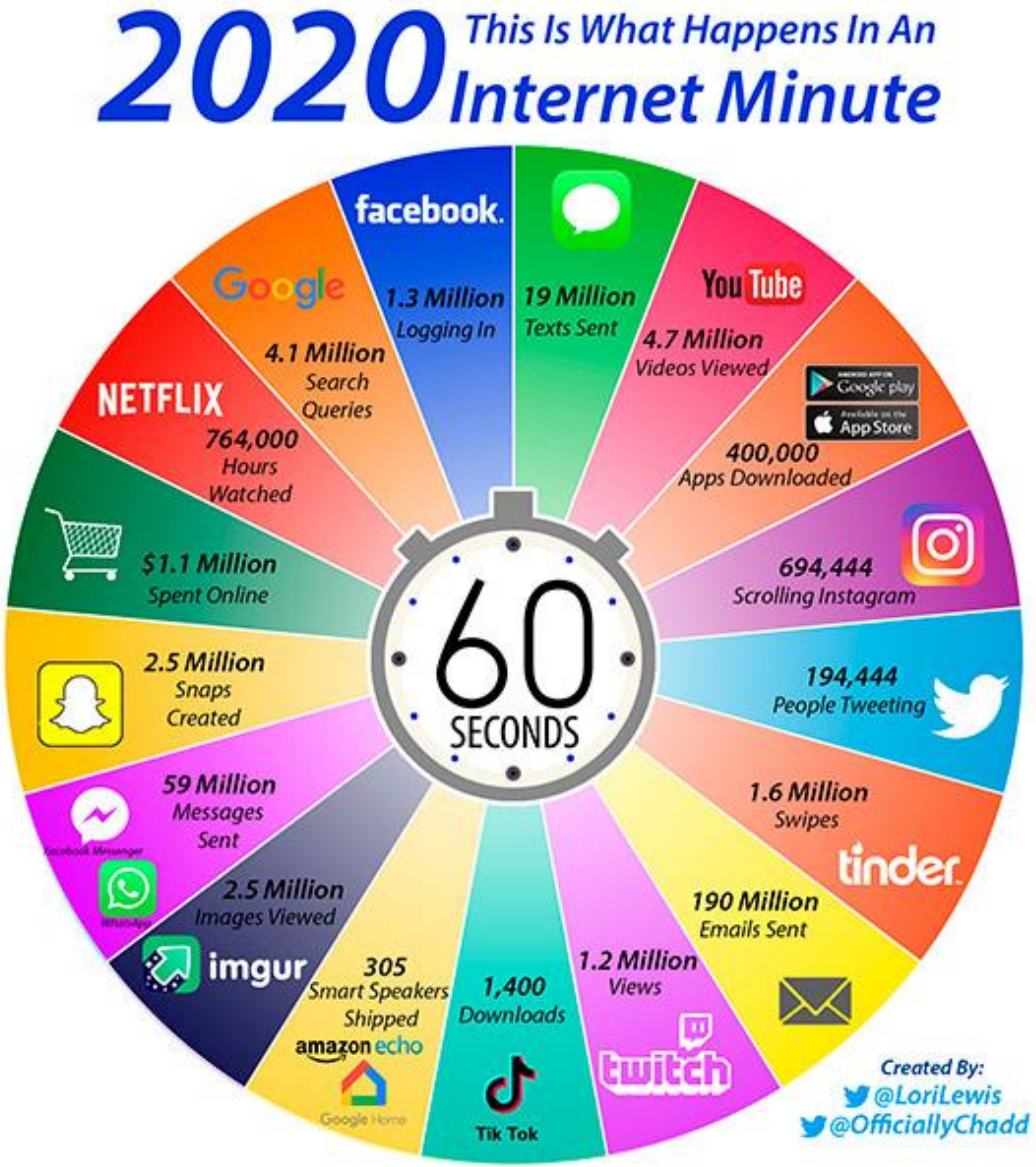
continental United States. The computers located at each of the nodes are highly incompatible (e.g. S.D.S. 940, DEC PDP-10, IBM 360/67, UNIVAC 1108, GE 635, ILLIAC 4, TX-2, etc.), and one of the major challenges is to design a network in which this assortment of varied hardware and software systems can communicate and cooperate with each other. The principle motivation for creating this network is to provide to each of the computer research centers those special resources which have been created at the other centers. For example, Stanford Research Institute will provide the role of network librarian and will offer its sophisticated text editing capability for massaging this vast data base; University of Illinois will allow access to the extremely high parallel processing speeds of its ILLIAC 4; University of Utah will serve as a major graphics center for picture processing; University of California at Los Angeles will process network measurement data and compare these to simulation and analytically predicted results.

References

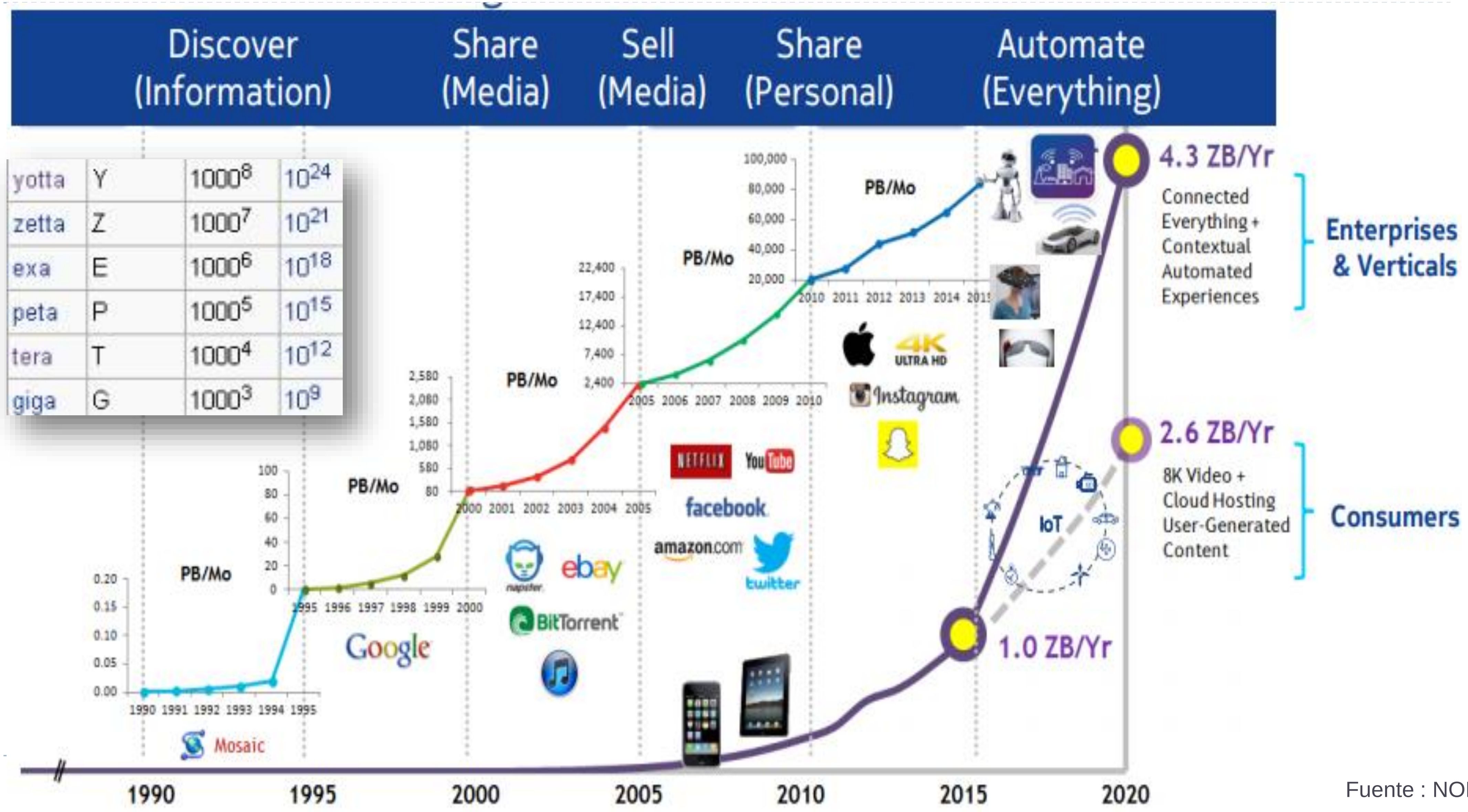
1. R.R. Everett, C.A. Zraket, and H.D. Benington," SAGE: A Data Processing System for Air Defense," EJCC, pp. 148-155, 1957.
2. J. Evans, "Experience Gained from the American Airlines SABRE System Control Program," Proc. ACM National Meeting August 1967, pp. 77-83.

Kleinrock, L. "Models for Computer Networks", Conference Record, IEEE International Conf. on Communications, Boulder, Colorado, pp. 21-9 to 21-16, June 1969


2019 This Is What Happens In An Internet Minute
facebook
1 Million Logging In
18.1 Million Texts Sent
YouTube
4.5 Million Videos Viewed
Google play
App Store
390,030 Apps Downloaded
347,222 Scrolling Instagram
87,500 People Tweeting
1.4 Million Swipes
tinder
188 Million Emails Sent
1 Million Views
twitch
41 Music Streaming Subscriptions
180 Smart Speakers Shipped
amazon echo
GIPHY
4.8 Million Gifs Served
41.6 Million Messages Sent
2.1 Million Snaps Created
$996,956 Spent Online
NETFLIX
694,444 Hours Watched
Google
3.8 Million Search Queries
60 SECONDS
Created By:
@LoriLewis
@OfficiallyChadd

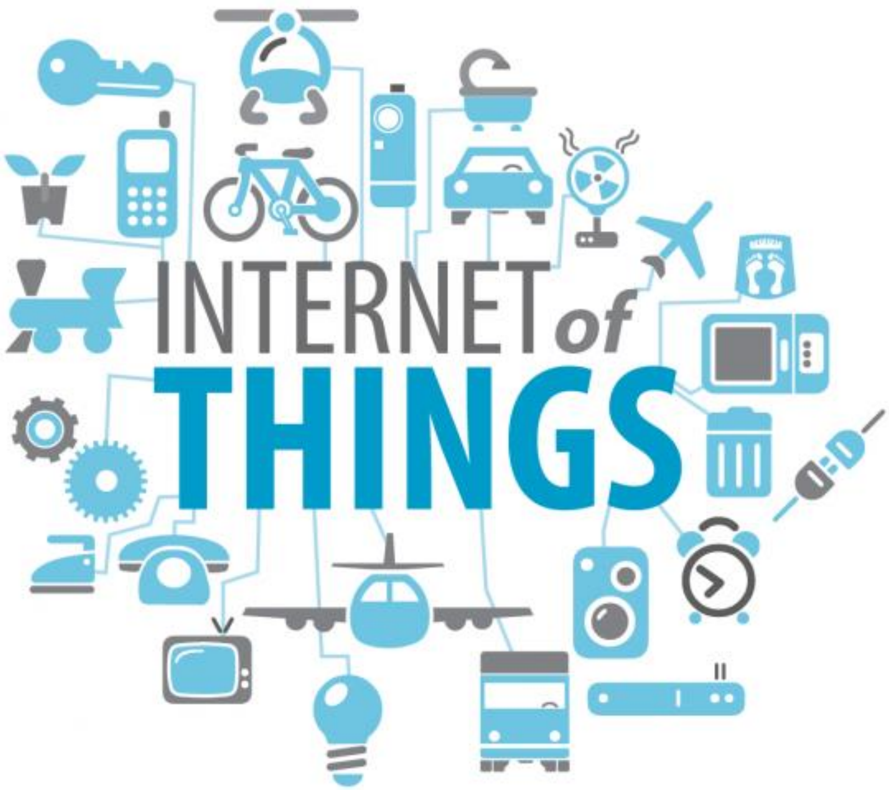

2020 This Is What Happens In An Internet Minute
facebook
1.3 Million Logging In
19 Million Texts Sent
YouTube
4.7 Million Videos Viewed
Google play
App Store
400,000 Apps Downloaded
694,444 Scrolling Instagram
194,444 People Tweeting
1.6 Million Swipes
tinder
190 Million Emails Sent
1.2 Million Views
twitch
1,400 Downloads
Tik Tok
305 Smart Speakers Shipped
amazon echo
imgur
2.5 Million Images Viewed
59 Million Messages Sent
2.5 Million Snaps Created
$1.1 Million Spent Online
NETFLIX
764,000 Hours Watched
Google
4.1 Million Search Queries
60 SECONDS
Created By:
@LoriLewis
@OfficiallyChadd

Evolución de la demanda



Fuente : NOKIA

Lo que se viene… IoE



IoT Application Examples

Transport & Logistics

Smart Home

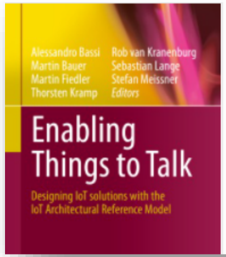
Smart Cities

Smart Energy / Smart Grid

Retail

Smart Factories

E-Health



© 2013

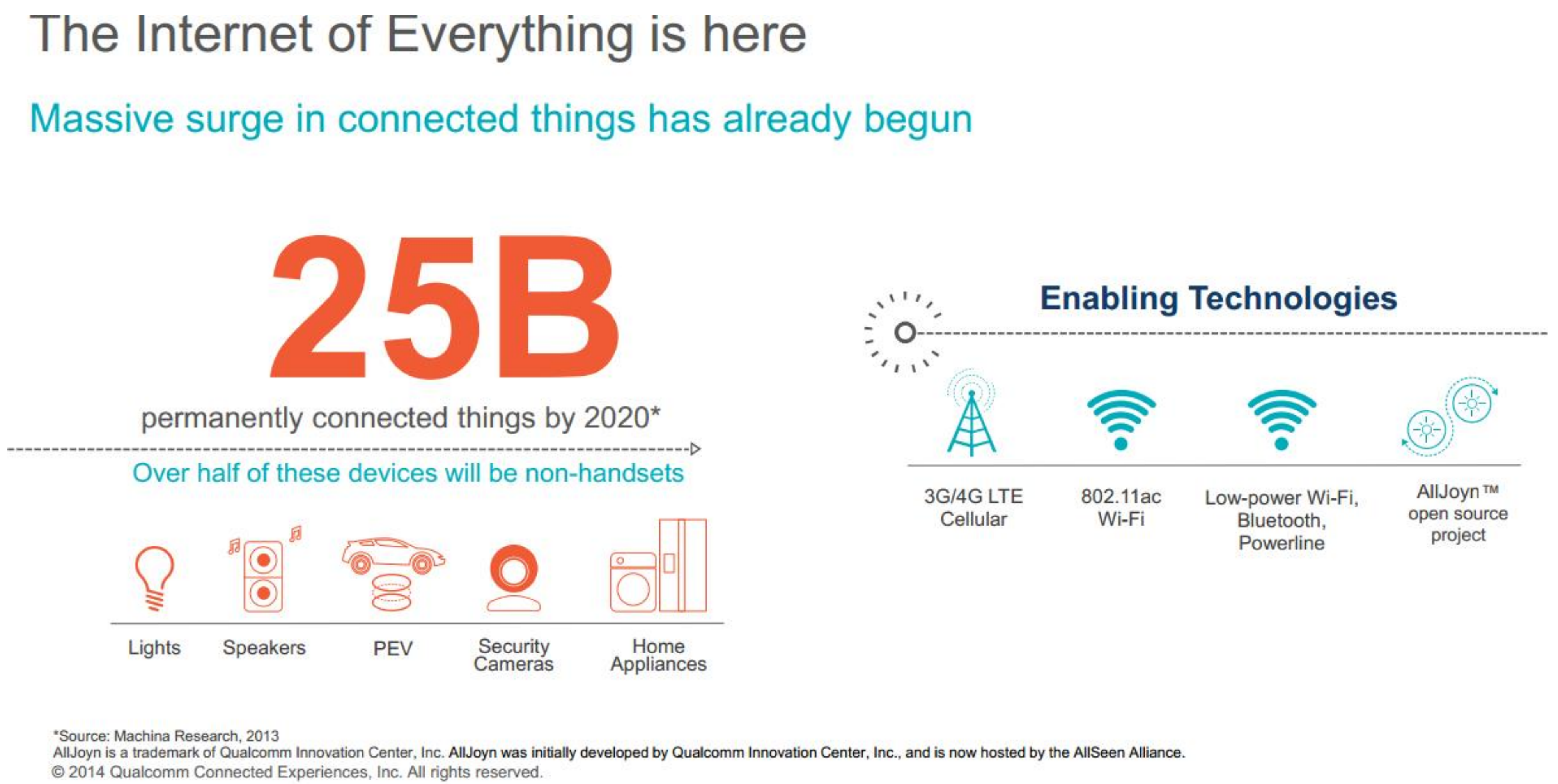
Enabling Things to Talk

Designing IoT solutions with the IoT Architectural Reference Model

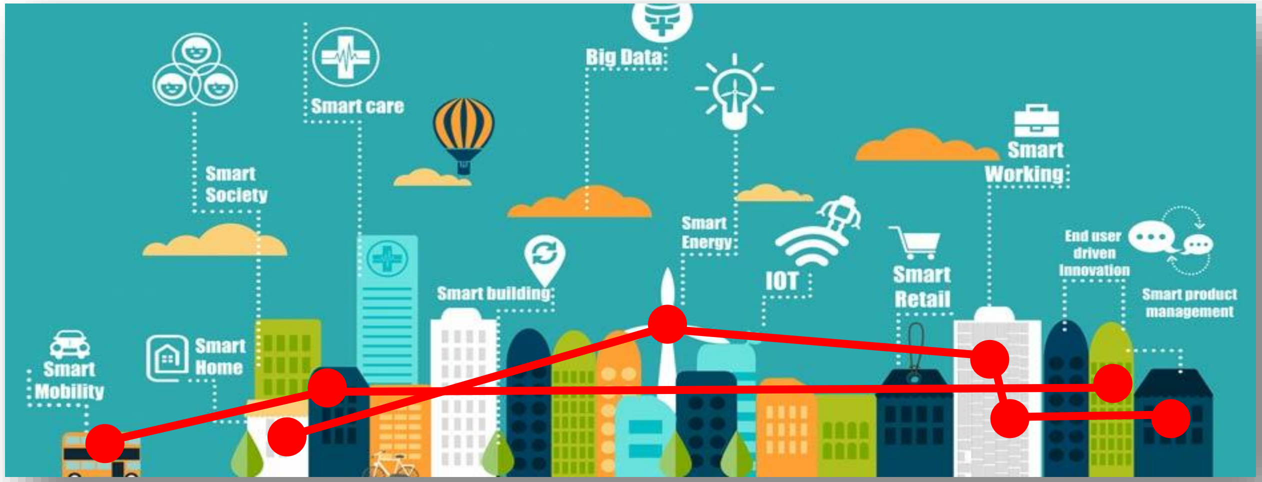
Editors (view affiliations)

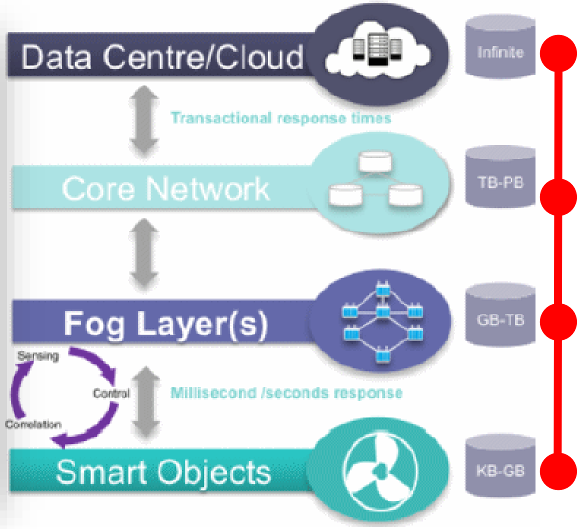
Alessandro Bassi, Martin Bauer, Martin Fiedler, Thorsten Kramp, Rob van Kranenburg,

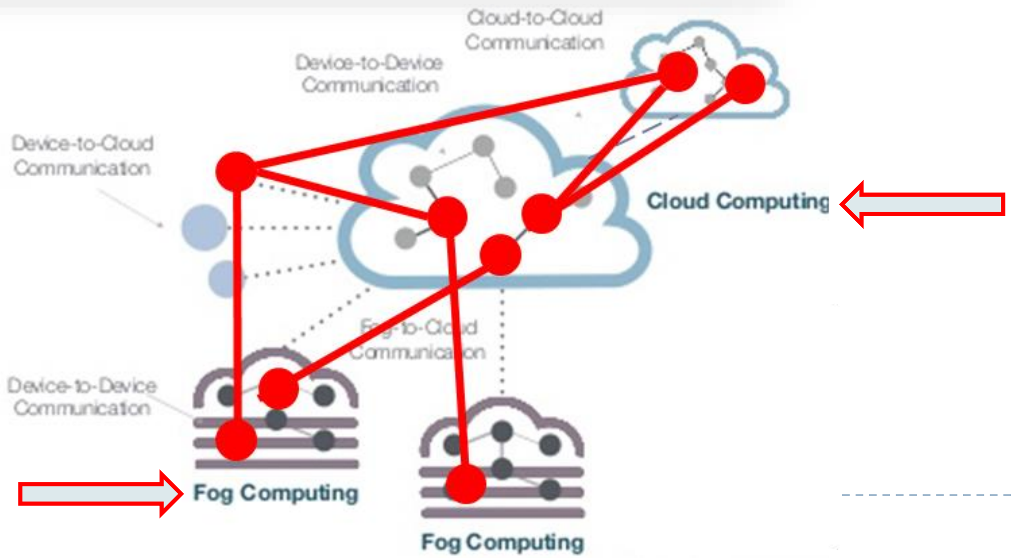
Lo que se viene… IoE

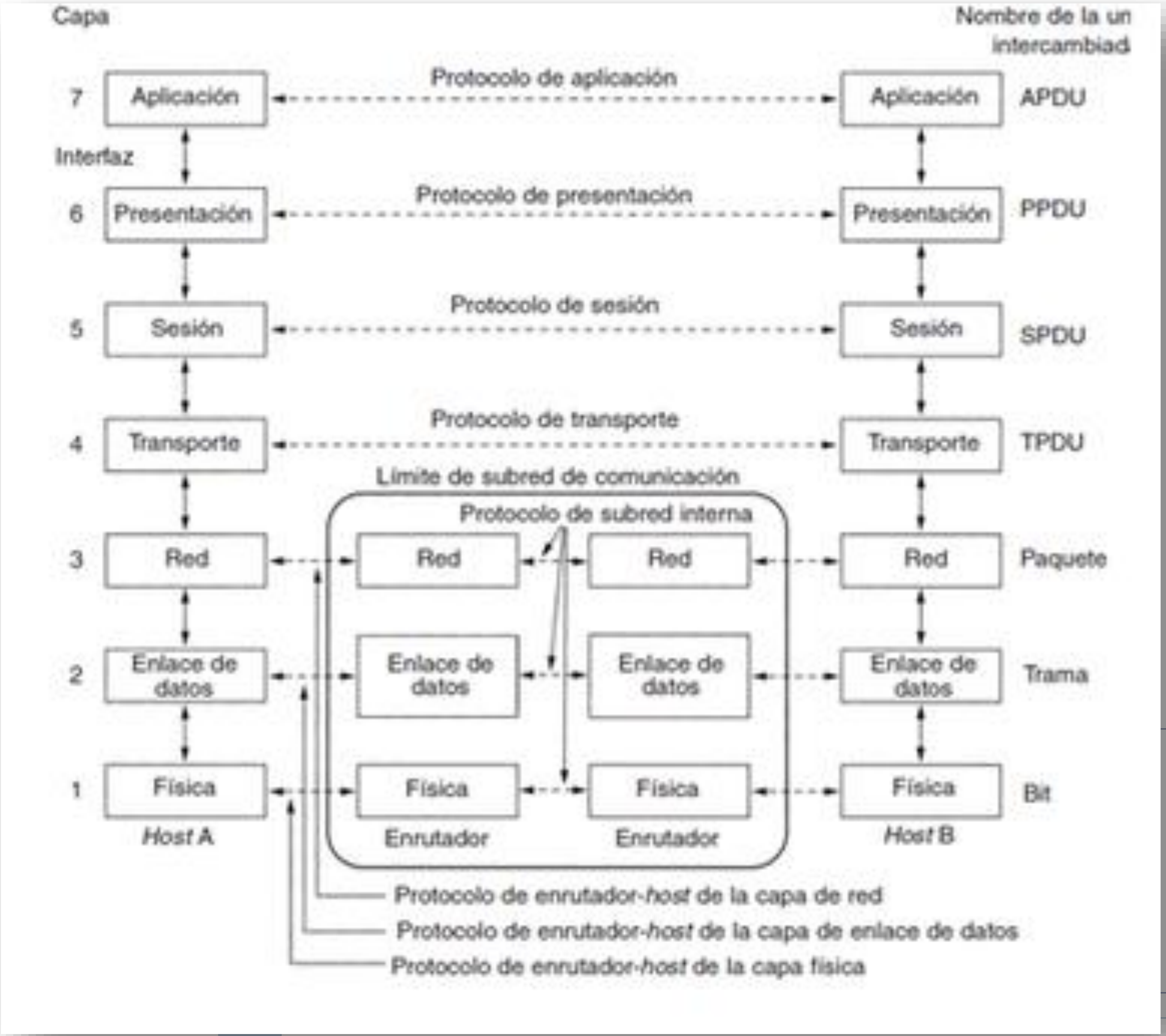


IoT en Ciudades Inteligentes









Arquitectura de Redes

Fundamentos

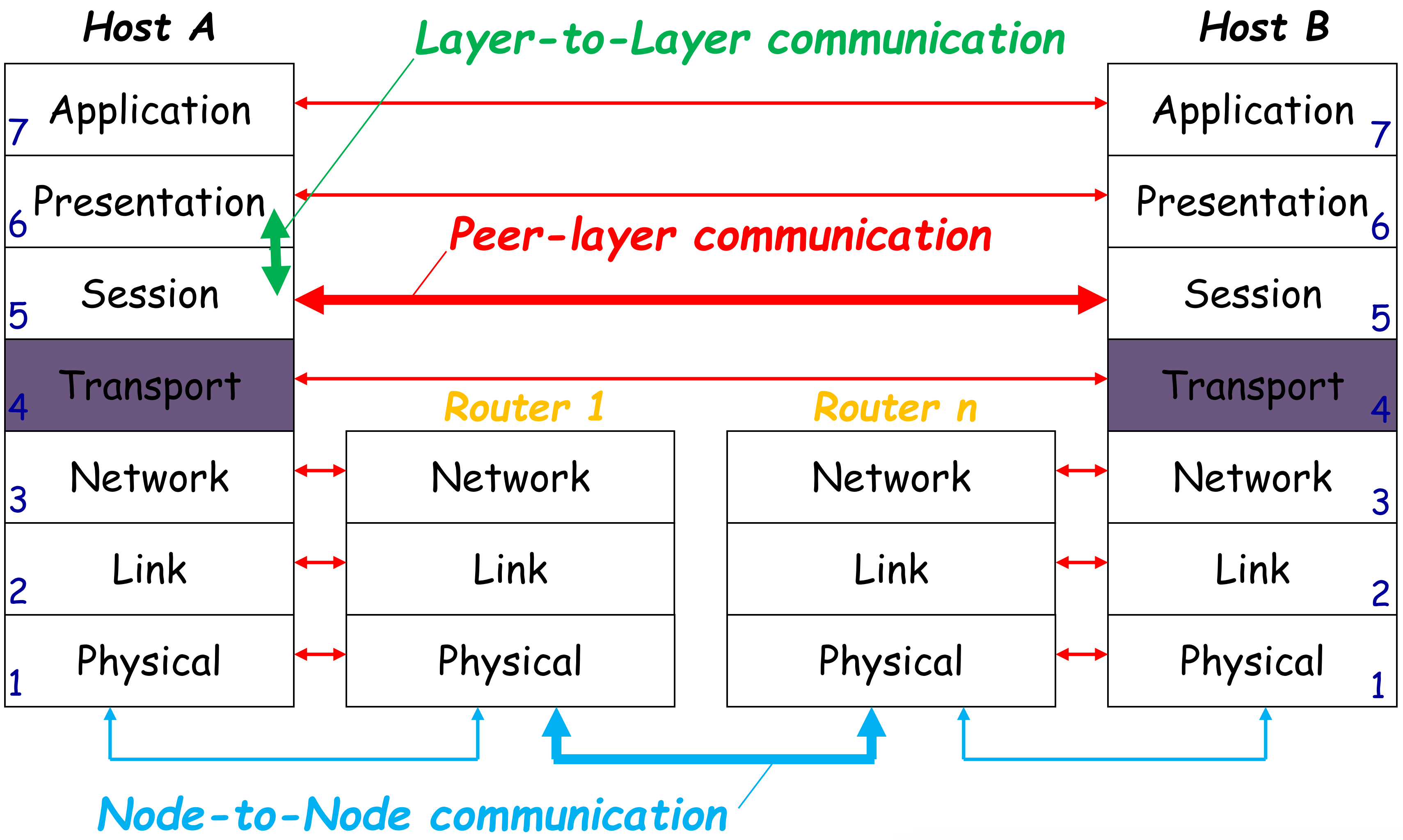
Figura del libro de Tanenbaum

Múltiples Redes Globales

- BITNET, XEROX, DECNET ...
- ARPANET, CSNET, MILNET, UUCP ..
  - Esta era la situación a mediados de los 80
    - Quaterman realiza un survey de las principales redes Globales de la época [QH86]
- Una arquitectura única de Red (OSI–ISO)?
- **Mayo 1983:** ISO publica "*ISO 7498: The Basic Reference Model for Open Systems Interconnection*" as an international standard.

[QH86] John S. Quarterman and Josiah C. Hoskins. 1986. Notable computer networks. *Commun. ACM* 29, 10 (October 1986), 932-971.

Modelo OSI



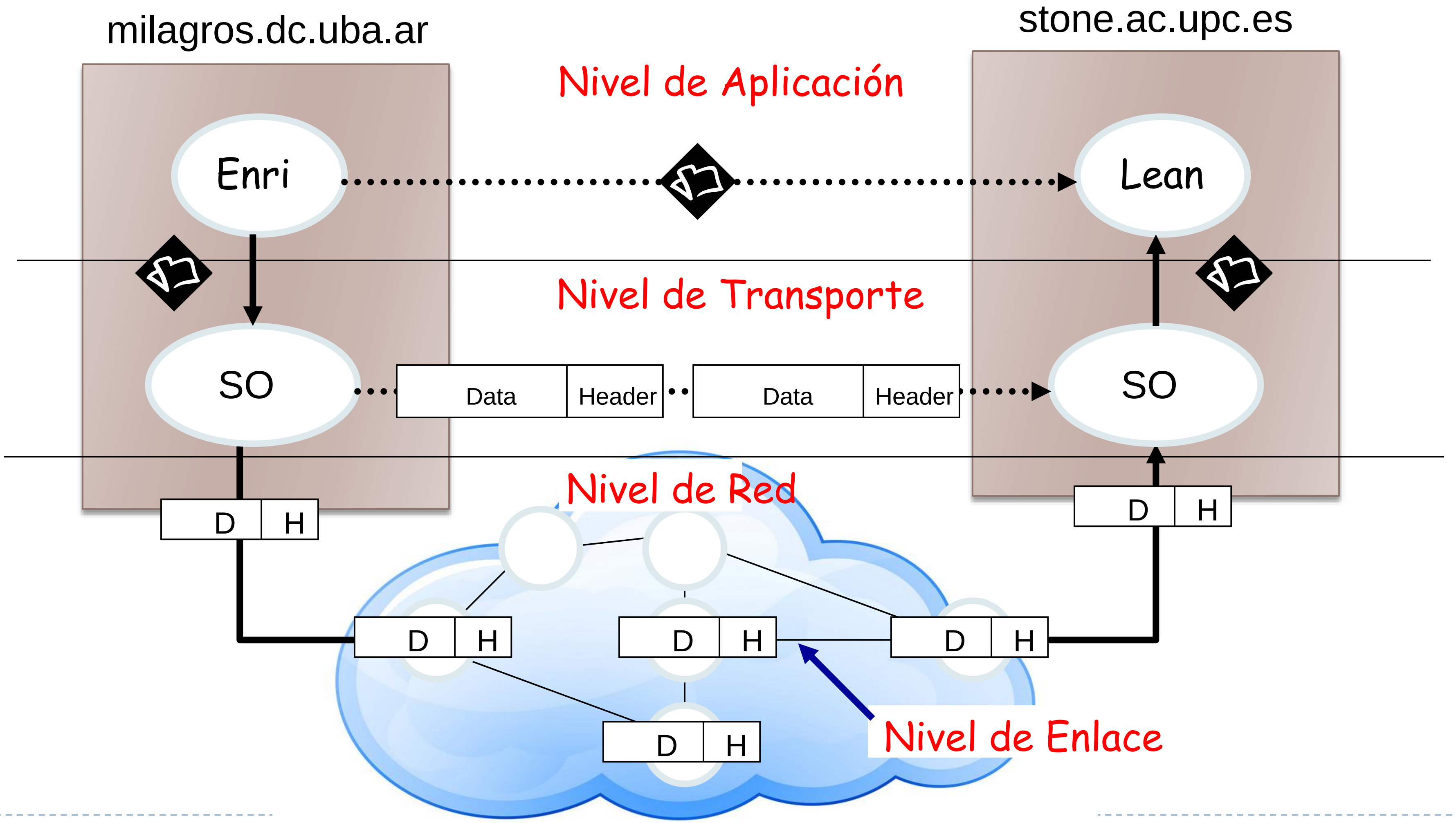
Hubbert Zimmermann, 1980
http://www.cs.cmu.edu/~srini/15-744/F02/readings/Zim80.pdf


IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. COM-28, NO. 4, APRIL 1980 425

OSI Reference Model—The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection

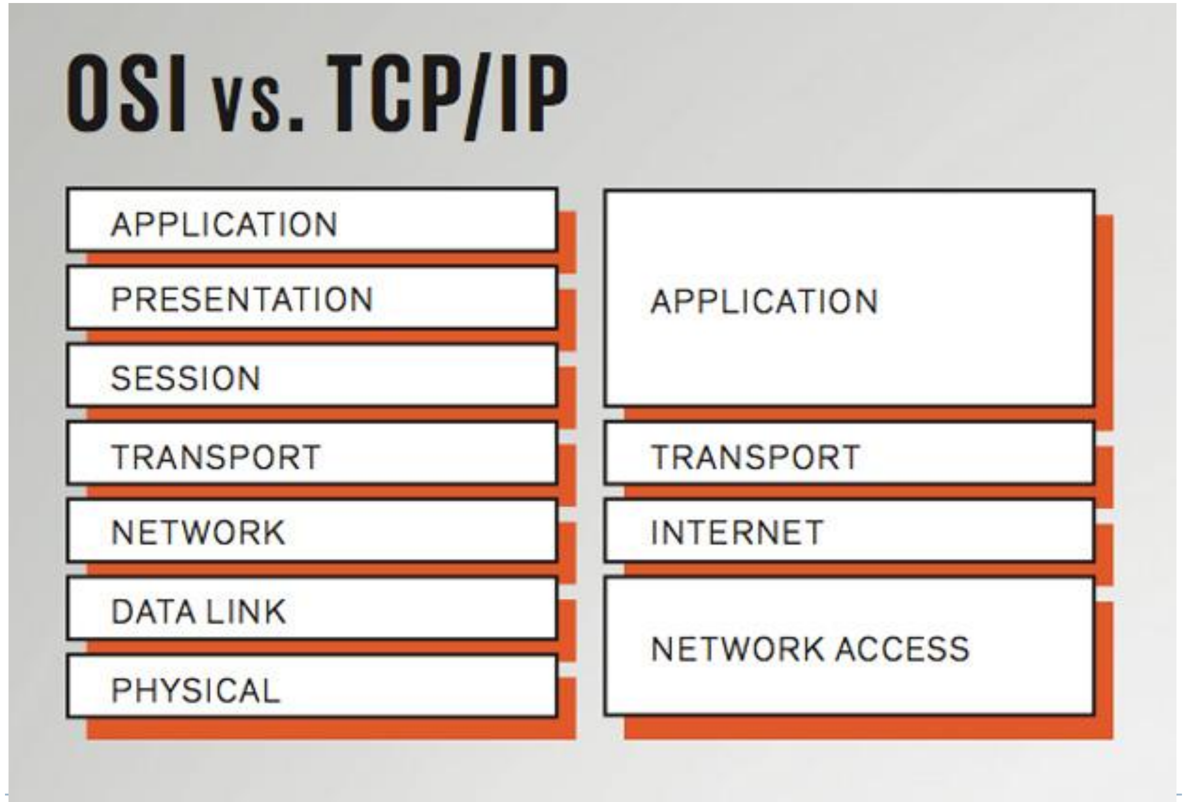
HUBERT ZIMMERMANN

Nivel Transporte: “End to End”



Como se impuso TCP/IP a OSI ?

- Una visión de las causas la pueden encontrar en: http://spectrum.ieee.org/computing/networks/osi-the-internet-that-wasnt



La historia la escriben …

- http://www.comsoc.org/files/Publications/Magazines/ci/hist-comm/2010-aug.pdf
- http://www.comsoc.org/files/Publications/Magazines/ci/hist-comm/2012-may.pdf
- http://www.comsoc.org/files/Publications/Magazines/ci/hist-comm/2009-feb.pdf
- http://www.internetsociety.org/internet/what-internet/history-internet/brief-history-internet
- http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_Internet

Mitos urbanos:

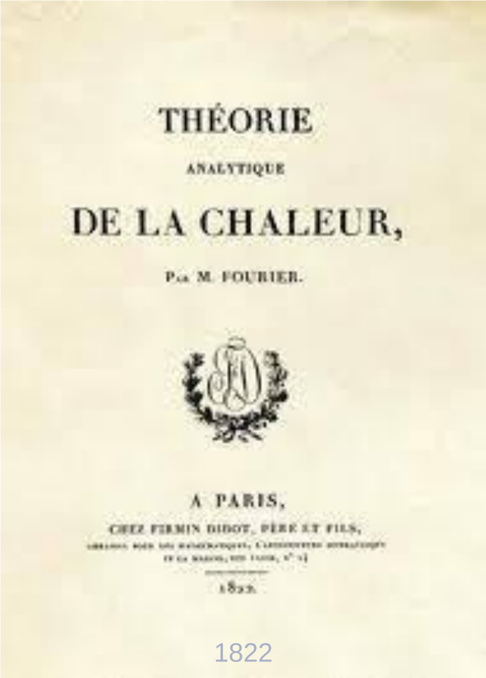
Internet es un “producto de la guerra fría“ …

Internet fue un fenómeno muy interesante impulsado por “hackers” …

Agenda (Parte 2)

- Modelos de un Sistema de Comunicaciones
- Mundo Analógico y Mundo Digital
- Fundamentos de las **señales**
- El “dominio” de la **frecuencia**
  - Fourier – Ancho de Banda
- Introducción a la **Teoría de la Información**

Jean-Baptiste Joseph Fourier 1768-1830



1822

Nivel Físico

Parte 1 - Fundamentos

TANENBAUM - CAP 2 the physical layer.

Sistema de Comunicaciones

- Primero vamos a estudiar las propiedades físicas de esta señal
- por ejemplo: señales digitales, representar bits, frecuencia, amplitud, Fourier, etc

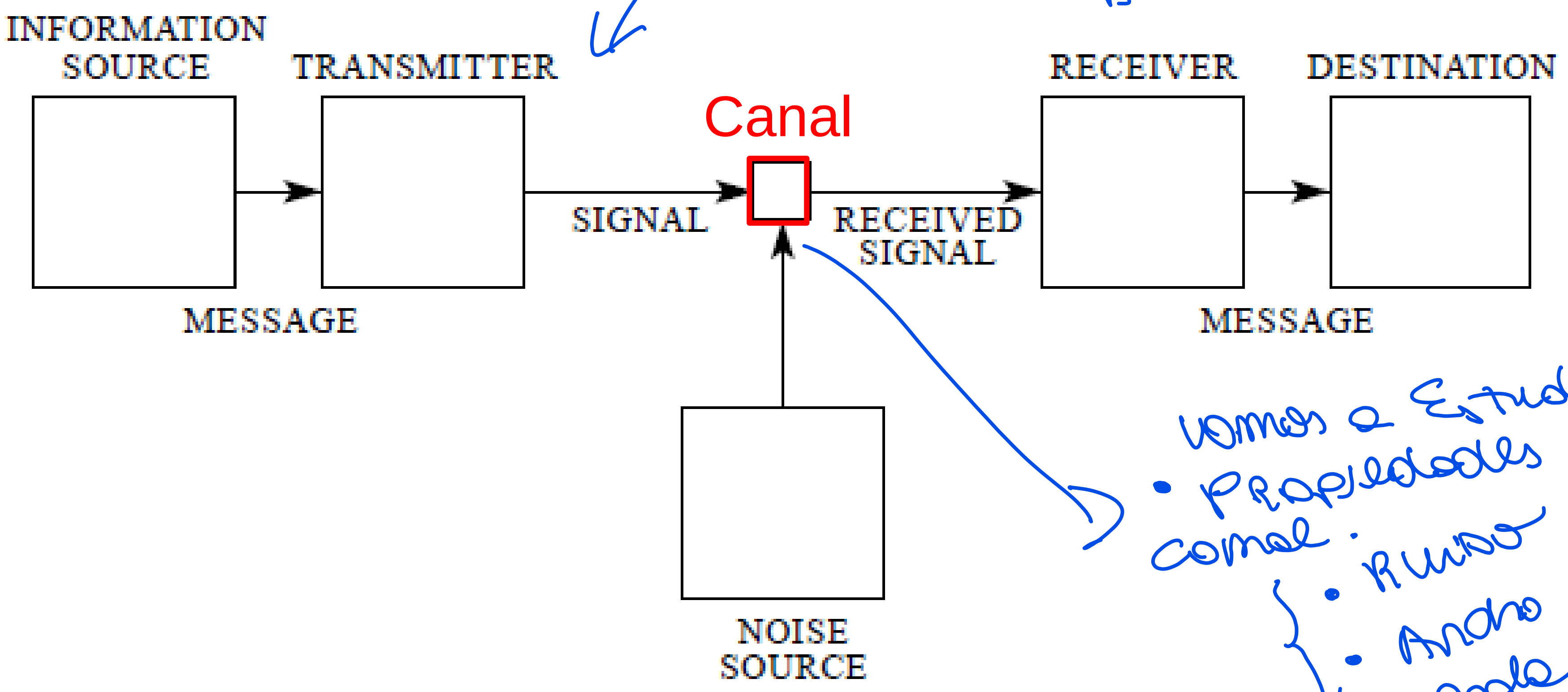
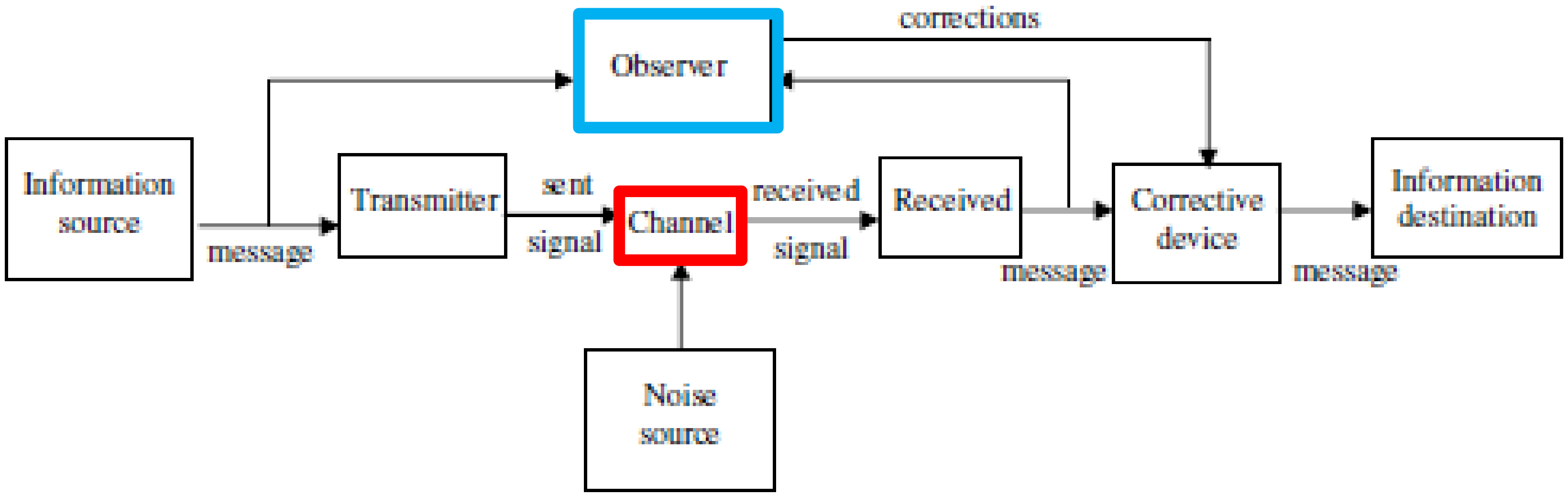
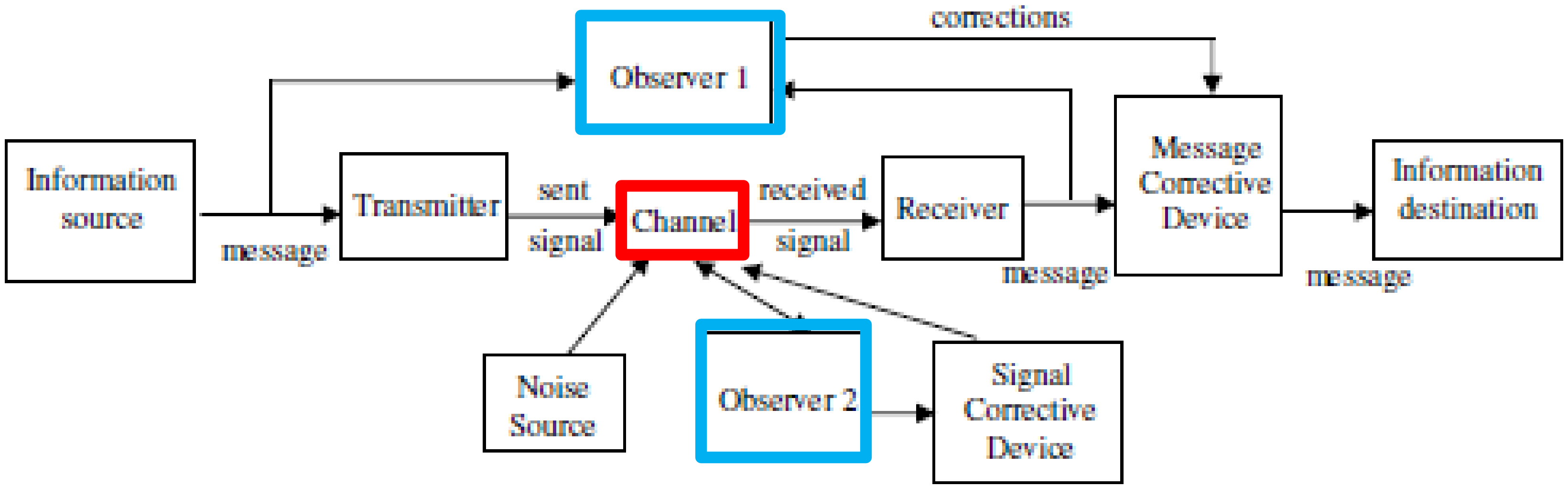


Fig. 1—Schematic diagram of a general communication system.

vamos a estudiar
- propiedades del canal:
  - ruido
  - ancho de banda (bandwidth).

Modelos con Corrección y Doble Corrección

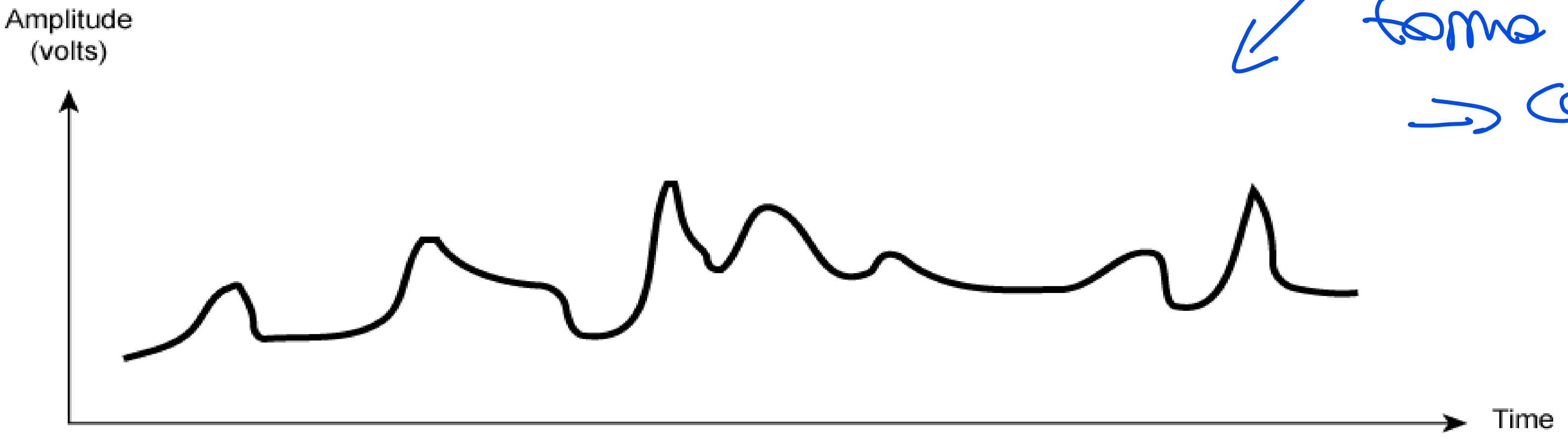




• Las podemos representar como variaciones de alguna magnitud física (A: amplitud en volts) en función del tiempo. f(t)

Señales: Analógicas y Digitales

f toma ∞ valores → continua

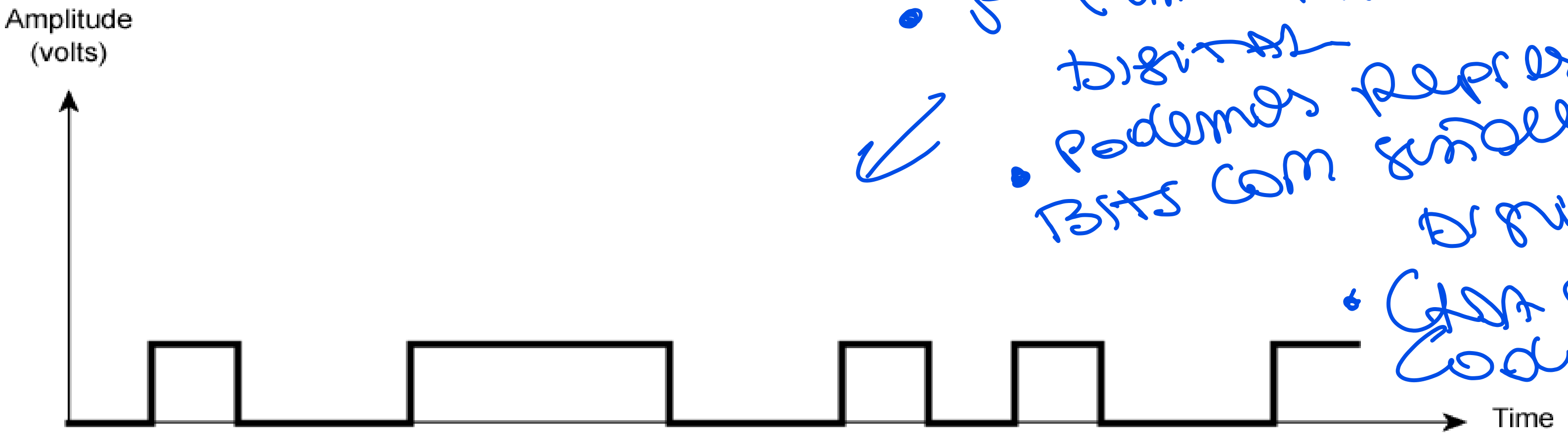


(a) Analog

• f toma finitos valores
DIGITAL

• Podemos representar bits con señales digitales!!

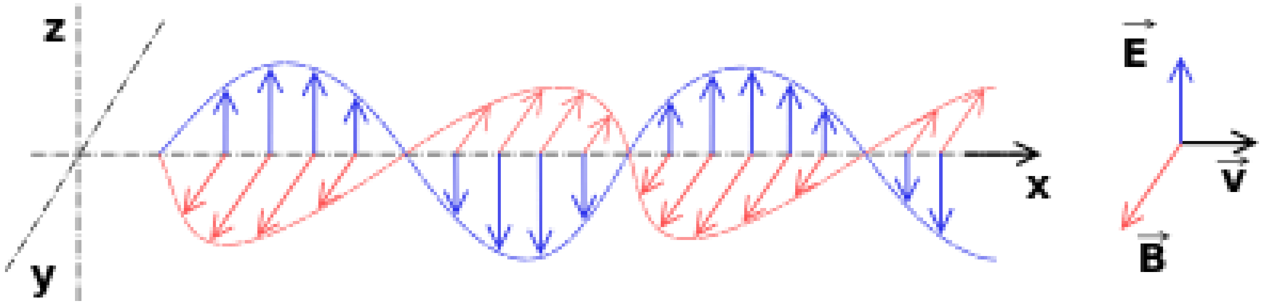
• Cada bit se codifica en 1 ciclo



(b) Digital

Fundamentos de las Señales

- Ondas electromagnéticas: dos campos ortogonales, uno eléctrico (**E**) y el otro magnético (**B**) que se propagan juntos



- **En el vacío se propagan a la velocidad de la luz (c** = $3*10^8$ m/s**)**
  - Michelson-Morley demostraron que no existía el "éter"
- En otros medios se propagan a una velocidad menor, usualmente tomada como un factor de **c**
  - Ejemplo: En un típico cable de red (UTP Cat. 5) el medio es el cobre, con **v** ≈ 0.69 * **c**
- La luz puede considerarse una onda electromagnética

Conceptos básicos: Ondas

- **Onda electromagnética:** se propaga en un medio físico a una velocidad propia del medio
  - En el caso del aire: velocidad de propagación (casi) igual a la velocidad de la luz **c**
  - **Se propaga** como un plano desplazándose longitudinalmente
  - **Vibra** (oscila) a una frecuencia **f** determinada con un comportamiento periódico en el eje de su propagación.
  - Tiene un período (o repetición a longitudes constantes) que se denomina

Longitud de Onda: λ [metros] **=** **c** [metros/seg] **/** **f** [veces/seg]

- **Problemas**: Una onda, en el caso de chocar con imperfecciones del material, produce reflexiones y refracciones.
  - Se producen "pérdidas" (menos energía para mi señal original, donde viaja mi mensaje)
  - Si el medio tiene muchas pérdidas, la señal original se puede atenuar considerablemente.

Conceptos básicos: funciones periódicas

• CUALQUIER SEÑAL FINITA ES PERIODICA (LA REPETIMOS)

- Una ***función periódica*** *f(t)* cumple que para todo valor de *t* vale:

$$f(t) = f(t + \boldsymbol{T})$$

Al mínimo valor positivo mayor que cero de la constante ***T*** que cumple lo anterior se le llama el ***período fundamental*** (o simplemente ***período***) de la función.

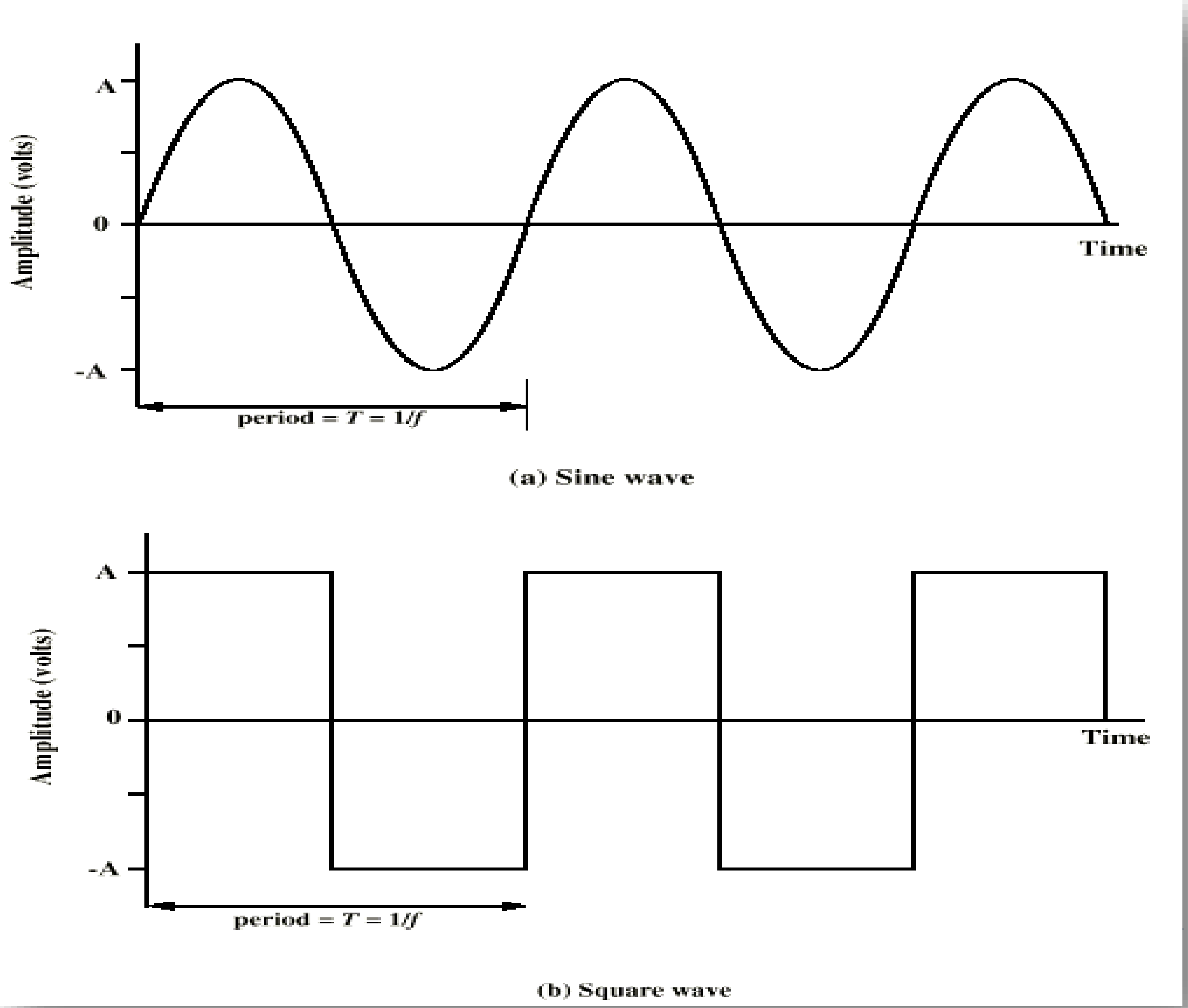
- Se cumple:

$$f(t) = f(t + \boldsymbol{n} * T) \qquad \text{con } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$$

- *Es f(t) = constante una función periódica?*

Señales Periódicas

Período T = 1 / f



ONDA / SEÑAL SENOIDAL.

$$s(t) = A * \text{sen}(2\pi * f * t + \Phi)$$

s(t)

original

s(t)

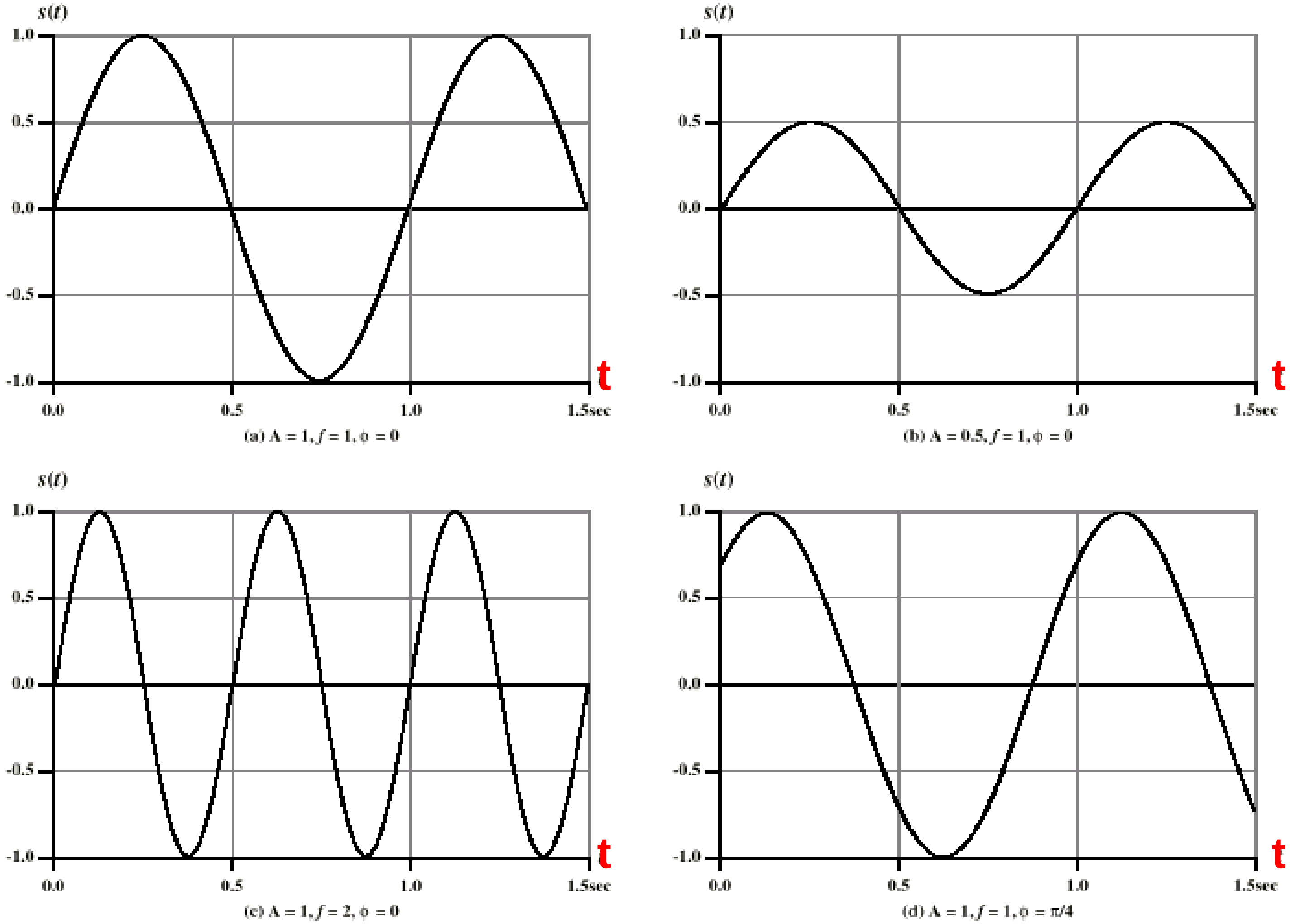
cambia **A**

s(t)

cambia **f**

s(t)

cambia **Φ**



Onda Senoidal

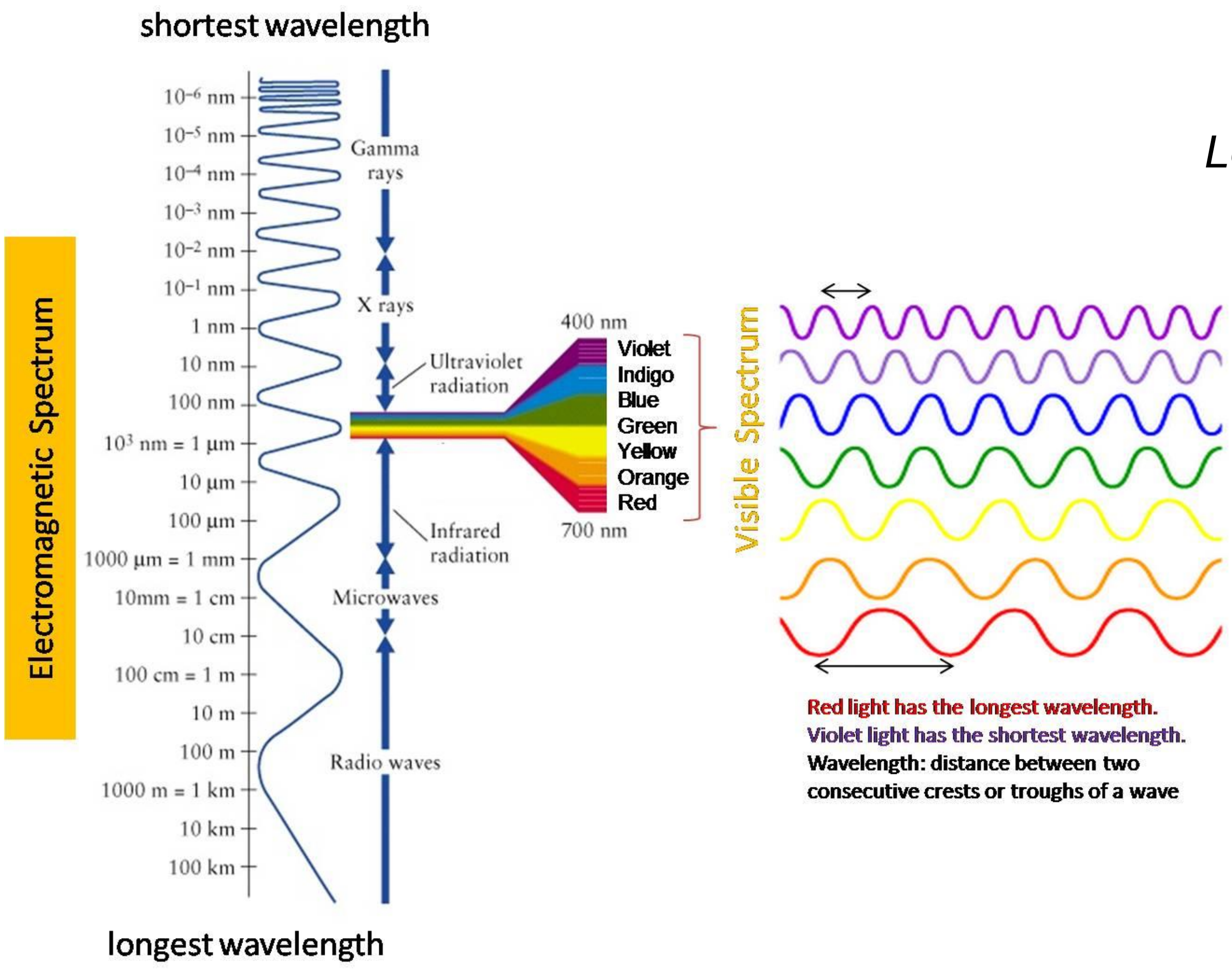
- A = Amplitud
  - Amplitud (Magnitud física, ej.: Volts)
    - (ej: CA, A=310 Volt, Valor Eficaz = 220 Volt)
- w = Frecuencia Angular. w = 2.π.f
  - Radianes/segundo
- f = Frecuencia Temporal ← Cuantos ciclos Realiza En 1 segundo (HZ)
  - Hertz (Hz) o ciclos/segundo
- T = Período
  - Tiempo en que se completa un ciclo de valores ← Cuanto tarda En hacer 1 ciclo $T = \frac{1}{f}$ seg.
  - T = 1/f
- ϕ = Fase
  - Posición relativa (o desfasaje) en el tiempo

Longitud de Onda (λ)

Cuanto MIDE (En m por ejemplo) un ciclo de mi onda.

- "Distancia ocupada" por un ciclo
- Distancia <u>espacial</u> entre dos puntos correspondientes a la misma fase, en dos ciclos consecutivos.
- En una onda *electromagnética*
  - Asumimos una velocidad de propagación lineal ***v***
  - $\lambda = \mathbf{v}.T = \mathbf{v} / f$
  - $\lambda . f = \mathbf{v}$
- *Velocidad de la luz en el vacío*
  - Recordemos: v (luz en el vacío) = **c** = 3.10^8 [m/s]
  - Longitud de onda de la luz en el vacío: $\lambda = \mathbf{c} / \mathbf{f}$ [m]

El caso de las ondas de luz



Longitud de onda de la luz en el vacío:

$$\lambda = c / f$$

Color	Wavelength	Frequency
violet	380–450 nm	668–789 THz
blue	450–495 nm	606–668 THz
green	495–570 nm	526–606 THz
yellow	570–590 nm	508–526 THz
orange	590–620 nm	484–508 THz
red	620–750 nm	400–484 THz

Luz visible

***Cabello humano**:*
~1000 veces más grueso

El dominio transformado

- Hasta ahora hemos representado las señales en el dominio del tiempo
- Sin embargo para comprender y/o simplificar la resolución del fenómeno de filtrado es conveniente pasar del dominio temporal al dominio de la frecuencia.

Si logramos representar una señal cualquiera como suma de otras, podemos entender a la señal mirando las amplitudes (FUERZA) de las otras señales, en función de su frecuencia.

Veremos dos herramientas:

1. Serie de Fourier
2. Transformada de Fourier

Serie trigonométrica de Fourier

- Funciones periódicas *f(t)* de periodo *T* pueden expresarse por la siguiente serie, llamada *serie trigonométrica de Fourier*

1er ARMONICO   2do ARMONICO

$$f(t) = \tfrac{1}{2} a_0 + \overbrace{a_1 \cos(\omega_0 t)}^{\text{1er armónico}} + \overbrace{a_2 \cos(2\omega_0 t)}^{\text{2do armónico}} + a_3 \cos(3\omega_0 t) + \ldots$$

$$\ldots + \underbrace{b_1 sen(\omega_0 t)}_{\text{1er armónico}} + \underbrace{b_2 sen(2\omega_0 t)}_{\text{2do armónico}} + b_3 sen(3\omega_0 t) + \ldots$$

1er ARMONICO   2do ARMONICO $\Rightarrow f = \frac{1}{T}$

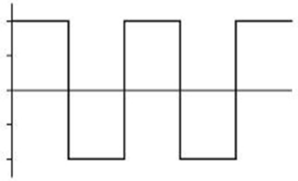
- Donde $w_0 = 2\pi / T = 2.\pi.f_0$ se denomina frecuencia fundamental.

$$f(t) = \tfrac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n sen(n\omega_0 t)]$$

$\hookrightarrow \omega_0 = 2\pi f \quad t = \frac{2\pi}{T} f.$

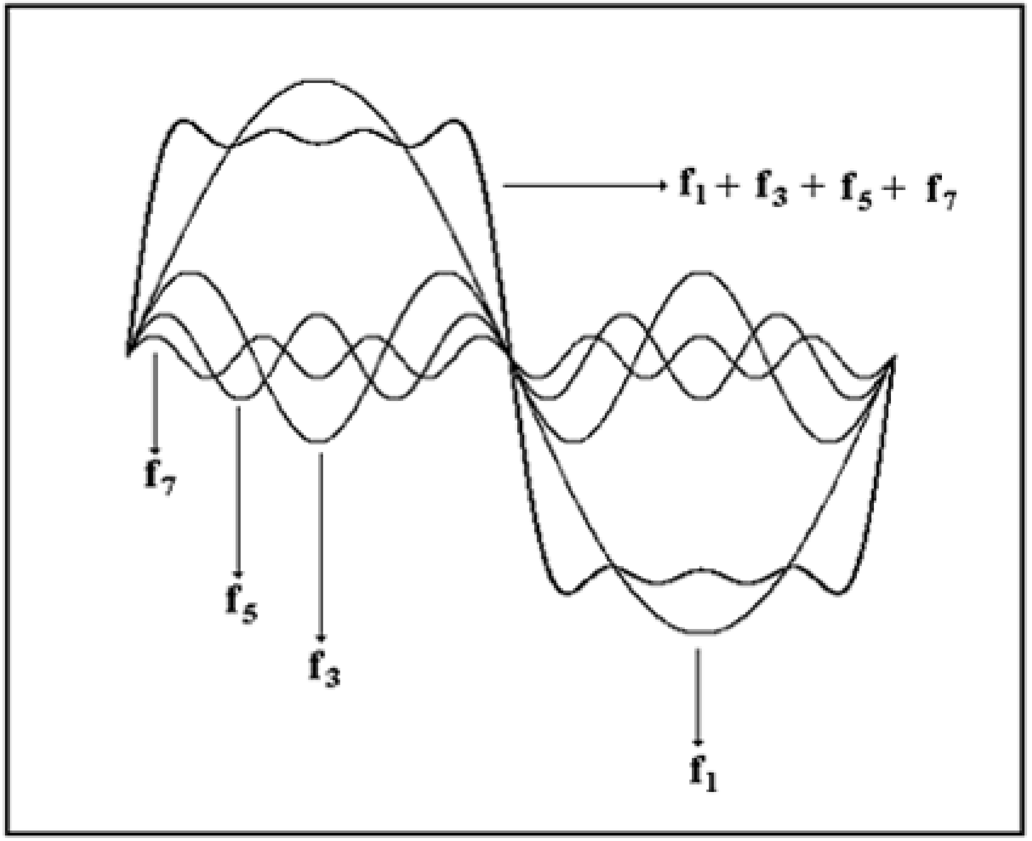
La onda Cuadrada

• ESTÁ COMPUESTA DE MUCHÍSIMAS FRECUENCIAS DISTINTAS!! O ARMÓNICOS!
(FRECUENCIA = "ARMÓNICO")



Se puede representar como una serie infinita de senoides armónicamente relacionadas

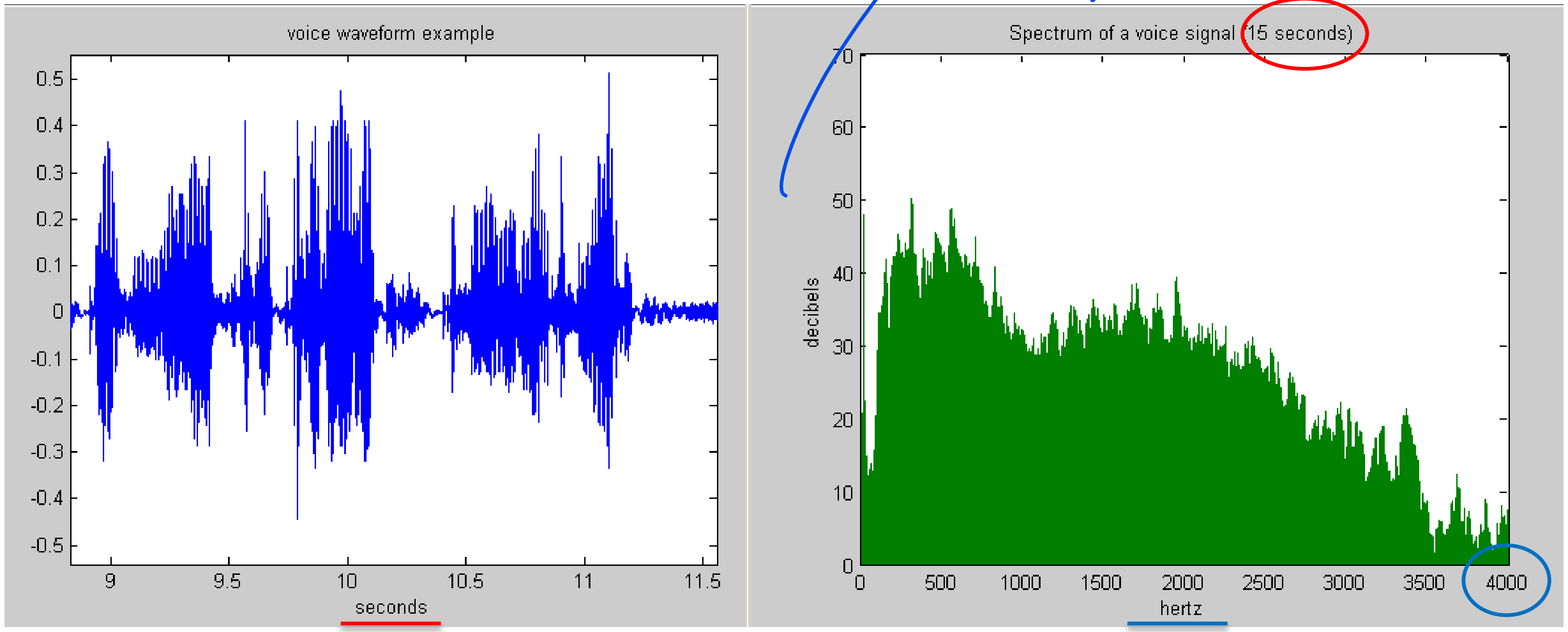
- fundamental
- 1/3 tercera armónica
- 1/5 quinta armónica
- 1/7 séptima armónica
- 1/9 novena armónica
- Etc...



Experimentos web interactivos:
http://www.intmath.com/fourier-series/fourier-graph-applet.php
http://betterexplained.com/articles/an-interactive-guide-to-the-fourier-transform/

Una señal vocal

Alguna función de la amplitud de los armónicos. $\sum \sqrt{a_n^2+b_n^2}$.



Frecuencias de los armónicos

En el dominio del tiempo y de la frecuencia

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Voice_waveform_and_spectrum.png

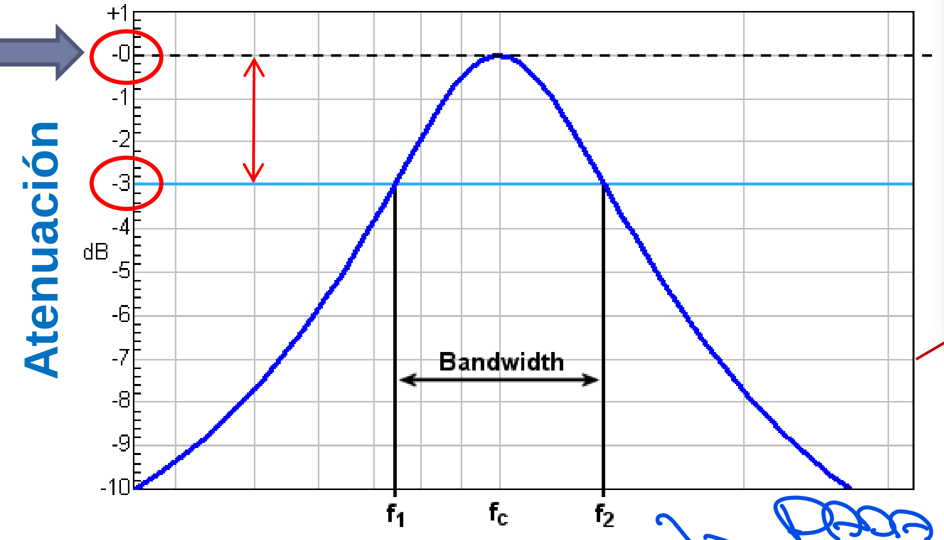
• ES UNA PROPIEDAD DEL MEDIO POR DONDE VA A VIAJAR LA SEÑAL.

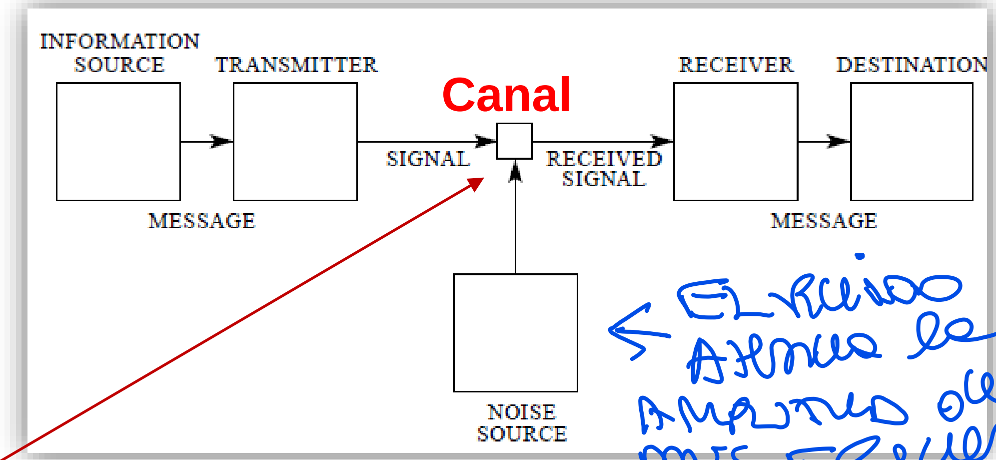
Ancho de Banda

- “Experimento” en el pizarrón con una señal senoidal.

Canal (medio de transmisión)

Sin atenuar



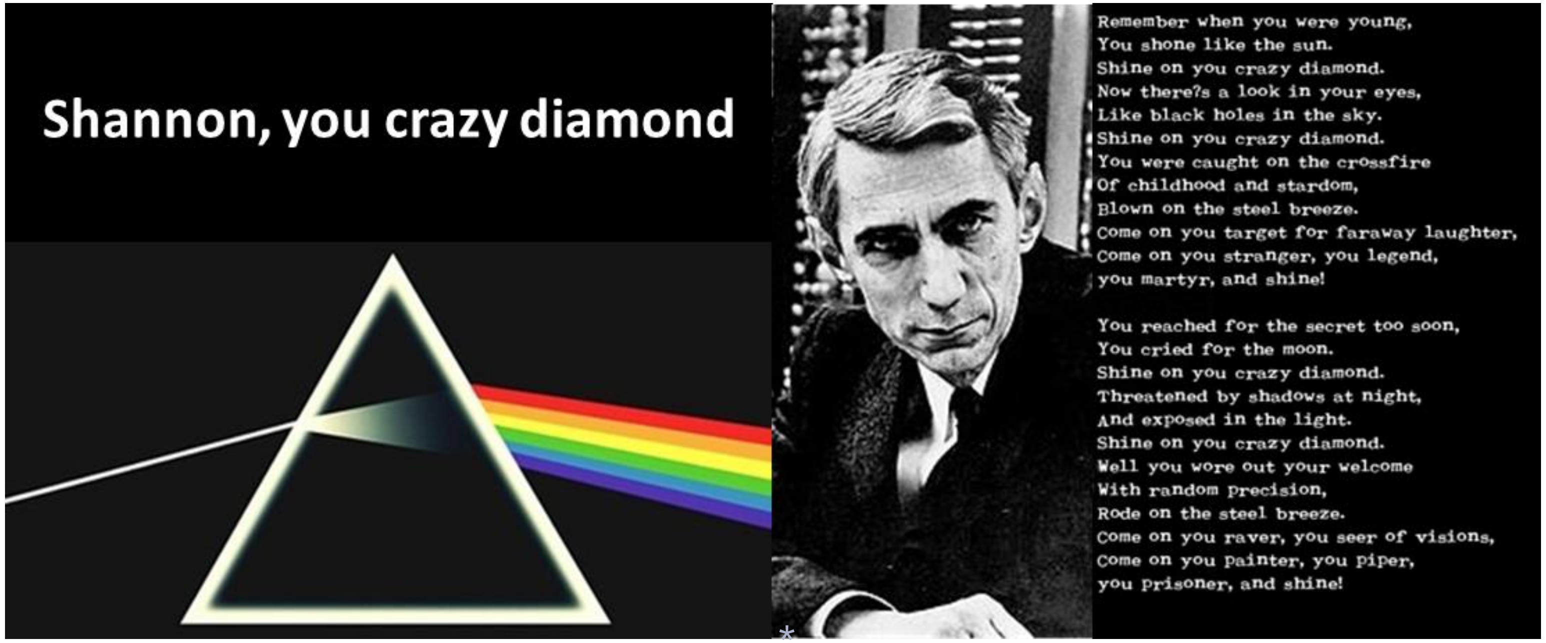


← EL RUIDO ATENÚA LA AMPLITUD DE MIS FRECUENCIAS A PARTIR DE ALGÚN MOMENTO.

→ PARA UNA FRECUENCIA ENTRE FC1, EL ANCHO DE BANDA, ES EL ANCHO DEL INTERVALO DE LAS FRECUENCIAS QUE PUEDEN PASAR POR EL CANAL SIN SER SIGNIFICATIVAMENTE ATENUADAS (O SEA, SU AMPLITUD NO SE REDUCE MÁS DE 3dB).

Formalmente la **frecuencia de corte** es donde se produce una **atenuación de 3dB**

Figura: http://es.wikipedia.org/wiki/Ancho_de_banda



Claude Shannon

• AMPLITUD BAJA

⇓

• máxima frecuencia que pasa x el canal es baja

⇓

como cada ciclo es 1 bit, si tengo poca frecuencia ⇒ puedo enviar pocos ciclos por seg ⇒ puedo enviar pocos bits por segundo.

Ancho de Banda

Teoría de la Información

• Ingeniero: (Hz). Limita la max. frecuencia que puedo pasar x canal sin ser muy atenuada

Introducción

• CS (Bits/seg) (30MB). Aplico el = concepto a una señal discreta que representa bits. ⇒ Bits/seg = ciclos/seg = Hz.

ambos vistos son lo mismo!

Libro cabecera:
Norman Abramson. Teoría de la Información y la Codificación, 5ta. Ed., 1981

ABRAMSON

Como llegamos a la Teoría de la Información

Information Theory

- Hartley RVL. 1928. *Transmission of information*. The Bell System Technical Journal. 7(3): 535-563
- Shannon CE. 1948. *A mathematical theory of communication*. The Bell System Technical Journal. 27(3): 379-423 https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
- Shannon CE. 1948. *A mathematical theory of communication*. The Bell System Technical Journal. 27(4): 623-656 https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x
- Shannon CE. 1949. *Communication theory of secrecy systems*. The Bell System Technical Journal. 28(4): 656-715

Transmission of Information[1]

By R. V. L. HARTLEY

SYNOPSIS: A quantitative measure of "information" is developed which is based on physical as contrasted with psychological considerations. How the rate of transmission of this information over a system is limited by the distortion resulting from storage of energy is discussed from the transient viewpoint. The relation between the transient and steady state viewpoints is reviewed. It is shown that when the storage of energy is used to restrict the steady state transmission to a limited range of frequencies the amount of information that can be transmitted is proportional to the product of the width of the frequency-range by the time it is available. Several illustrations of the application of this principle to practical systems are included. In the case of picture transmission and television the spacial variation of intensity is analyzed by a steady state method analogous to that commonly used for variations with time.

Nyquist, H. (1922) Certain factors affecting telegraph speed. Bell System Technical Journal 3, pp.~324--346.

Nyquist, H. (1928) Certain topics in telegraph transmission theory. Trans. Am. Inst. Elec. Eng. 47, pp.~617--644.

Shannon, paper de Bell Labs (1948)

A Mathematical Theory of Communication

By C. E. SHANNON

INTRODUCTION

THE recent development of various methods of modulation such as PCM and PPM which exchange bandwidth for signal-to-noise ratio has intensified the interest in a general theory of communication. A basis for such a theory is contained in the important papers of Nyquist[1] and Hartley[2] on this subject. In the present paper we will extend the theory to include a number of new factors, in particular the effect of noise in the channel, and the savings possible due to the statistical structure of the original message and due to the nature of the final destination of the information.

The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point. Frequently the messages have *meaning*; that is they refer to or are correlated according to some system with certain physical or conceptual entities. These semantic aspects of communication are irrelevant to the engineering problem. The significant aspect is that the actual message is one *selected from a set* of possible messages. The system must be designed to operate for each possible selection, not just the one which will actually be chosen since this is unknown at the time of design.

If the number of messages in the set is finite then this number or any monotonic function of this number can be regarded as a measure of the information produced when one message is chosen from the set, all choices being equally likely. As was pointed out by Hartley the most natural choice is the logarithmic function. Although this definition must be generalized considerably when we consider the influence of the statistics of the message and when we have a continuous range of messages, we will in all cases use an essentially logarithmic measure.

A mathematical theory of communication
CE Shannon - ACM SIGMOBILE Mobile Computing and ..., 2001 - dl.acm.org
T HE recent development of various methods of modulation such as PCM and PPM which exchange band-width for signal-to-noise ratio has intensified the interest in a general theory of communication. A basis for such a theory is contained in the important papers of Nyquist 1
☆ 99 Citado por 104583 Artículos relacionados Las 605 versiones

google scholar 2018: 104583 citas

1948: A MATHEMATICAL THEORY OF COMMUNICATION

- Desarrollado a lo largo de los años de guerra, pero publicado en 1948, el documento de Shannon establece las bases para las comunicaciones digitales.
- Shannon argumentaba que todas las comunicaciones podían ser pensadas de la misma manera, ya fueran la radio, la televisión o el teléfono.
  - Todos los mensajes, independientemente del canal, estaban potencialmente en riesgo de una entrega incorrecta debido al ruido.
- La clave para superar el ruido y, por lo tanto, asegurar la entrega confiable de mensajes era estudiar **la información** contenida en el mensaje.
- Shannon escribió que el significado semántico de un mensaje era irrelevante para su transmisión.
  - Un mensaje debe ser concebido como una secuencia con propiedades estadísticas.
  - Son las estadísticas del mensaje las que podrían ser capturadas y su codificación minimizada para permitir una transmisión efectiva.
  - Cuanto mayor es la **entropía** del mensaje, más **esfuerzo** se necesita para transmitirlo.

Teoría de la Información

- Claude Shannon estableció la

  Teoría Clásica de la Información

- También llamada teoría estadística de la información
  - Otra sería la teoría algorítmica de la información (Chaitín y otros)

Dos Teoremas Fundacionales:

1. Codificación para una **fuente sin ruido**
2. Codificación para un **canal ruidoso**

Teoría de Shannon

ver

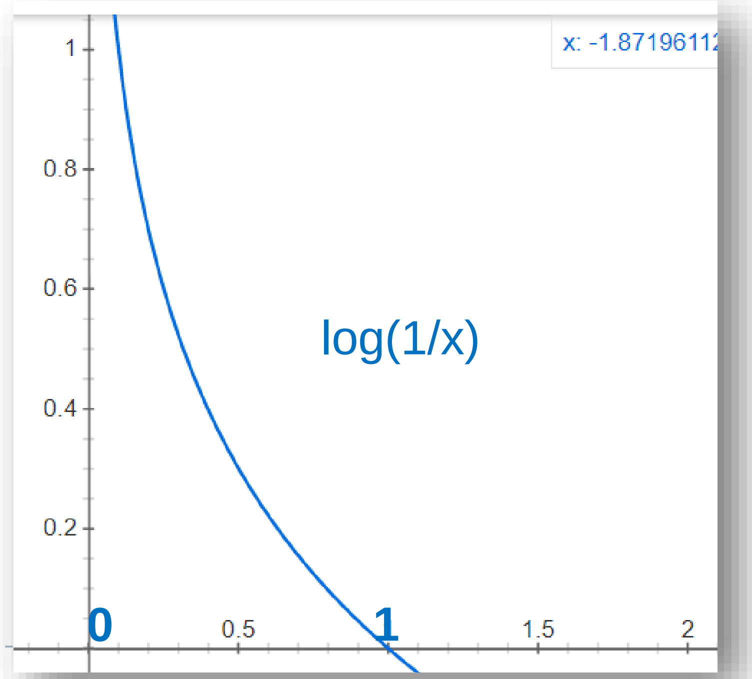
- Uno de ellos describe la máxima eficiencia posible de un método de corrección de errores (codificación) frente a los niveles de ruido y de corrupción de los datos.
  - No dice nada sobre como implementar dicha codificación.
  - Pero brinda un límite teórico absoluto para la transmisión de bits (basándose en la Ley de los Grandes Números)

Información

Definición. Sea E un suceso que puede presentarse con probabilidad $P(E)$. Cuando E tiene lugar, decimos que hemos recibido

$$I(E) = \log \frac{1}{P(E)}$$

unidades de información.



↓ PROBA(E) ↑ PROBA(E)

↑ INFO(E). ↓ INFO(E).

Información: unidades

Si introducimos el logaritmo de base 2, la unidad correspondiente se denomina *bit* *

$$\boxed{I(E) = \log_2 \frac{1}{P(E)} \qquad \text{bits}} \qquad (2\text{-}3a)$$

Empleando logaritmos naturales, la unidad de información recibe el nombre de *nat* **.

$$I(E) = \ln \frac{1}{P(E)} \qquad \text{nats} \qquad (2\text{-}3b)$$

En el caso de logaritmos de base 10, la unidad de información es el Hartley. R. V. Hartley fue quien primero sugirió la medida logarítmica de la información (Hartley, 1928).

$$I(E) = \log_{10} \frac{1}{P(E)} \qquad \text{Hartleys} \qquad (2\text{-}3c)$$

1 Bit – Alguien sabe que es ?

$P(E) = \frac{1}{2} \Rightarrow I(E) = \log_2 \frac{1}{P(E)} = \log_2 2 = 1$ Bit. de información.

Notemos, también, que si $P(E) = 1/2$, será $I(E) = 1$ bit. Es decir, *un bit es la cantidad de información obtenida al especificar una de dos posibles alternativas igualmente probables.* Esta situación se presenta al lanzar una moneda al aire o al examinar la salida de un sistema de comunicación binario.

Fuente de memoria nula → Genera símbolos de un alfabeto finito S de forma independiente.

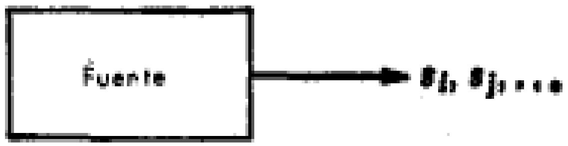


FIG. 2-1. Fuente de información.

Imaginemos la fuente emitiendo una secuencia de símbolos pertenecientes a un alfabeto finito y fijo, $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_q\}$. Los símbolos emitidos sucesivamente se eligen de acuerdo con una ley fija de probabilidad. Ocasionalmente nos referimos a la fuente misma como S; sin que esto deba dar lugar a confusión. En la fuente más sencilla admitiremos que los símbolos emitidos son estadísticamente independientes. Tal fuente de información se conoce como *fuente de memoria nula* y puede describirse completamente mediante el alfabeto fuente S y las probabilidades con que los símbolos se presentan:

$$P(s_1),\ P(s_2),\ \ldots,\ P(s_q)$$

Memoria nula (cont)

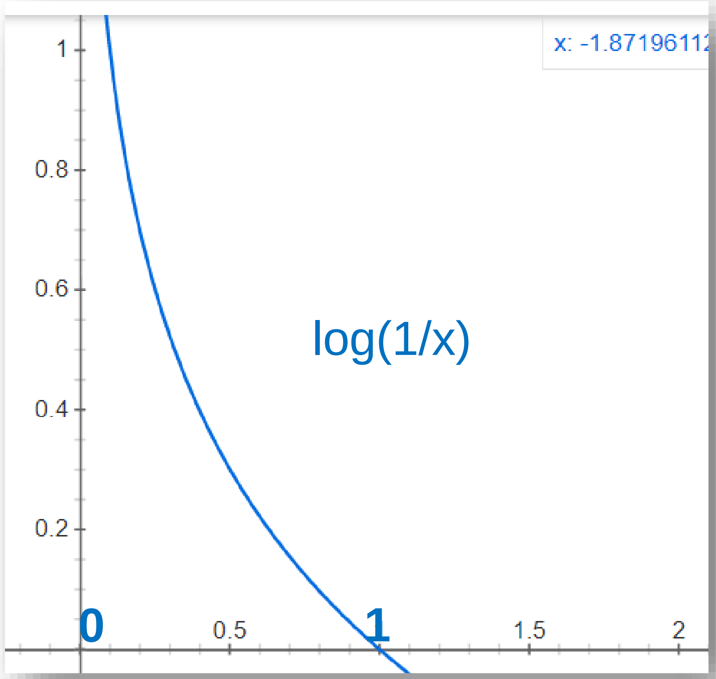
Puede calcularse la información media suministrada por una fuente de información de memoria nula en la forma siguiente: La presencia de un símbolo s_i corresponde a una cantidad de información igual a

$$I(s_i) = \log \frac{1}{P(s_i)} \quad \text{bits}$$

Sea I = "Info que voy a obtener en el siguiente símbolo sacado de la fuente"

$$E[I] = \sum_{s \in S} I(s) \cdot P(s) = \sum_{s} P(s) \cdot \log_2 \frac{1}{P(s)}$$

= Entropía de la fuente



Entropía

Para un símbolo s_i :

La probabilidad de que aparezca es precisamente $P(s_i)$, de modo que la cantidad *media* de informació⁻ por símbolo de la fuente es

$$\sum_{S} P(s_i)\, I(s_i) \quad \text{bits}$$

donde $\sum_{S}$ indica la suma extendida a q símbolos de la fuente S. Esta magnitud, cantidad media de información por símbolo de la fuente, recibe el nombre de *entropía* $H(S)$ de la fuente de memoria nula *.

$$H(S) \triangleq \sum_{S} P(s_i) \log \frac{1}{P(s_i)} \quad \text{bits} \qquad (2\text{-}5a)$$

Entropía (cont)

- Entropía de una fuente S de n mensajes s_i :

$$H(S) = \sum_{i=1}^{n} p(s_i).\log\frac{1}{p(s_i)} = -\sum_{i=1}^{n} p(s_i).\log p(s_i) = E[\text{información obtenida}]$$

- Interpretaciones de H(S)
  - el *valor medio ponderado* de la cantidad de información del conjunto de mensajes posibles.
  - una medida de la incertidumbre promedio (grado de incerteza) acerca de una variable aleatoria
  - la cantidad de información obtenida al observar la aparición de cada nuevo símbolo

↑ H(S)
↑ info
⇒ VA tiene más incertidumbre

En promedio.

Entropía: Fuente Binaria

Caso especial: Zero-memory binary source $S=\{0,1\}$ $P(0)=\omega$, $P(1)=1-\omega$

$H(S)=\omega\cdot\log\frac{1}{\omega}+\bar{\omega}\log\frac{1}{\bar{\omega}}$.

Simplemente lo notamos $H(\omega)$.

Notemos que si $\omega=\frac{1}{2}$ la entropía es max.

Si $\omega=0$ ó 1 $H(\omega)=0$. $\Rightarrow$ no obtengo info. de la fuente.

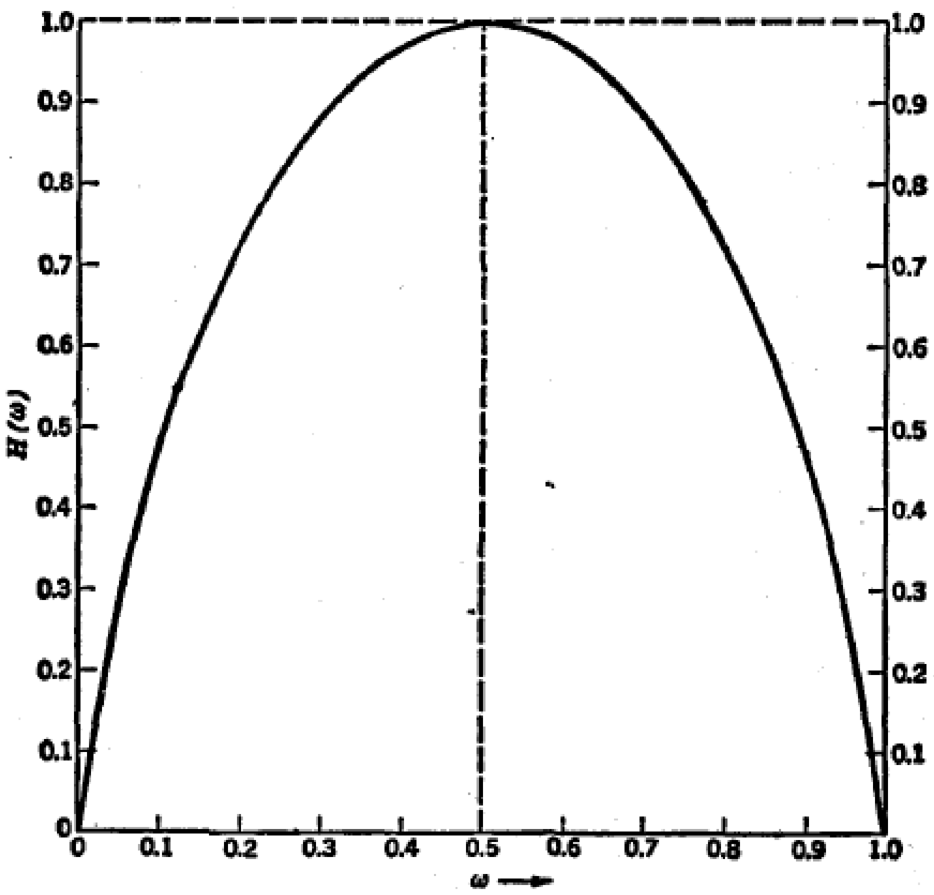


FIG. 2-3. $H(\omega)$, función entropía.

Propiedades de la entropía

- a) La entropía es no negativa y se anula si y solo si un estado de la variable es igual a 1 y el resto 0.
- b) La entropía es máxima (mayor incertidumbre del mensaje) cuando todos los valores posibles de la variable **s** son equiprobables.

c) Si hay **n** estados equiprobables, entonces $p_i = 1/n$ y se cumple: $\mathbf{H(S)} = -\sum p_i \log_2 p_i = -n\,(1/n)\log_2 (1/n) =$

$$= -(\log_2 1 - \log_2 n) = \mathbf{\log_2 n = H(S)_{máx}}$$

Ejemplo 2-1. Consideremos la fuente $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ con $P(s_1) = 1/2$ y $P(s_2) = P(s_3) = 1/4$. Entonces

$$H(S) = 1/2 \log 2 + 1/4 \log 4 + 1/4 \log 4$$
$$= 3/2 \text{ bits}$$

Extensión de una Fuente de Memoria Nula

nera

$$\boxed{H(S^n) = n\,H(S)} \qquad (2\text{-}18)$$

Ejemplo 2-2. Consideremos la extensión de segundo orden de la fuente del ejemplo 2-1. Recordemos que la fuente tenía un alfabeto $S = \{s_1, s_2, s_3\}$, con $P(s_1) = 1/2$ y $P(s_2) = P(s_3) = 1/4$. Así la fuente S^2 tendrá los nueve símbolos siguientes:

Símbolos de S^2	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9
Secuencia correspondiente a los símbolos de S	s_1s_1	s_1s_2	s_1s_3	s_2s_1	s_2s_2	s_2s_3	s_3s_1	s_3s_2	s_3s_3
Probabilidad $P(\sigma_i)$	1/4	1/8	1/8	1/8	1/16	1/16	1/8	1/16	1/16

$$H(S^2) = \sum_{S^2} P(\sigma_i) \log \frac{1}{P(\sigma_i)}$$

$$= 1/4 \log 4 + 4 \times 1/8 \log 8 + 4 \times 1/16 \log 16$$

$$= 3 \text{ bits/símbolo}$$

SOURCE ALPHABET $S = \{S_0, S_1, \dots, S_m\}$
$= \{'A', 'B', 'C', \dots\}$

CODE ALPHABET $X = \{X_0, \dots, X_n\} = \{0,1\}$

CODE : SEQUENCES SYMBOLS S $\longrightarrow$ SEQUENCES OF SYMBOLS X

MAPPING

→ DEMASIADO general! pongamos RESTRICCIONES al CODE.

Photo: © Stanley Rowin

Teoría de la Información

Codificación

* Claude Shannon

Codificación

- Proceso para establecer una correspondencia entre los símbolos de una fuente y los símbolos de un alfabeto de un código

- Proceso mediante el cual también podemos lograr una representación **eficiente** de la información (eliminar redundancia)

Codificación: condiciones

MAPEA CADA SIMBOLO DE S A UNA SECUENCIA
DE SIMBOLOS DE X. POR EJEMPLO

- Bloque →
- Singular
- Separable (unívocamente decodificable)

S_0 00
S_1 10 CODE WORDS
S_2 11
S_3 01.

SOURCE
SYMBOLS

Condición de los prefijos

- La condición *necesaria y suficiente* para que un código sea *instantáneo* es que sus palabras cumplan la condición de los prefijos:
  - Que no exista palabra que sea prefijo de otra palabra de longitud mayor.

Solución:

Códigos eficientes

- Asignar palabras más cortas a símbolos más probables
  - L_i : longitud de la palabra codificada del **mensaje m_i**
  - **r** : # de símbolos del **alfabeto del código**
  - p_i **:** probabilidad de aparición del símbolo i
- $L = \sum p_i L_i$: Longitud media de un código
- $L \log r \geq H(s)$
  - Y para la una fuente binaria?
- log r : Cantidad promedio máxima de información de un símbolo del código
- **$h = H(S) / (L \log r)$** Eficiencia del código (max.=1)

Consideremos un código instantáneo con un alfabeto fuente

$$S = \{s_1, s_2, \ldots, s_q\}$$

y un alfabeto código $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_r\}$. Sean $X_1, X_2, \ldots, X_q$ las palabras del código y, por definición, l_i la longitud (es decir, el número de símbolos del código) de la palabra X_i. Normalmente es interesante que las longitudes de las palabras del código sean lo más cortas posible. La condición necesaria y suficiente para que exista un código instantáneo con palabras de longitud $l_1, l_2, \ldots, l_q$, viene definida por la *inecuación de Kraft* (Kraft, 1949).

La condición necesaria y suficiente para la existencia de un código instantáneo de longitudes $l_1, l_2, \ldots, l_q$ es que

$$\sum_{i=1}^{q} r^{-l_i} \leq 1$$

donde r es el número de símbolos diferentes que constituyen el alfabeto código.

En el caso de alfabeto binario, la inecuación de Kraft se transforma en

$$\sum_{i=1}^{q} 2^{-l_i} \leq 1 \qquad (3\text{-}3)$$

donde la suma se extiende a todas las palabras del código bloque. An-

Codificador óptimo

Nos falta encontrar el segundo término pendiente en la definición de cantidad de información: *codificador óptimo*.

Introduciendo el signo negativo dentro del logaritmo en la expresión de la entropía, ésta nos quedará como:

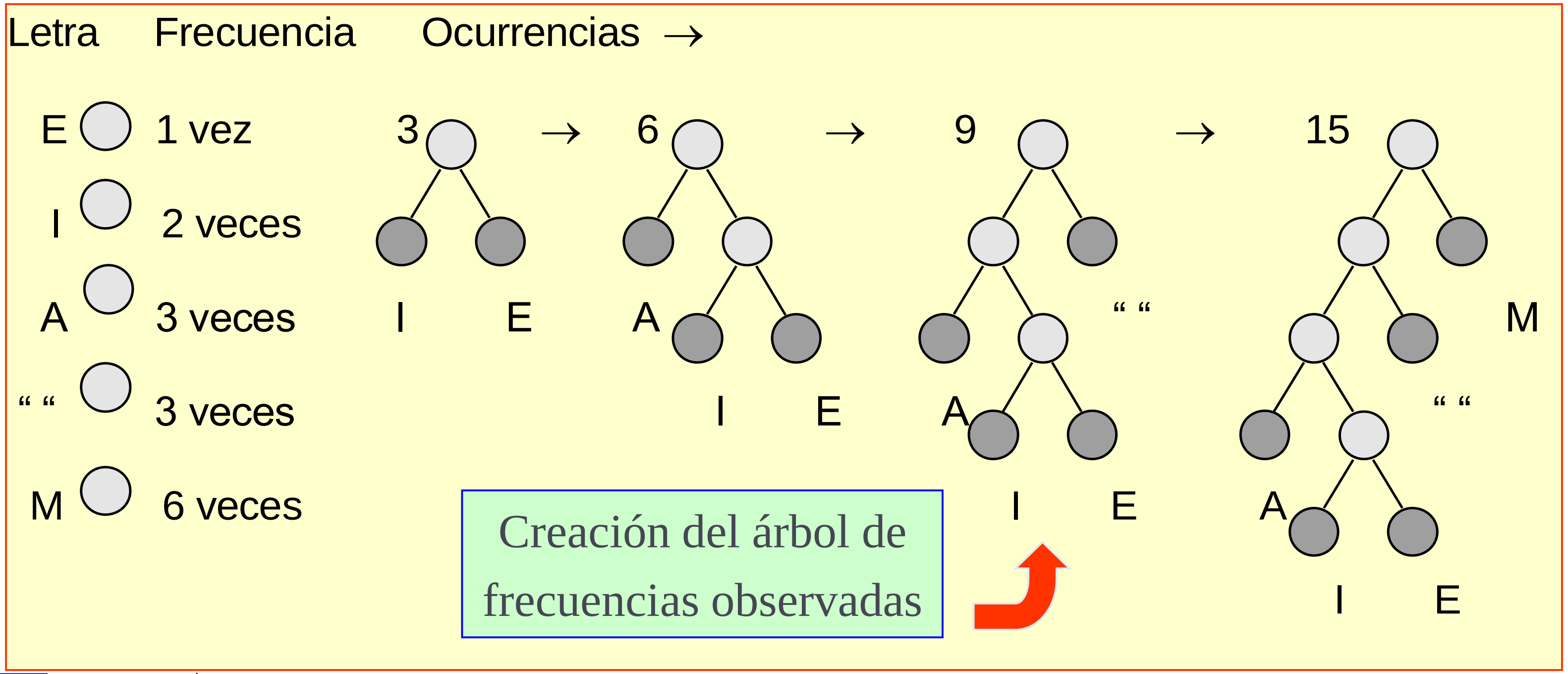
$$\boxed{H(X) = \Sigma\ p(x_i)\ .\ \log_2 [1/p(x_i)]}$$

- La expresión $\log_2[1/p(x_i)]$ representa el número de bits necesario para codificar el símbolo x_i en un Codificador Óptimo para el mensaje X

- Un Codificador Óptimo es aquel que para codificar un mensaje X usa el menor número posible de bits ("dígitos binarios").

Codificación de Huffman

Mensaje: MI MAMA ME MIMA → 15 símbolos



Código óptimo: M = 1 " " = 01 A = 000 I = 0010 E = 0011

Mensaje: 1 0010 01 1 000 1 000 01 1 0011 01 1 0010 1 000 (33 bits)

Pregunta: ¿Con cuántos bits se codificaría si se usara ASCII? Saque conclusiones.

El canal x donde viaje la señal tiene ruido! ⇒ distorsiona mi señal.

Ya vimos ancho de banda. Pero que mas??

Los medios de transmisión **reales**

Sus perturbaciones y no idealidades

Modelo de un Sistema de Comunicaciones

Sistema de Comunicación ideal:

Modelo de un Sistema de Comunicaciones

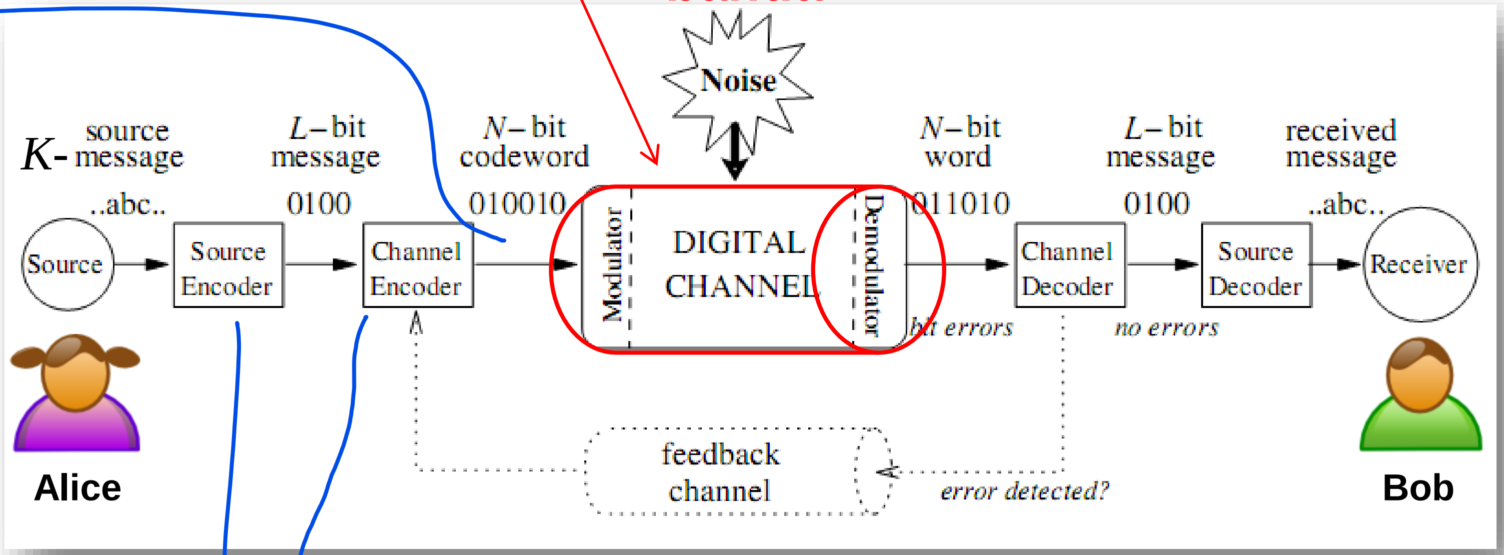
Sistema de Comunicación <u>real</u>:

Canal sometido a ruido, limitado en potencia y en ancho de banda

generador de señal.

¡Fuente! Emite símbolos con probabilidades.

El mensaje contiene información.



¿Cómo codifico el mensaje con 0 y 1 de forma óptima? codificación.

→

Perturbaciones en la transmisión

- La señal recibida puede diferir de la señal transmitida
- Analógico - degradación de la calidad de la señal
- Digital - errores de bits
- Causado por
  - Atenuación y distorsión de atenuación
  - Distorsión de retardo
  - Ruido

Atenuación

- La intensidad de la señal disminuye con la distancia
- Depende del medio
- La intensidad de la señal recibida:
  - Debe ser suficiente para que se detecte
  - Debe ser suficientemente mayor que el ruido para que se reciba sin error
  - Se ve más afectada a mayores frecuencias
- Ecualización: amplificar más las frecuencias más altas
- Problema “menos grave” para las señales digitales

Distorsión de retardo

- Solo en medios guiados
- La velocidad de propagación en el medio varía con la frecuencia
- Las componentes de frecuencia llegan al receptor en distintos instantes de tiempo, originando desplazamientos de fase entre las distintas frecuencias
- Para una señal limitada en frecuencia, la velocidad es mayor cerca de la frecuencia central

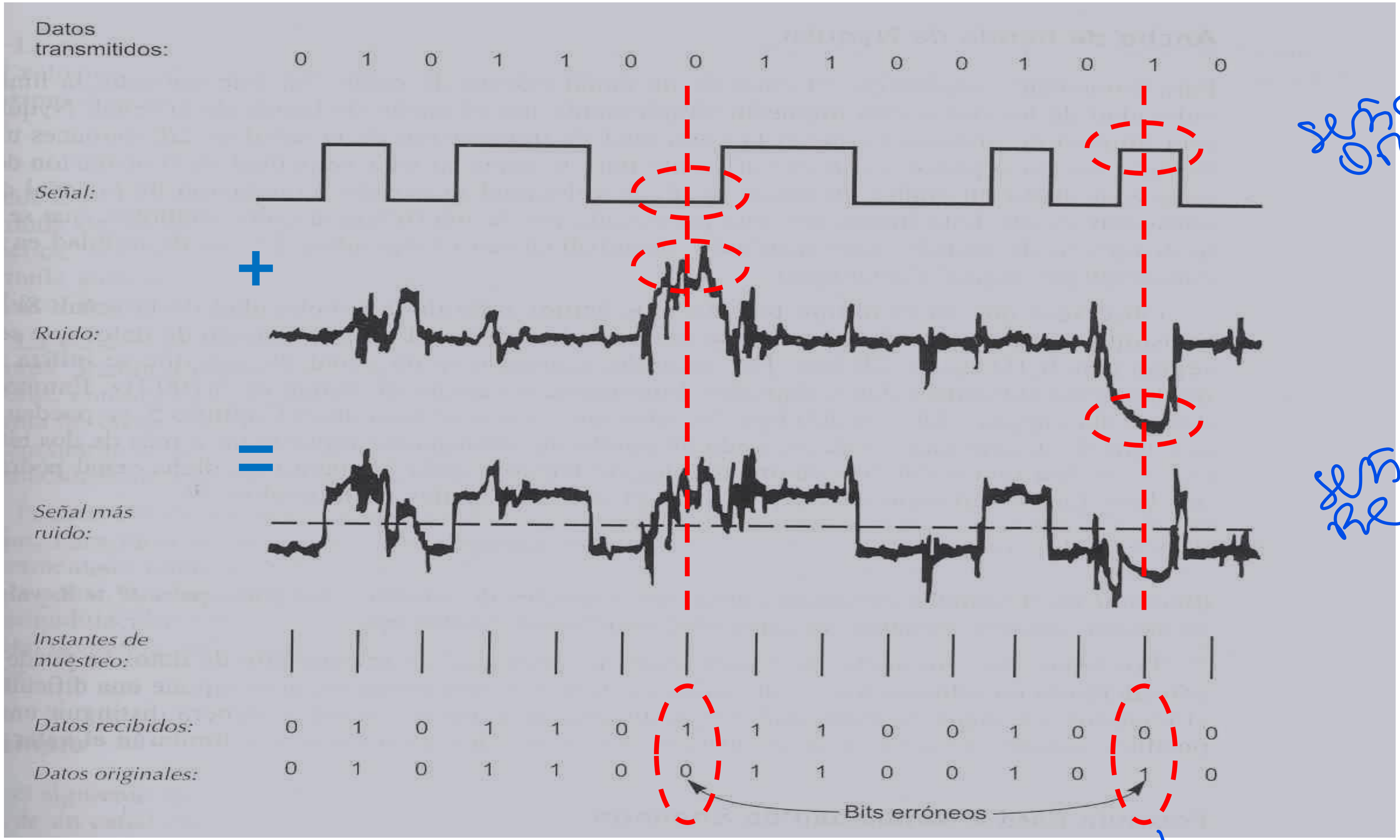
Ruido (1)

- Señales adicionales insertadas entre el transmisor y el receptor
- Ruido Térmico
  - Debido a la agitación térmica de los electrones
  - Aumenta linealmente con la temperatura absoluta
  - **Densidad** Espectral de **Potencia** de Ruido ($N_0=k.T$)
  - Uniformemente distribuido en la frecuencia =>
    - Potencia Total del **Ruido Blanco** para un Ancho de Banda B:
      $\mathbf{N_B} = N_0.\mathbf{B} = k.T.\mathbf{B}$
- Ruido por Intermodulación
  - Señales que son la suma y la diferencia de frecuencias originales y sus múltiplos ($m.f_1 \pm n.f_2$)
  - Se produce por falta de linealidad en el canal

Ruido (2)

- Ruido por Diafonía
  - Una señal de una línea interfiere en otra
- Ruido Impulsivo
  - Impulsos irregulares o picos
  - Ej: Interferencia electromagnética externa (tormenta)
    - Corta duración
    - Gran amplitud
    - Disruptivo

Efecto del ruido en señal digital



señal original

señal recibida.

Conceptos relacionados con la capacidad del canal

- Velocidad de transmisión de datos **C**
  - En bits por segundo
- Ancho de Banda **B**
  - En ciclos por segundo (Hertz)
  - Limitado por el transmisor y el medio
- Ruido **N**
  - Nivel medio a través del canal de transmisión
- Tasa de errores **BER**
  - Cambiar 0 por 1, o viceversa
  - Cantidad de veces que esto sucede por unidad de tiempo
  - BER: Bit Error Rate

Ancho de Banda de Nyquist (Capacidad teórica máxima sin ruido)

Para símbolos de 2 niveles SIN RUIDO

- Velocidad binaria

$$C(bps) = 2B(Hz)$$

Para símbolos de M niveles SIN RUIDO

- Velocidad binaria

$$C(bps) = 2B(Hz)\log_2 M$$

- *1 Baudio = 1 estado señalización/seg (también se expresa símbolos/seg)*
- *1 Baudio = 1 bps si M=2, 2 bps si M=4, etc.*
- *La relación entre la* ***velocidad de transmisión C*** *y la* ***velocidad de modulación V*** *es:*

$$C(bps) = V(baudios)\cdot\log_2 M$$

$$C(bps) = V\cdot\log_2 M = 2\cdot B\cdot\log_2 M = B\cdot\log_2 M^2$$

Nyquist, H., “Certain Factors Affecting Telegraph Speed,” *Bell System Technical Journal,* April 1924, p. 324; “Topics in Telegraph Transmission Theory,” *A.I.E.E. Trans.,* v. 47, April 1928, p. 617.

Capacidad de Shannon (1)

- Para un cierto Nivel de Ruido, a mayor velocidad C:
  - menor período de un bit
  - mayor tasa de error (se pueden corromper 2 bits en el tiempo en que antes se corrompía 1 bit)
- Relación Señal a Ruido (Signal-Noise Ratio, SNR):

$$SNR_{dB} = 10\log_{10}(SNR) = 10\log_{10}\frac{Potencia\_Señal}{Potencia\_Ruido}$$

- Veamos:

Capacidad de Shannon (2)

- En principio, si se aumentan el ancho de banda ***B*** y la potencia de señal ***S***, aumenta la velocidad binaria ***C***
- Pero: Relación de compromiso
  - Un aumento del ancho de banda ***B*** aumenta el ruido — Pues el ruido está en todas las frecuencias
  - Un aumento de potencia de señal ***S*** aumenta las no linealidades y el ruido de intermodulación — Otros ruidos.
- Según Shannon, la velocidad binaria teórica máxima para un canal será:

Capacidad máxima en (bps) del canal.

$$\boxed{C_{máx}(bps) = B(Hz)\cdot\log_2(1+SNR)}$$

Ancho de banda del canal

Relación señal-ruido

Capacidad de Shannon (3)

- por Nyquist:

$$C(bps) = V \cdot \log_2 M = 2 \cdot B \cdot \log_2 M = B \cdot \log_2 M^2$$

- por Shannon:

$$C_{máx}(bps) = B \cdot \log_2(1 + SNR)$$

- => Restricción:
  No se podrá aumentar *M* tanto como se quiera:

$$M \leq \sqrt{1 + SNR}$$

Ejemplo

- Canal entre 3 MHz y 4 MHz
- Relación señal ruido = 24 dB, $SNR=10^{(24/10)}=251$

Calcular ancho de banda

- Respuesta: $\boldsymbol{B}$ = 1 MHz

Calcular la velocidad binaria teórica máxima y el número de niveles

- Respuesta: $\boldsymbol{C}$ = 8 Mbps
- Respuesta: $\boldsymbol{M}$ = 16 niveles

Visión integradora de la Teoría de la Información

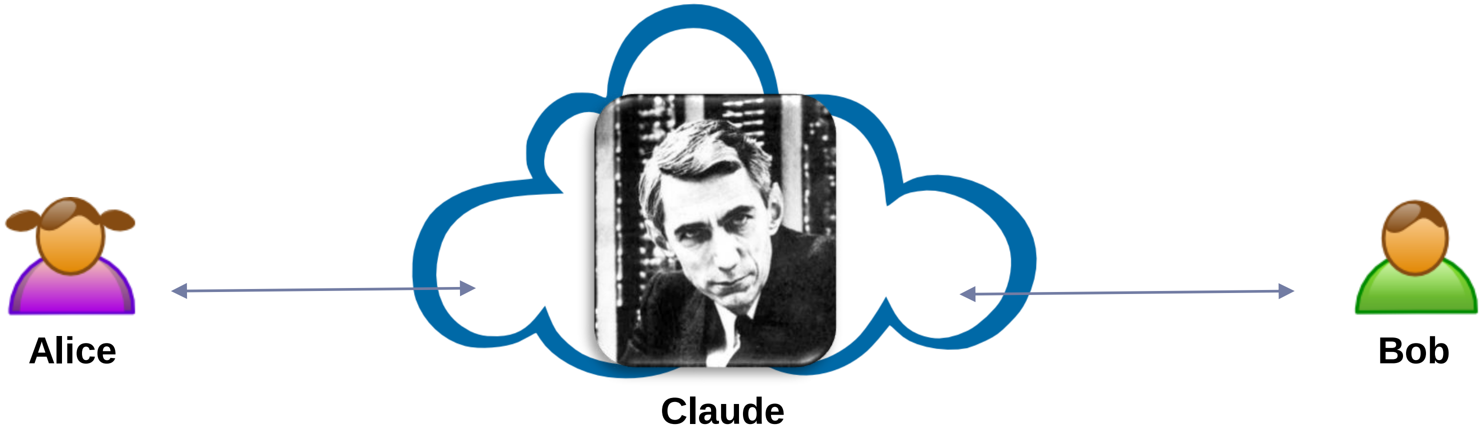
- "Límites fundamentales" y "Resultados no intuitivos"

  - ¿Cual es la complejidad irreducible por debajo de la cual una señal que debe ser transmitida no puede ser compactada sin pérdida de información?
    (límite de la **eficiencia**)

  - ¿Cual es el límite absoluto de la tasa de transmisión utilizada para transportar una señal de manera confiable a través de un canal ruidoso?
    (límite de la **confiabilidad**)

- Estos aspectos se reflejan en aplicaciones prácticas.

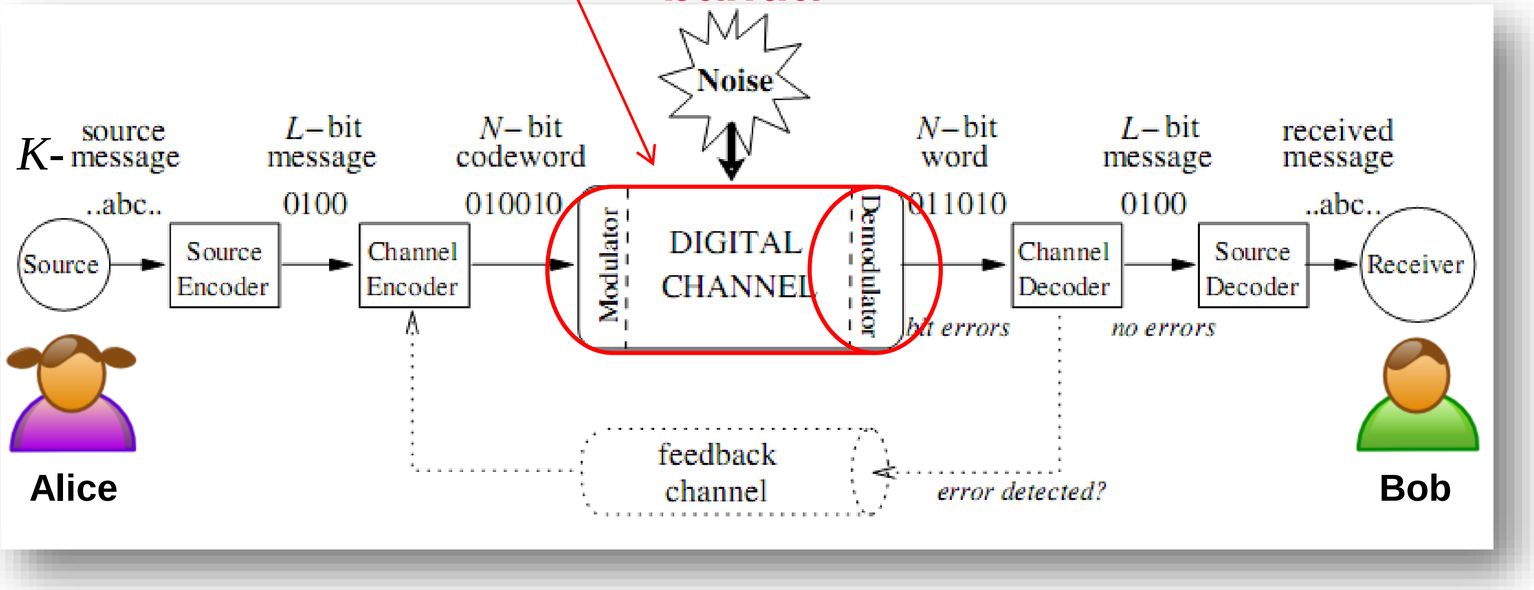
Marco de Referencia



Marco de Referencia

Sistema de Comunicación <u>real</u>:

Canal sometido a ruido, limitado en potencia y en ancho de banda



Marco de Referencia

3° Teorema de Codificación de Canal

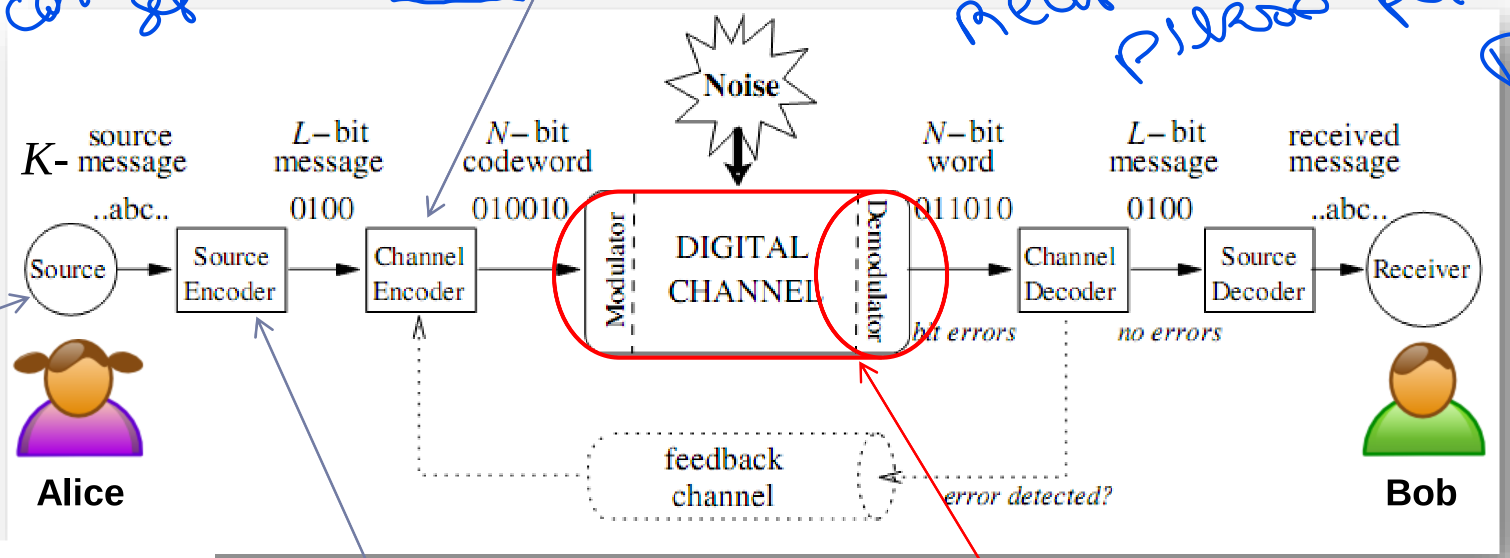
Comunicación **Confiable** (error bajo control)

$$\boxed{\frac{H(S)}{T_s}} \leq \frac{C}{T_c}$$

Cuanta info meto en el canal por segundo.

Si supero, la comunicación no es confiable. No puedo recuperar la info que se pierde por el ruido.

Si no lo supero, puedo lograr los errores controlados



1° Conceptos Básicos

$$I = log_2(\frac{1}{p_k})$$

$$H = \sum_{k=0}^{K-1} p_k . log_2(\frac{1}{p_k})$$

Información y Entropía

$0 \leq H(S) \leq log_2 K$

$$\bar{L} \geq H(S)$$

2° Teorema de Codificación de Fuente

Comunicación **Eficiente**

$$C = B.log_2(1 + \frac{S}{N})$$

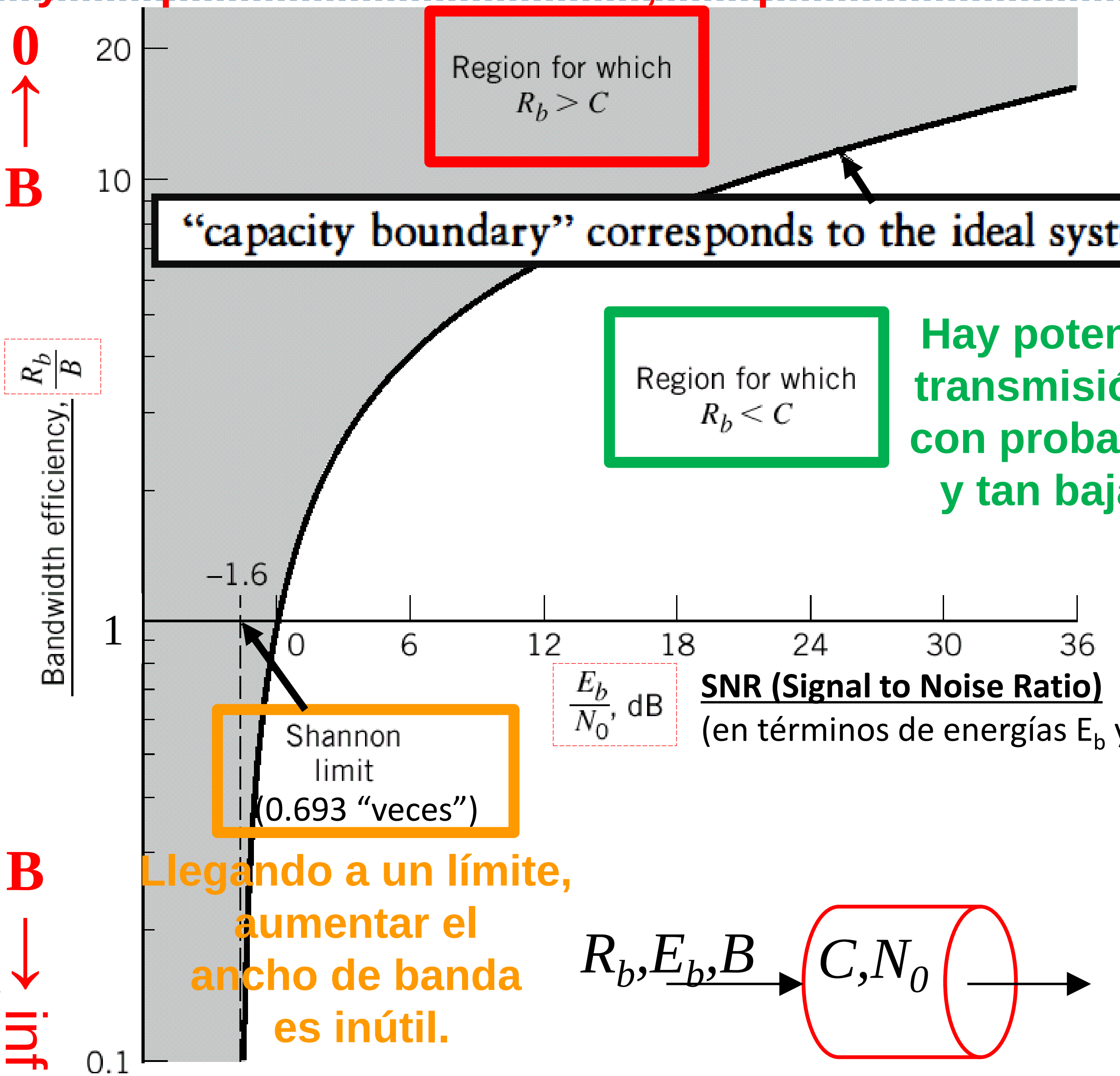
4° Teorema de Capacidad de Información

Compromiso Ancho de banda vs. Relación Señal a Ruido

Diagrama de "Eficiencia del Ancho de Banda"

Válido para cualquier algoritmo que se use para la Codificación y Decodificación de canal.

El sistema está condenado a tener una muy alta probabilidad de errores, sin posibilidad de control.



Hay potencial para soportar transmisión libre de errores con probabilidad controlada y tan baja como se desee.

SNR (Signal to Noise Ratio)
(en términos de energías E_b y N_o, no de Potencias S y N)

R_b, E_b, B → C, N_0 →

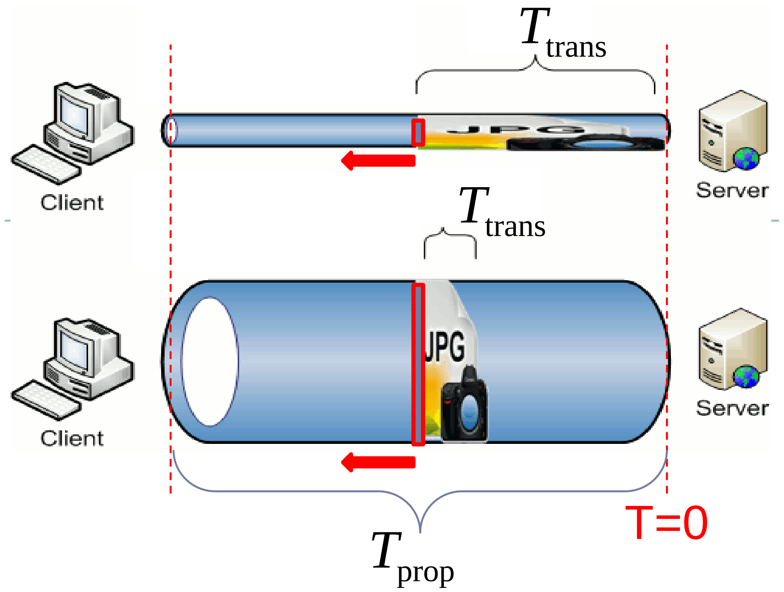
$$\frac{C}{B} = \log_2\left(1 + \frac{E_b}{N_0}\frac{C}{B}\right)$$

S

N

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{C/B} - 1}{C/B}$$

Delay (retardo total)



- T_{prop} = retardo de propagación
  - Desde unos pocos microsegundos hasta a cientos de milisegundos. *Significativo para enlaces muy distantes.*
- T_{trans} = retardo de transmisión
  - = Tamaño Trama / Velocidad de transmisión *Significativo para enlaces de baja velocidad (o tramas muy grandes)*
- T_{encol} = retardo de encolamiento
  - Depende de la congestión. Desde nulo hasta gigante.
- T_{proc} = retardo de procesamiento
  - Normalmente unos pocos microsegundos o menos.

$$\boxed{Delay = T_{total} = T_{prop} + T_{trans} + T_{encol} + T_{proc}}$$

Extras

Retardo de Procesamiento

- Tiempo requerido en analizar el encabezado y decidir a dónde enviar el paquete (ej. decisión de enrutamiento)
  - En un enrutador, dependerá del número de entradas en la tabla de rutas, la implementación (estructuras de datos), el hardware, etc.
- Puede incluir la verificación de errores

Retardo de Colas

- Tiempo en que el paquete espera en un *buffer* hasta ser transmitido
- El número de paquetes esperando en cola dependerá de la intensidad y la naturaleza del tráfico
- Los algoritmos de colas en los enrutadores intentan adaptar estos retardos a ciertas preferencias, o imponer un uso equitativo

Retardo de Transmisión

- El tiempo requerido para "*empujar*" todos los bits de un paquete a través del medio de transmisión
- Para R=Tasa de bits, L=Longitud del paquete, d = delay o retardo:

$$d = L/R$$

- Por ejemplo, para transmitir 1024 bits utilizando Fast Ethernet (100 Mbps):

$$d = 1024/1x10e8 = 10.24 \text{ micro segundos}$$

Retardo de Propagación

- Una vez que el bit es 'empujado' en el medio, el tiempo transcurrido en su propagación hasta el final del trayecto físico
- La velocidad de propagación del enlace depende más que nada de la distancia medio físico
  - Cercano a la velocidad de la luz en la mayoría de los casos
- Para d = distancia, s = velocidad de propagación

  Dp = d/s

Transmisión vs. Propagación

- Puede ser confuso al principio
- Considerar un ejemplo:
  - Dos enlaces de 100 Mbps.
    - Fibra óptica de 1 Km
    - Via Satélite, con una distancia de 30Km entre base y satélite
  - Para dos paquetes del mismo tamaño, cuál tiene mayor Retardo de Transmisión? Y de Propagación?

Bibliografía

- Principles of Digital Communication, **Robert G. Gallager**. Cambridge University Press, 2008.
- Communication Systems, **Simon Haykin**. Cuarta Edición, John Wiley & Sons, 2001.
- Information Theory and Coding, **Norman Abramson**. Primera Edición, McGraw Hill, 1963.
- How Claude Shannon and the Bell Labs Mathematics Department founded the digital age. https://www.bell-labs.com/claude-shannon/