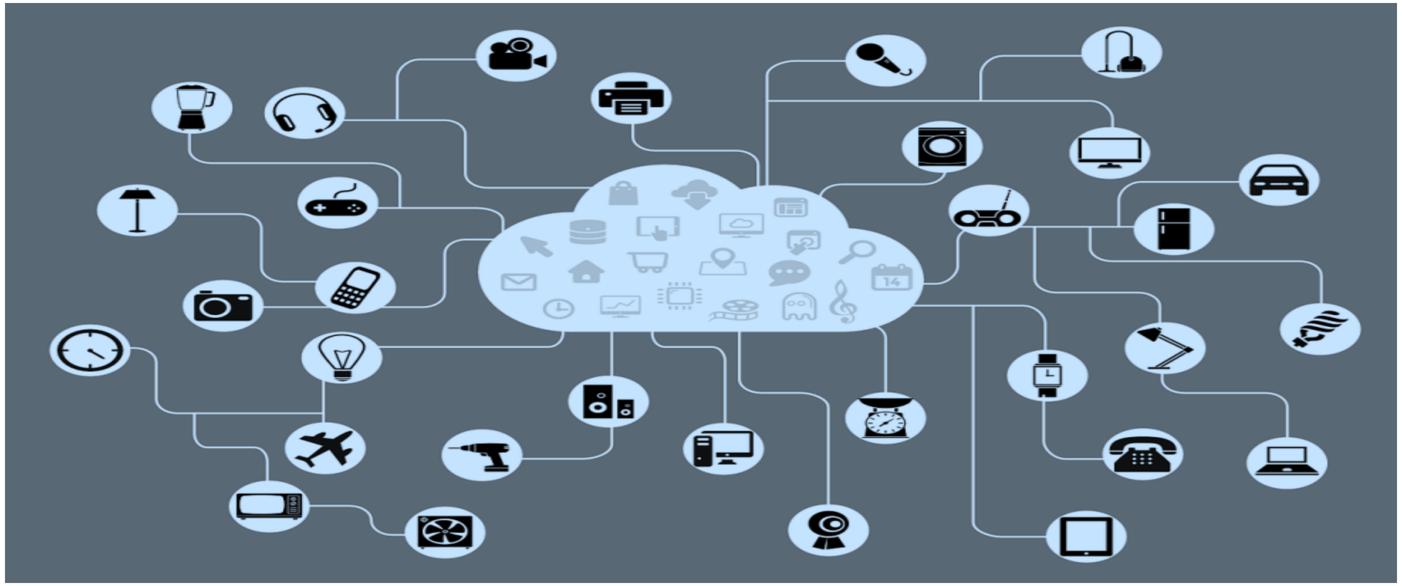
¡Bienvenidas y Bienvenidos!



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

Dr. Claudio Righetti

Segundo Cuatrimestre 2025
26 de agosto

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

Teoría de las Comunicaciones

Edición 65 oficial, pero en realidad desde que se comenzó a dictar (a.k.a Redes) es la edición 74

Este es el último cuatrimestre que se dicta.

Futuro de la asignatura

1

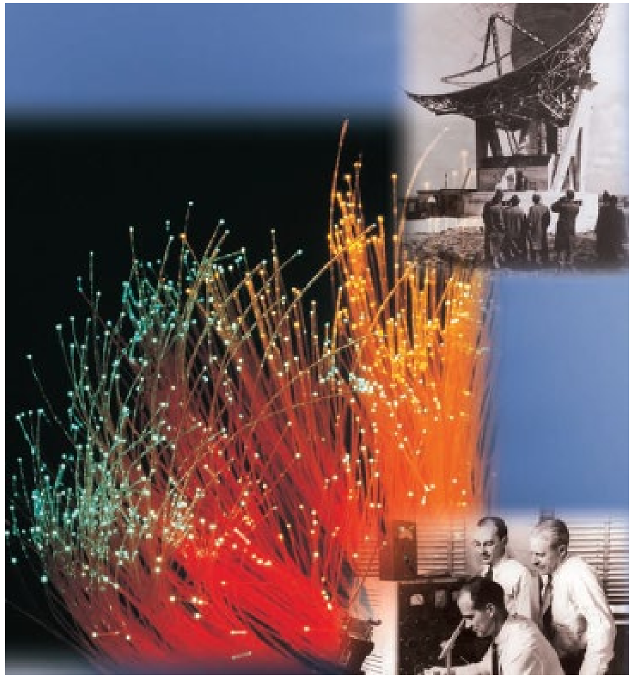
Último cuatrimestre

Teoría de las Comunicaciones - Edición 64 oficial (Edición 73 real desde que comenzó como "Redes")

2

Nueva asignatura

Arranca el 1° cuatrimestre del 2026 - 1° edición "Redes de Comunicaciones y Sistemas de Cómputo Distribuido"



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

“Cuando se proclamó que la Biblioteca abarcaba todos los libros, la primera impresión fue de extravagante felicidad. Todos los hombres se sintieron señores de un tesoro intacto y secreto. No había problema personal o mundial cuya elocuente solución no existiera: en algún hexágono.”

Jorge Luis Borges, « La Biblioteca de Babel »

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

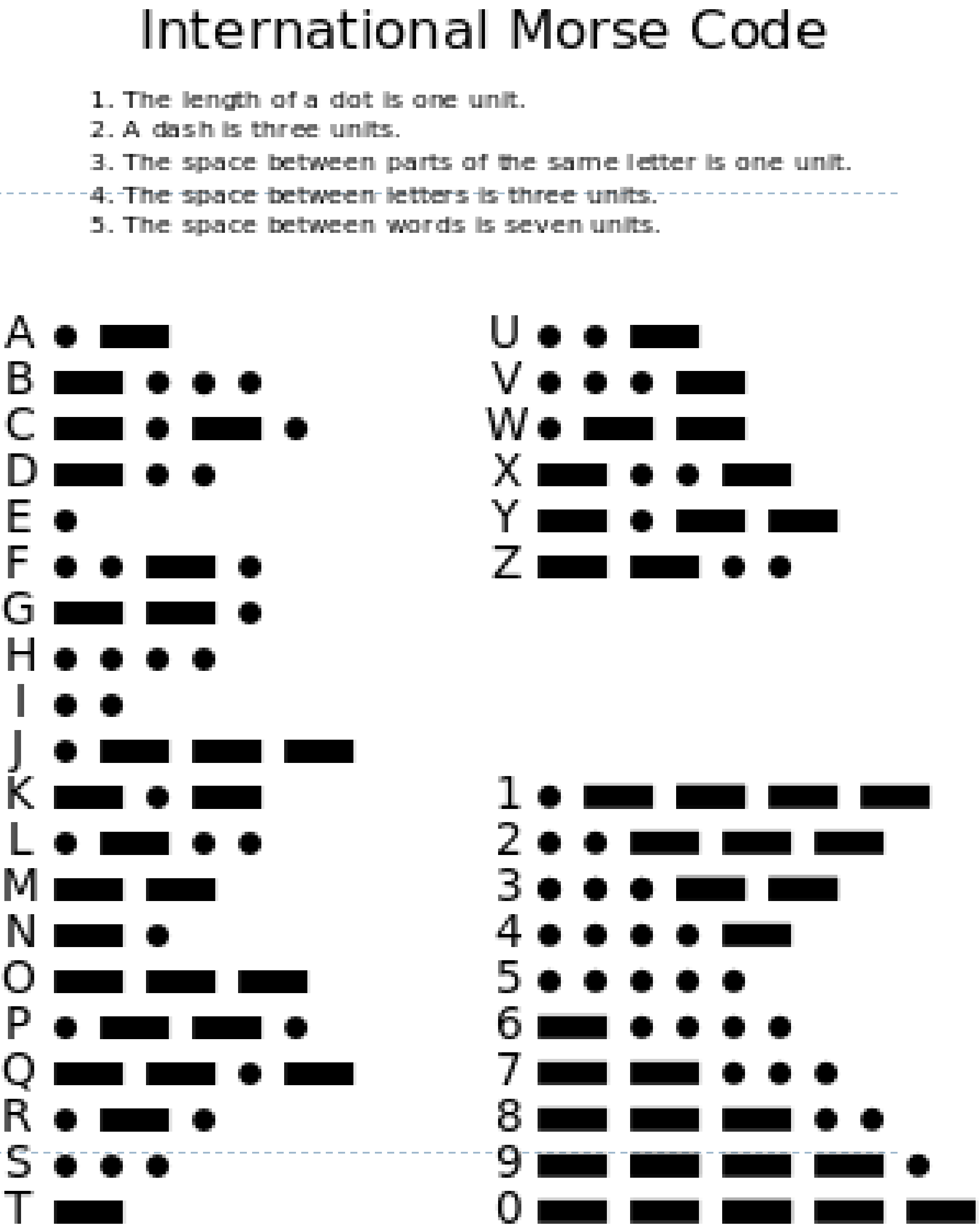
Bibliografía

- 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"…

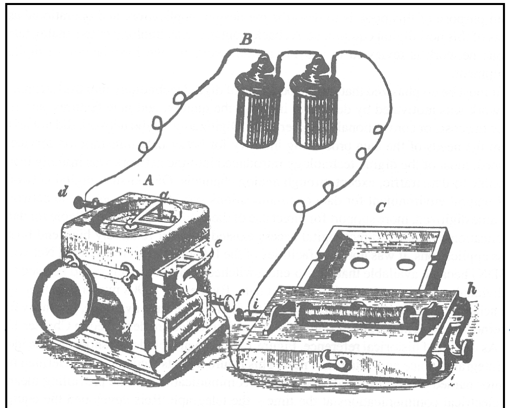


Figure 1.1 Back to the future: the first integrated voice/data communication system.

Red Telegráfica de New York

~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

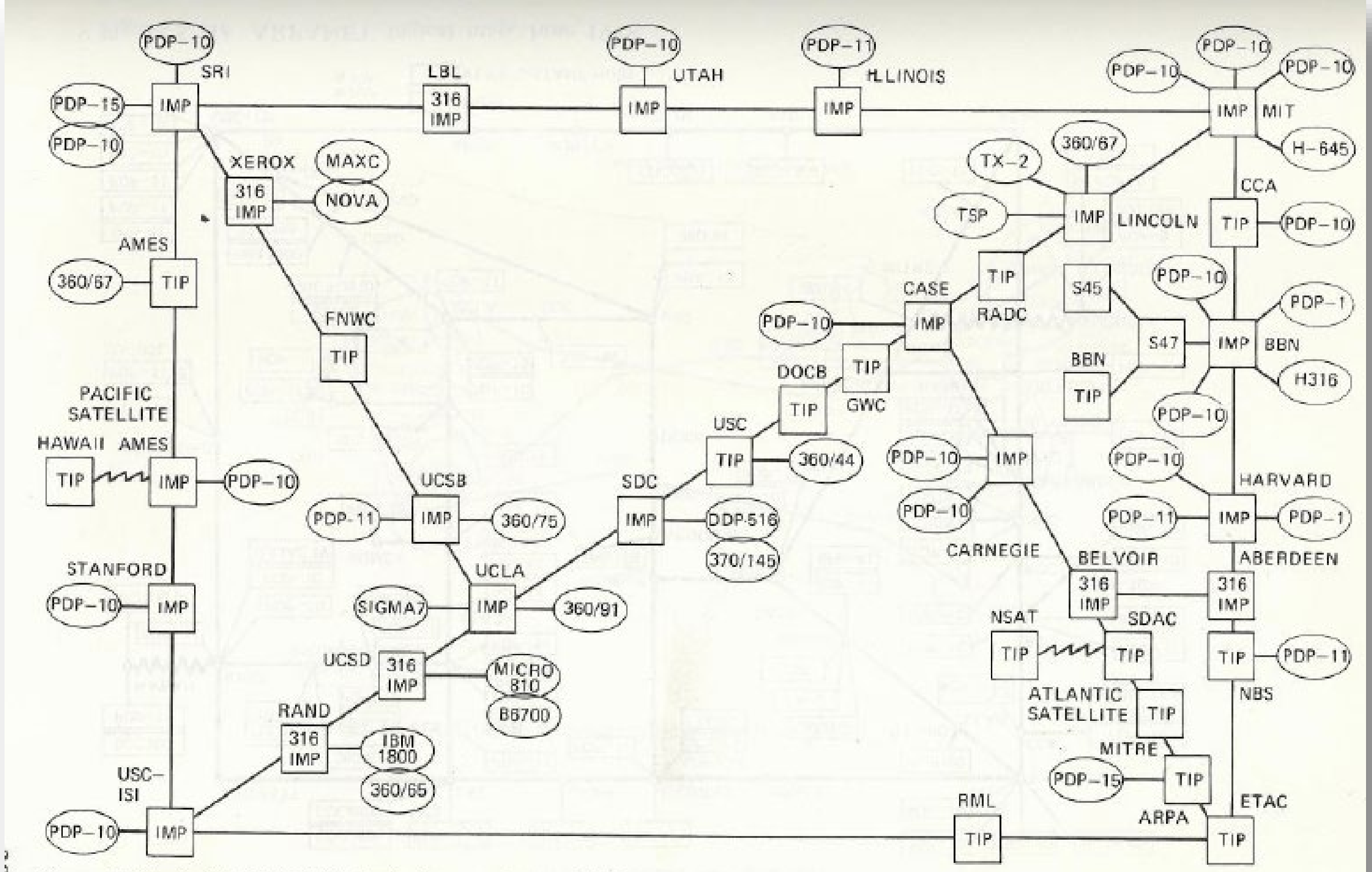
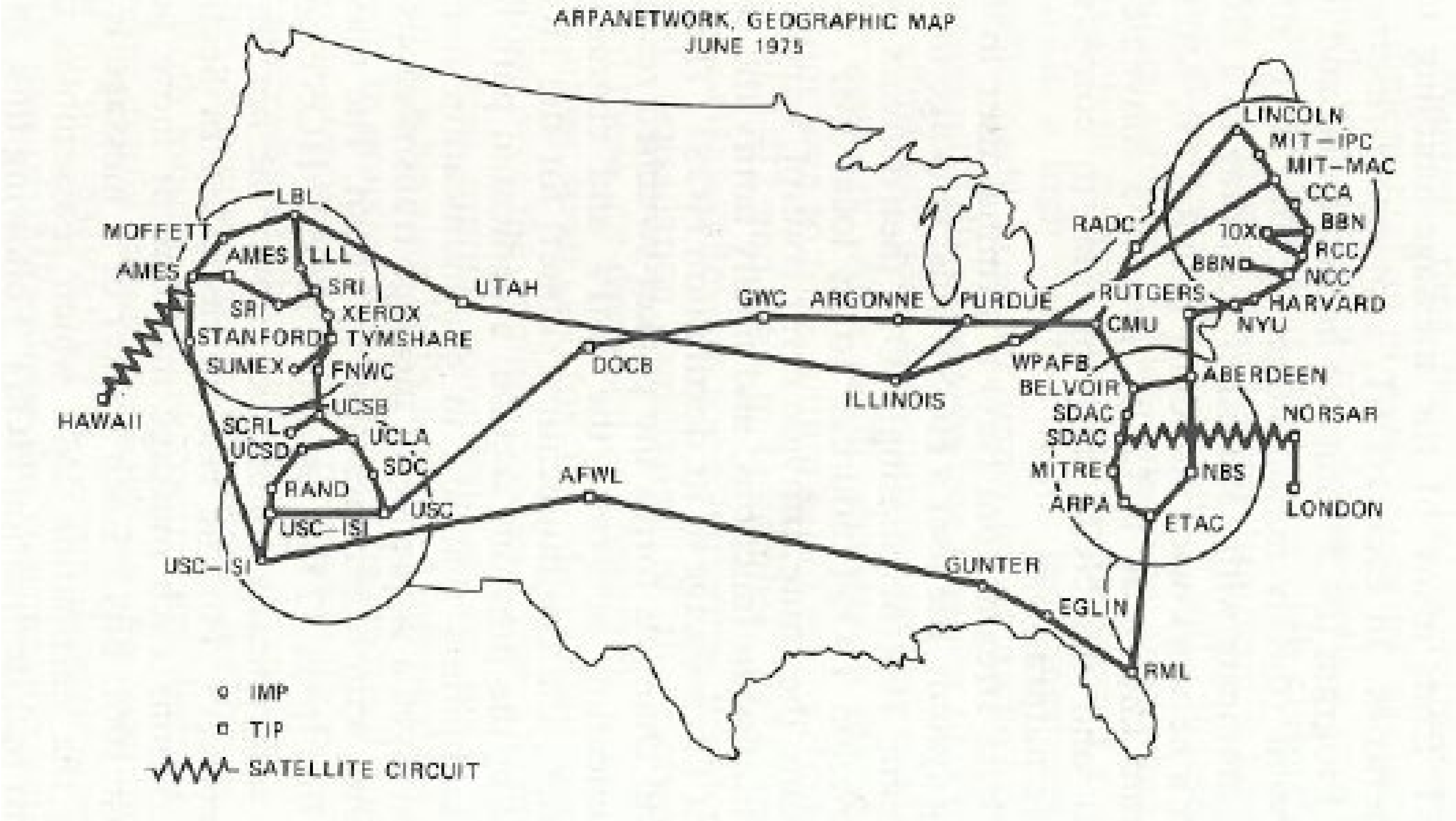


Figure 5.21 (*a*) ARPANET, logical map, August 1973.

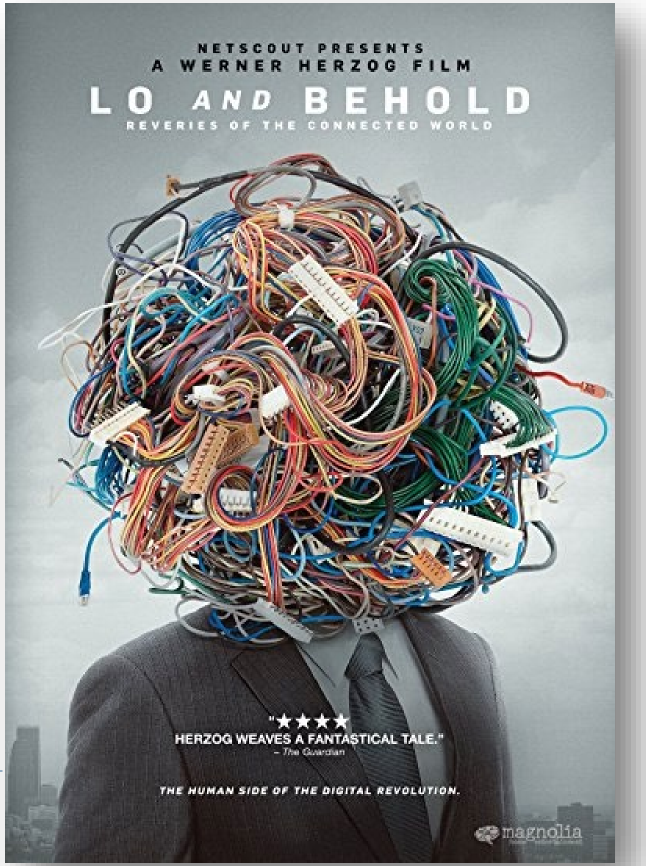
The **Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET)** was an early packet switching network and the first network to implement the protocol suite TCP/IP.

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.
  - https://youtu.be/Zc1tZ8JsZvg
  - **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

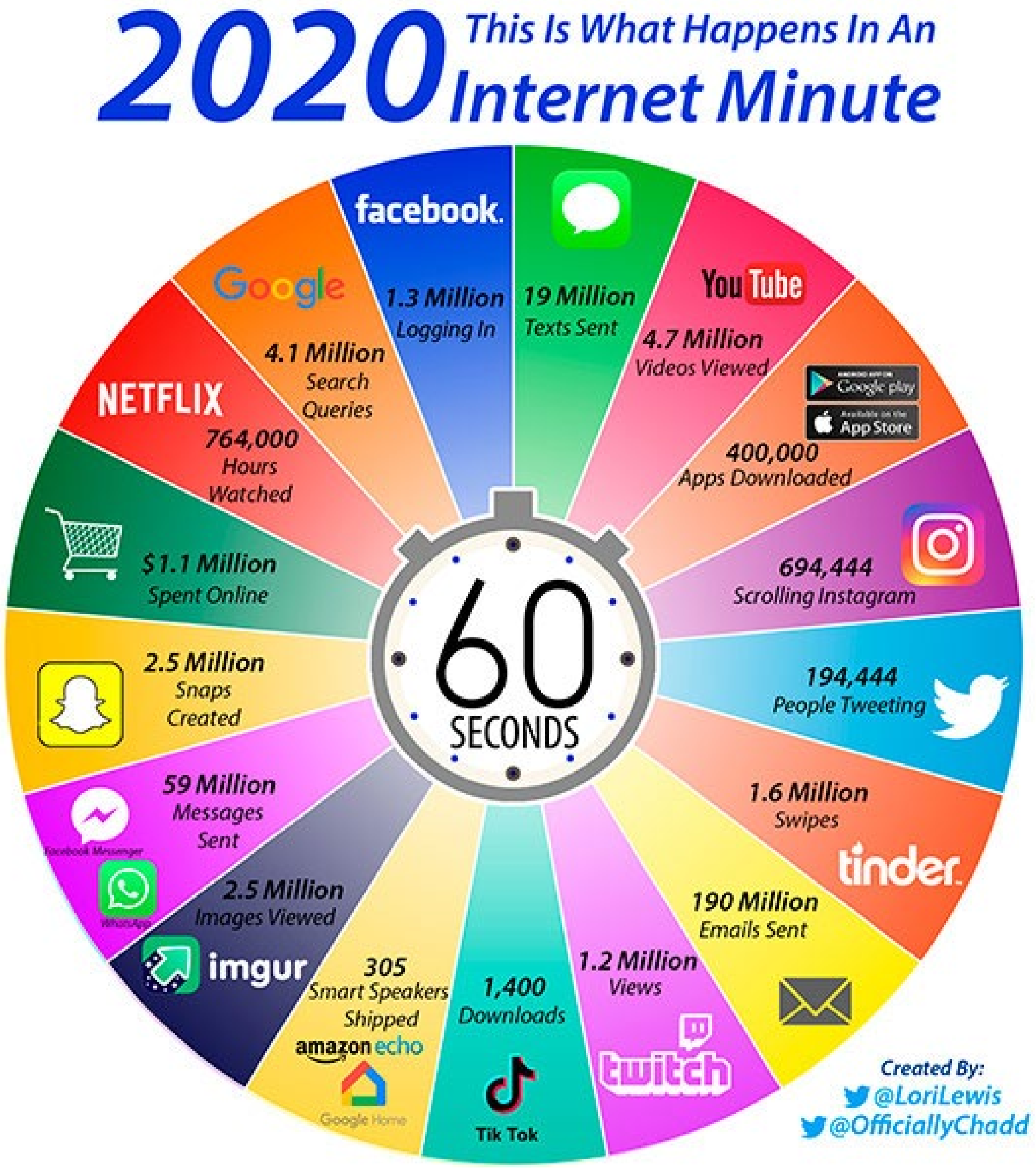
!!!!! Computer networks are not new. SAGE[1] was one of the first as was the American Airlines reservation system.[2] Numerous military nets have been created and, of course, there is the huge electronically-switched telephone system. Recently CDC announced their nationwide com-

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.

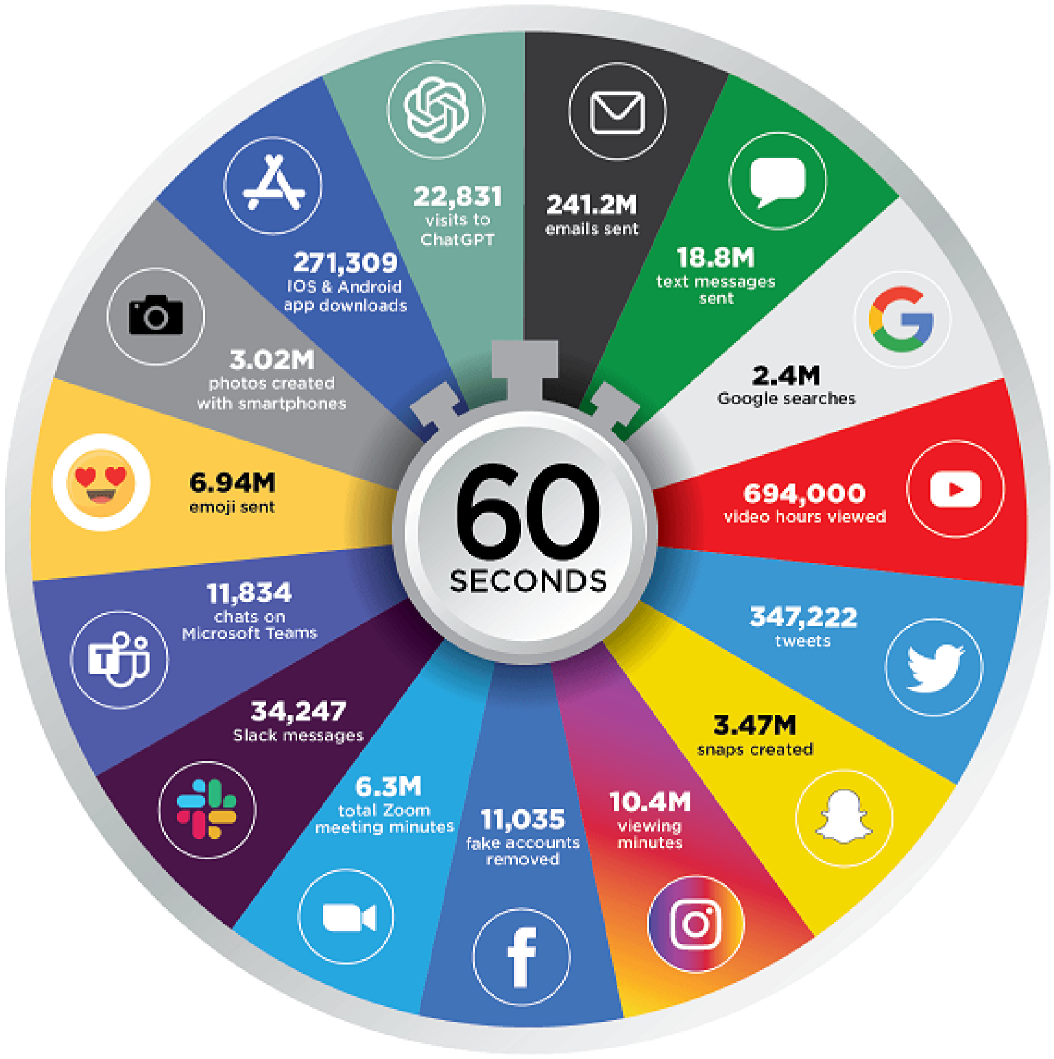
References

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

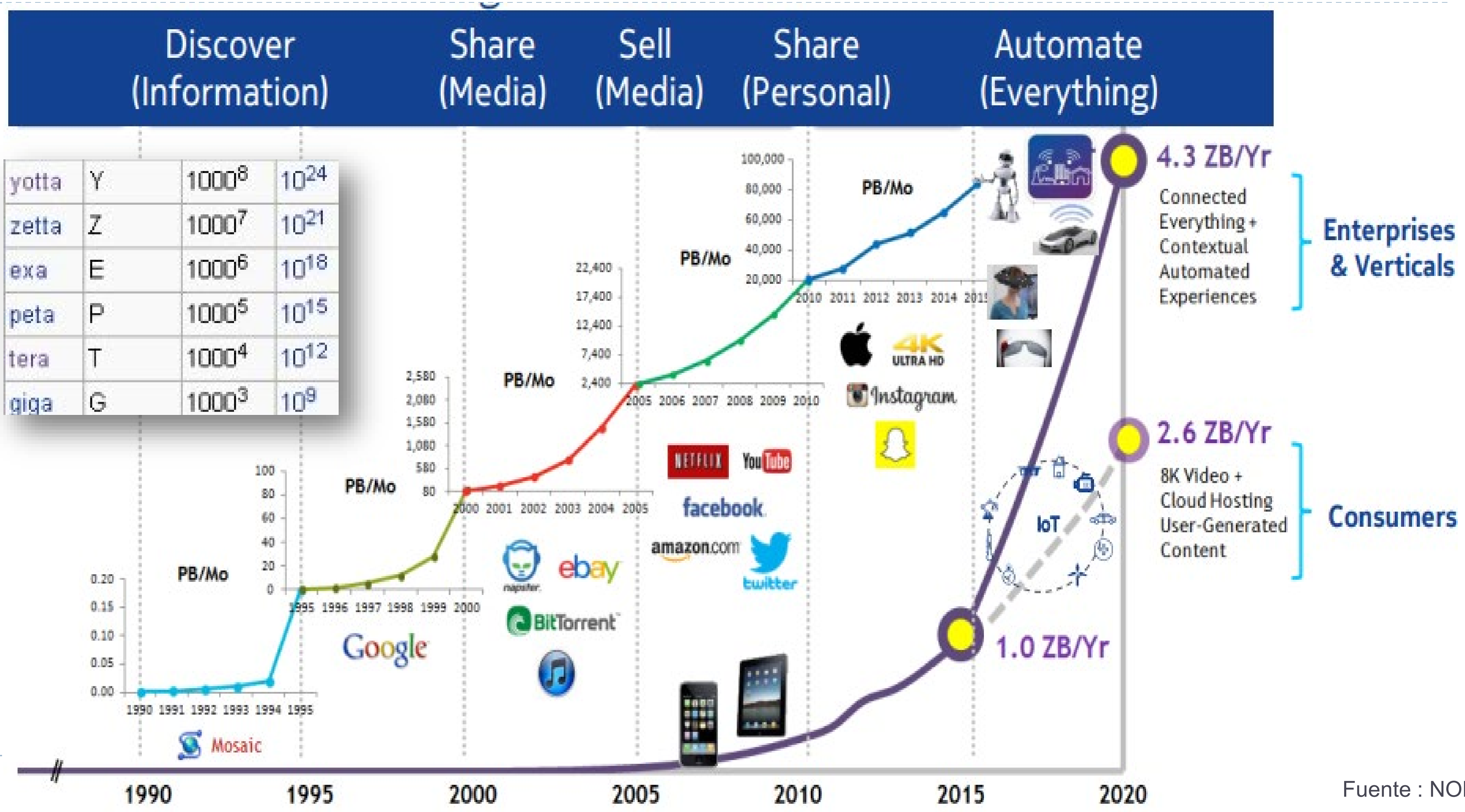

2019 This Is What Happens In An Internet Minute
facebook
1 Million Logging In
18.1 Million Texts Sent
YouTube
4.5 Million Videos Viewed
Google play
App Store
390,030 Apps Downloaded
347,222 Scrolling Instagram
87,500 People Tweeting
1.4 Million Swipes
tinder
188 Million Emails Sent
1 Million Views
twitch
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

THE INTERNET IN 2023 EVERY MINUTE



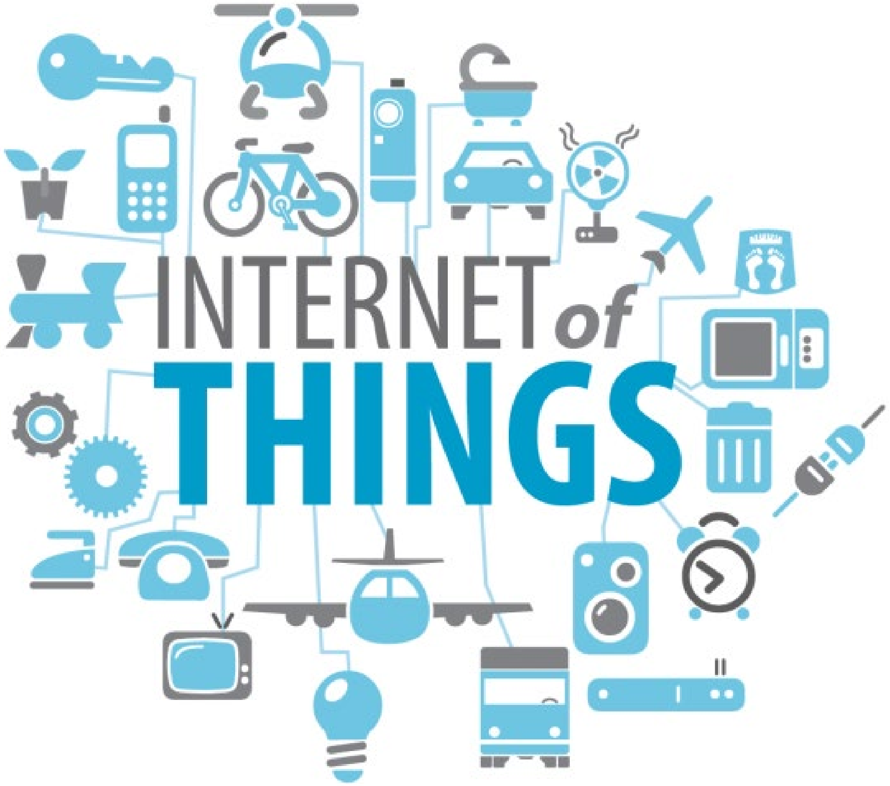
Created by: eDiscovery Today & LTMG

Evolución de la demanda



Fuente : NOKIA

La tendencia actual… IoE



IoT Application Examples

Transport & Logistics

Smart Home

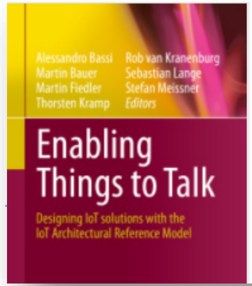
Smart Cities

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,

La tendencia actual… IoE

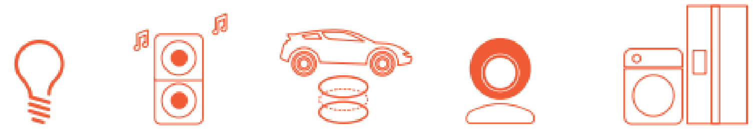
The Internet of Everything is here

Massive surge in connected things has already begun

25B

permanently connected things by 2020*

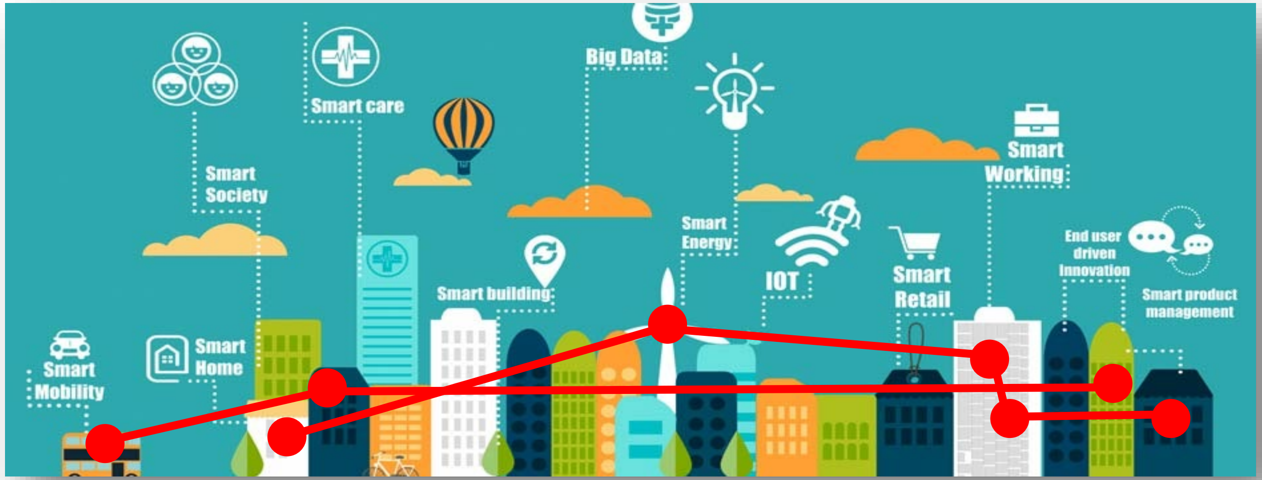
Over half of these devices will be non-handsets

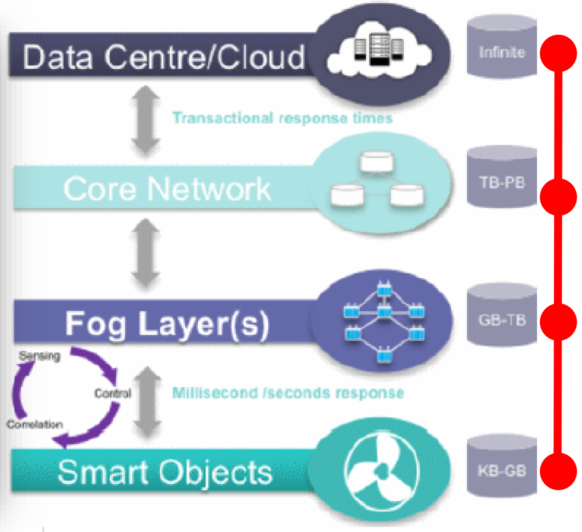


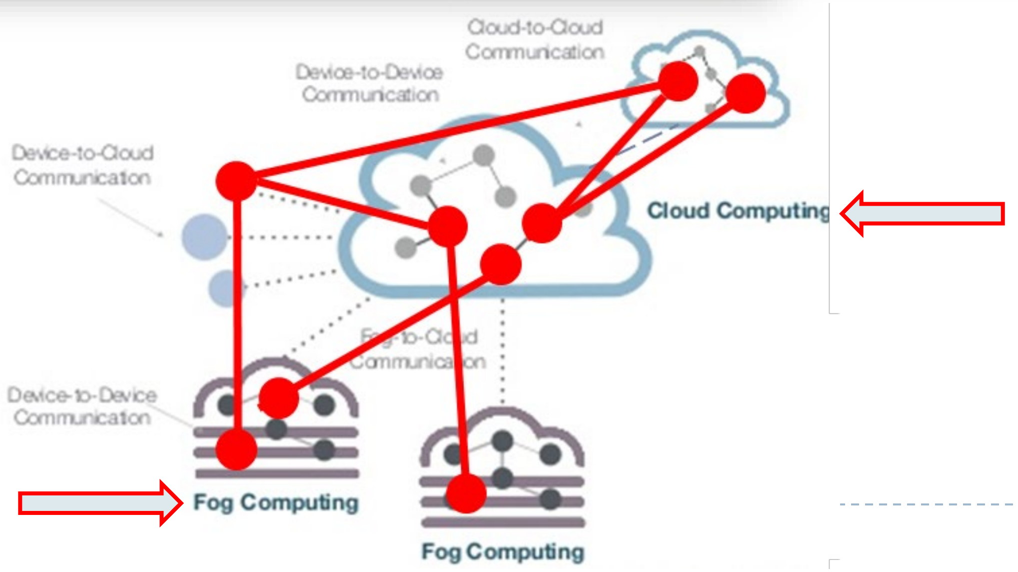
Enabling Technologies

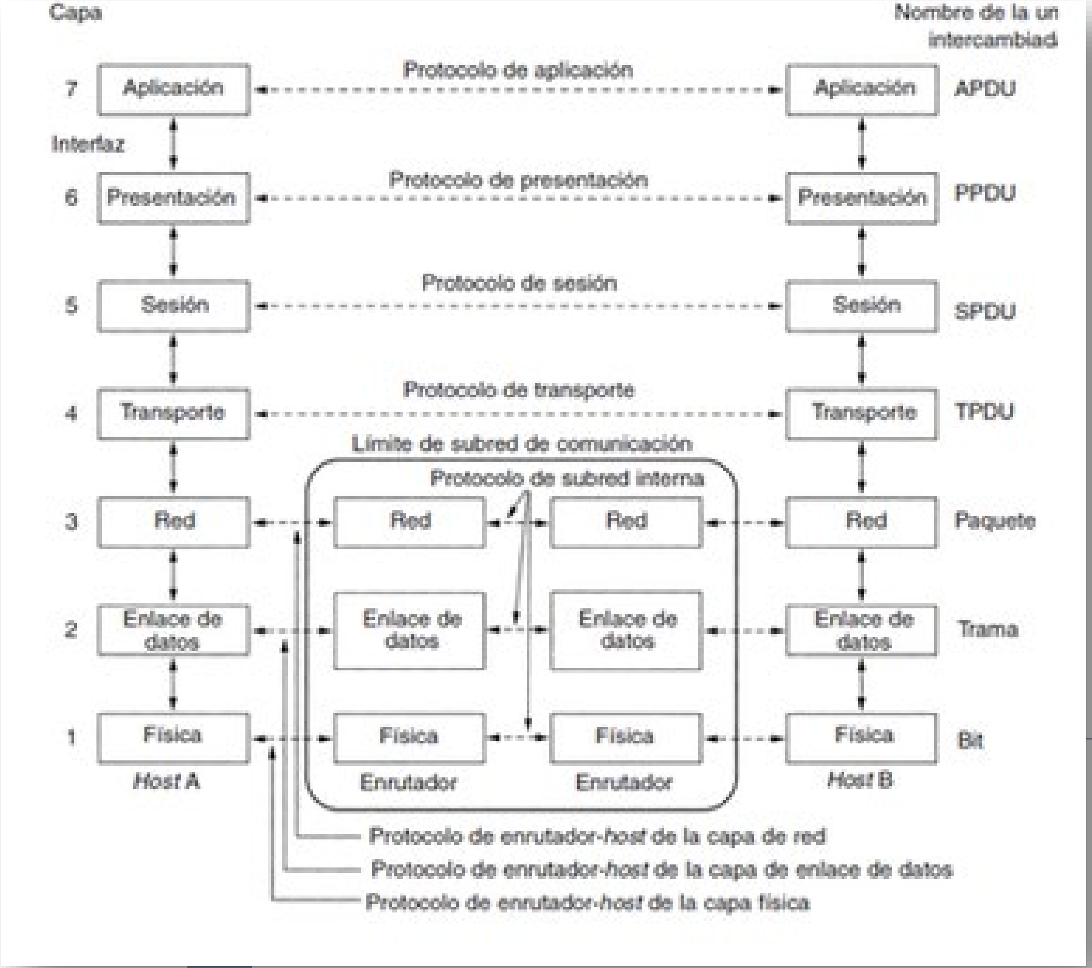
*Source: Machina Research, 2013
AllJoyn is a trademark of Qualcomm Innovation Center, Inc. AllJoyn was initially developed by Qualcomm Innovation Center, Inc., and is now hosted by the AllSeen Alliance.

IoT en Ciudades Inteligentes









Arquitectura de Redes

Fundamentos

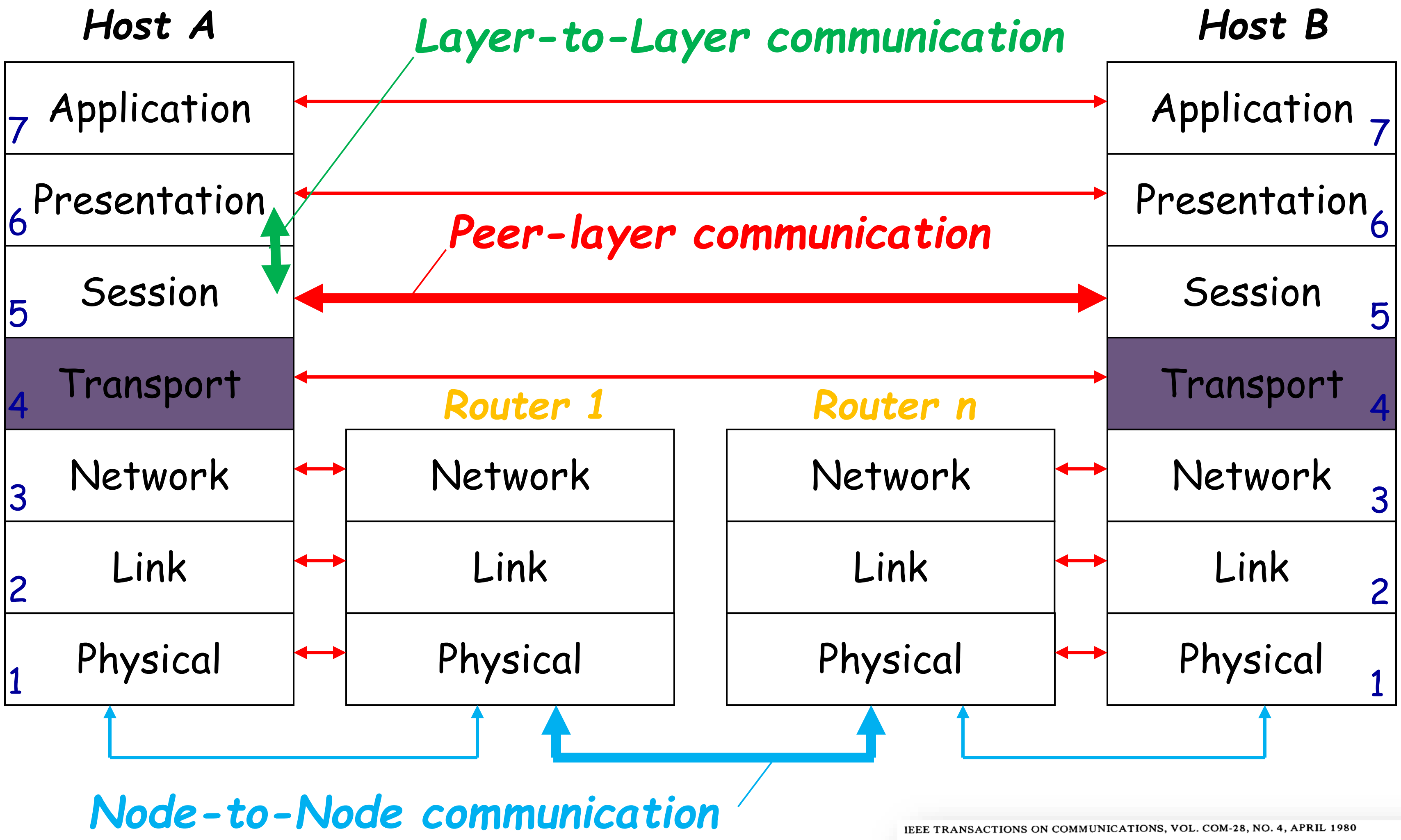
Figura del libro de Tanenbaum

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*" como un estándar internacional.

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

Modelo OSI



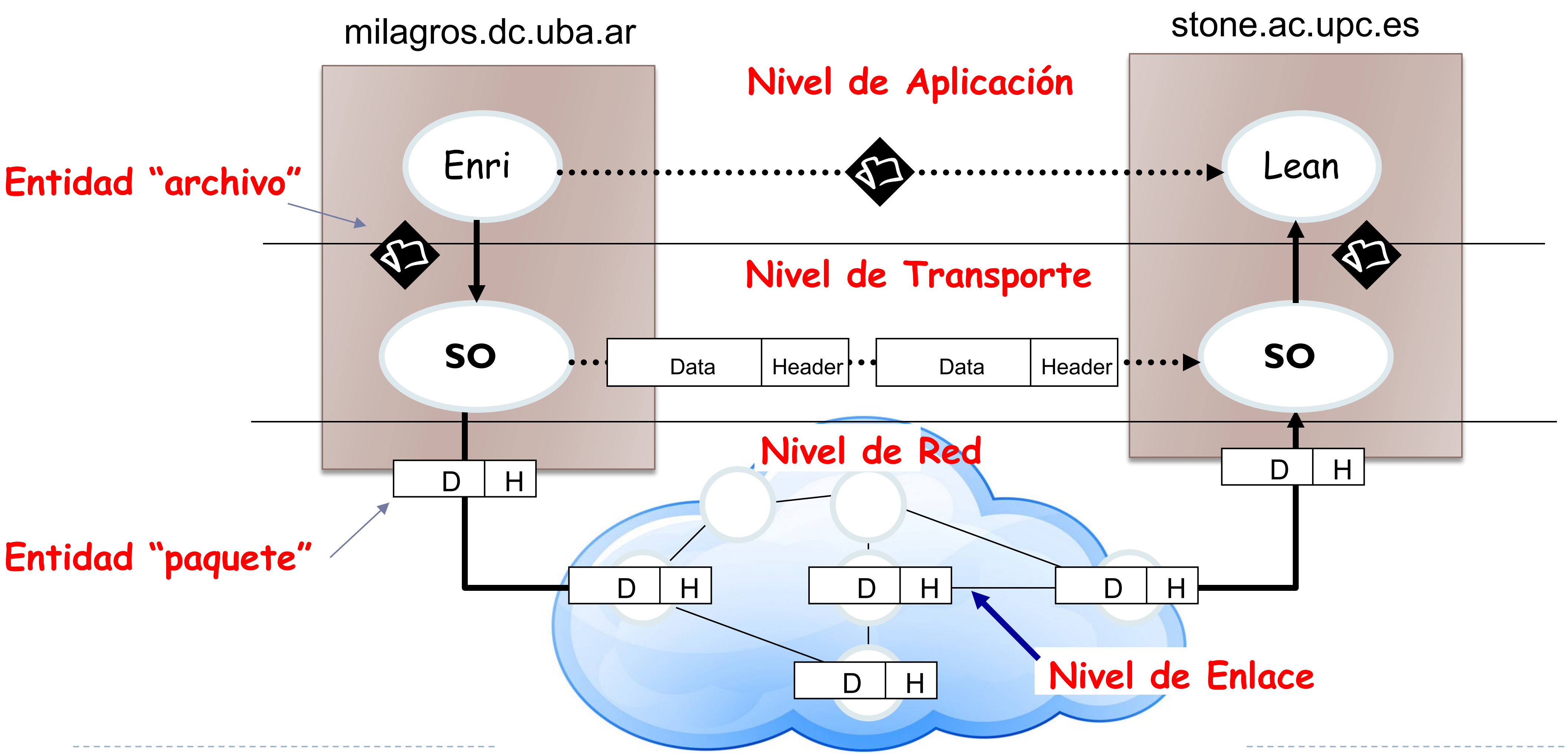
Hubbert Zimmermann, 1980
http://www.cs.cmu.edu/~srini/15-744/F02/readings/Zim80.pdf


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

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

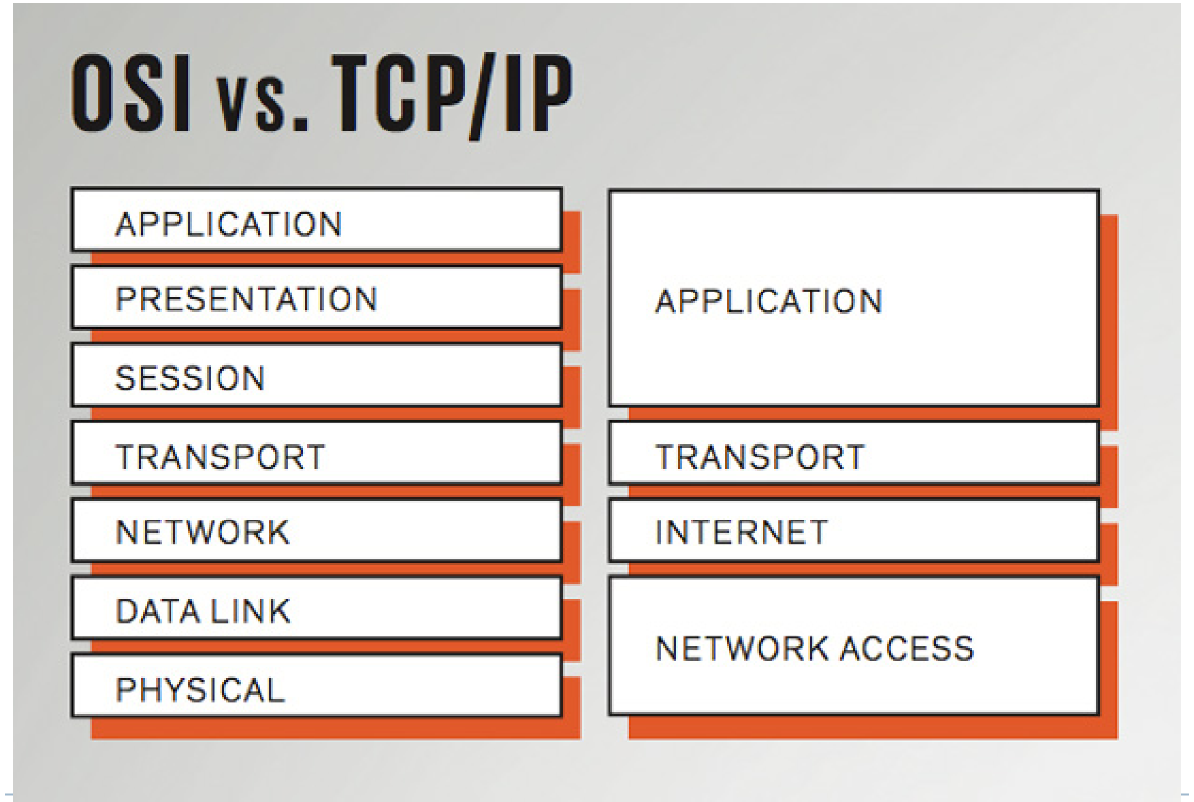
HUBERT ZIMMERMANN

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:

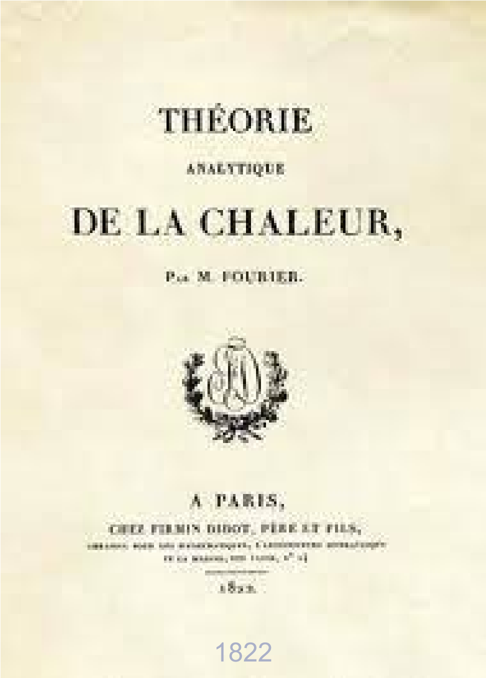
Internet es un "producto de la guerra fría" …

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


THÉORIE
ANALYTIQUE
DE LA CHALEUR,
PAR M. FOURIER.
A PARIS,

1822

Nivel Físico

Parte 1 - Fundamentos

Sistema de Comunicaciones

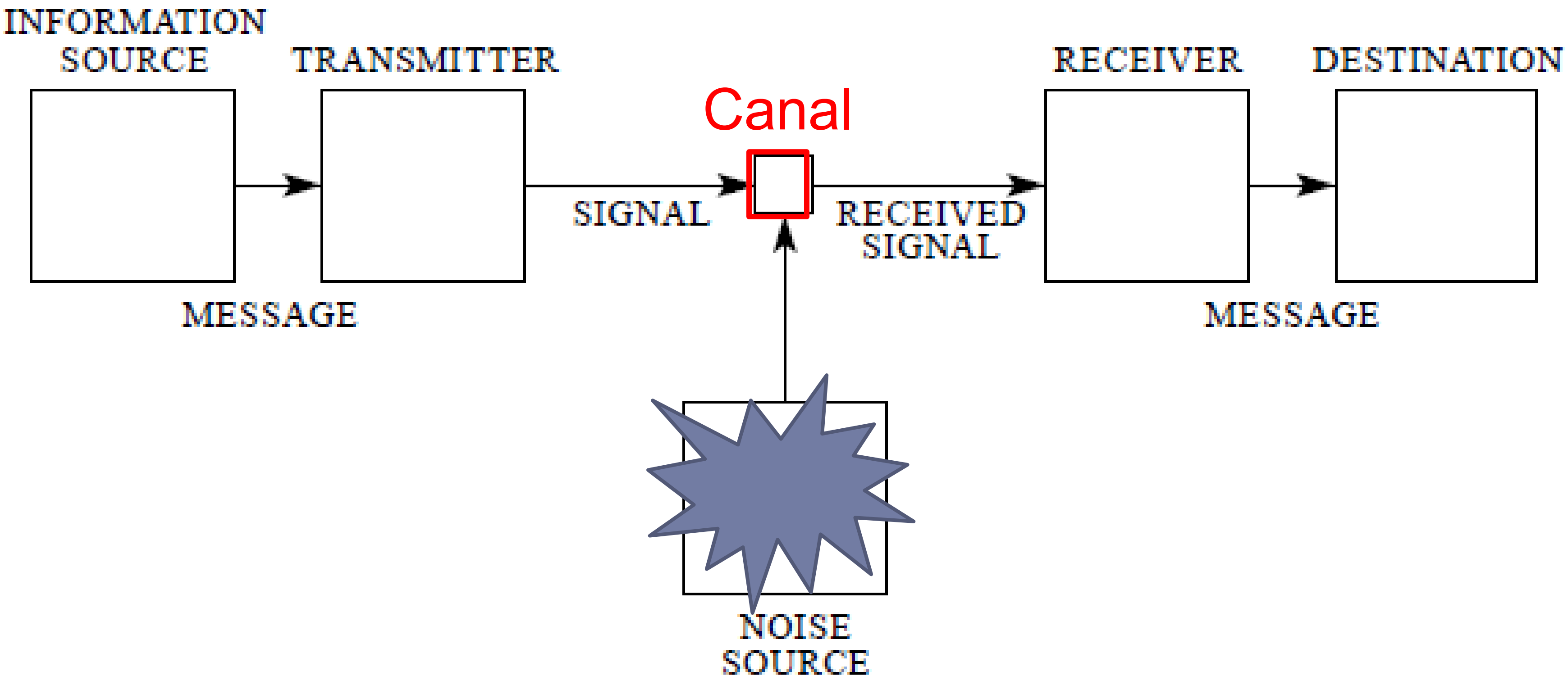
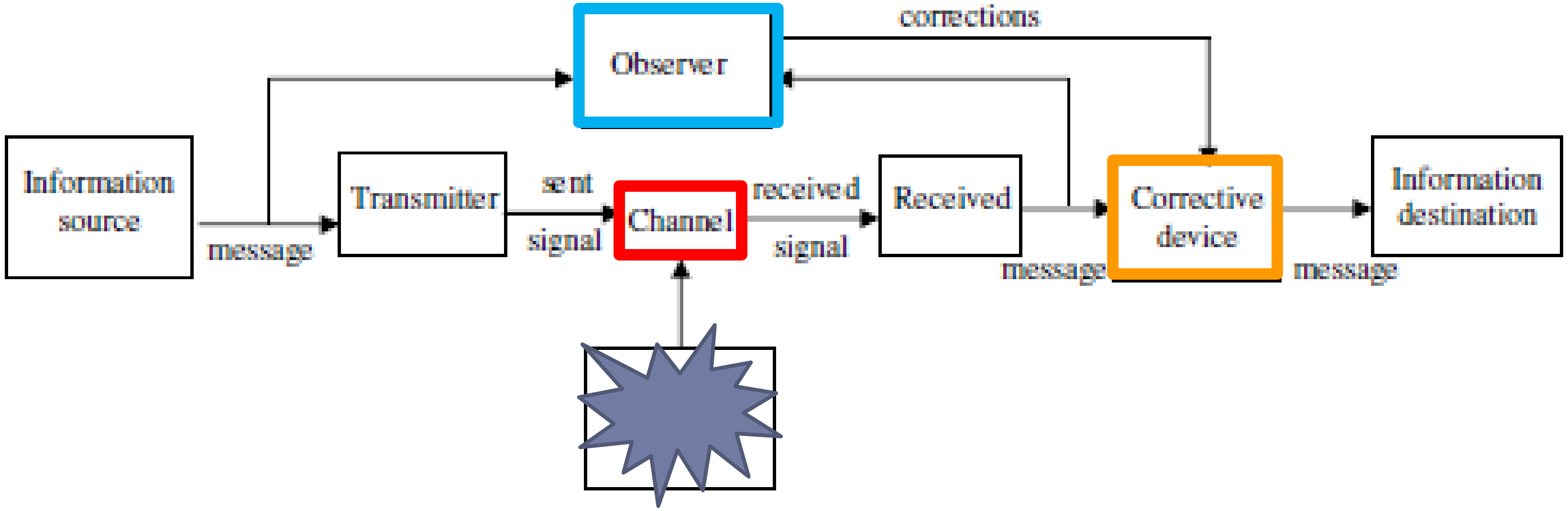


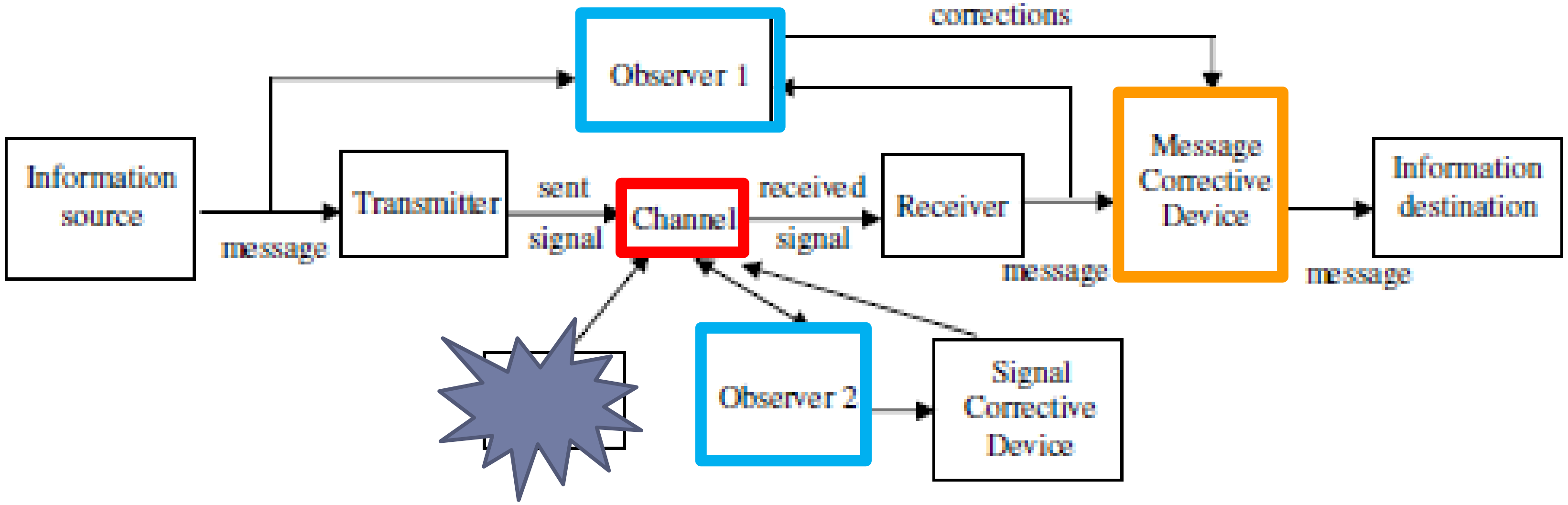
Fig. 1—Schematic diagram of a general communication system.

Modelos con Corrección y Doble Corrección

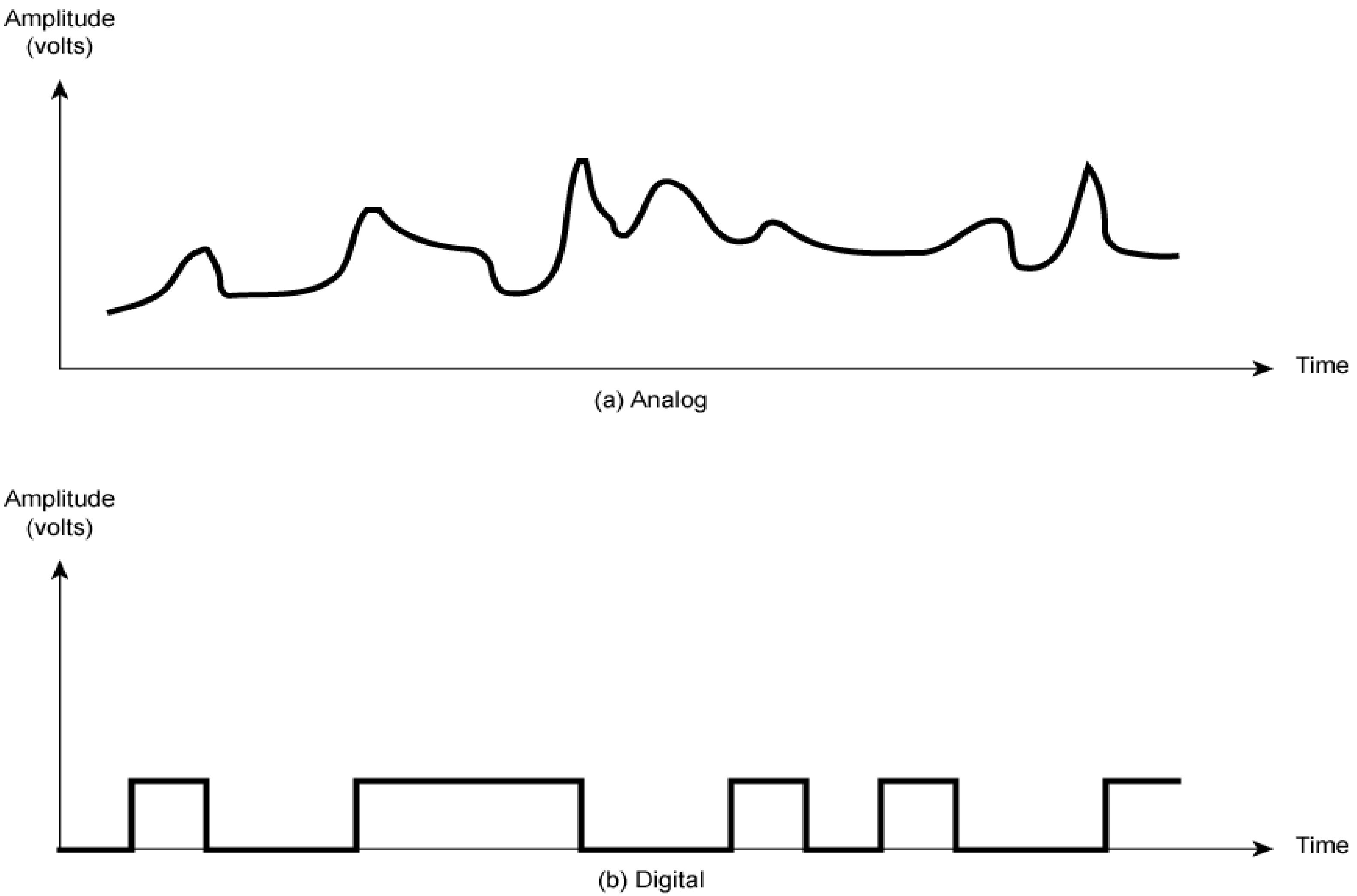
Corrección de Mensaje



Corrección de Señal y de Mensaje

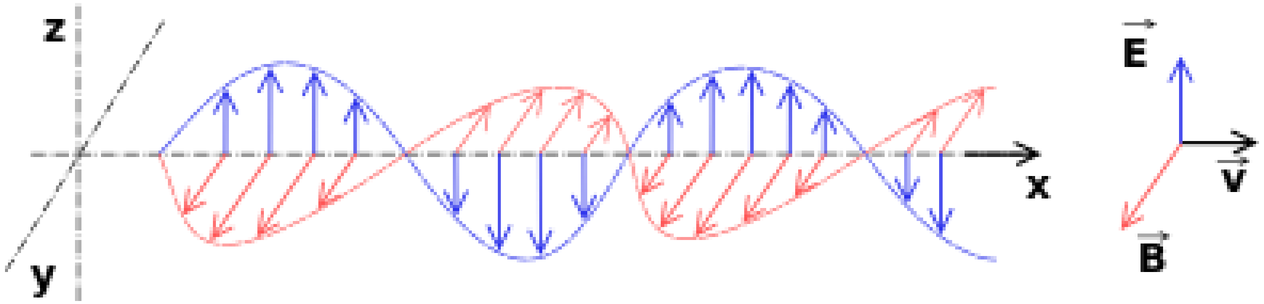


Señales: Analógicas y Digitales



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

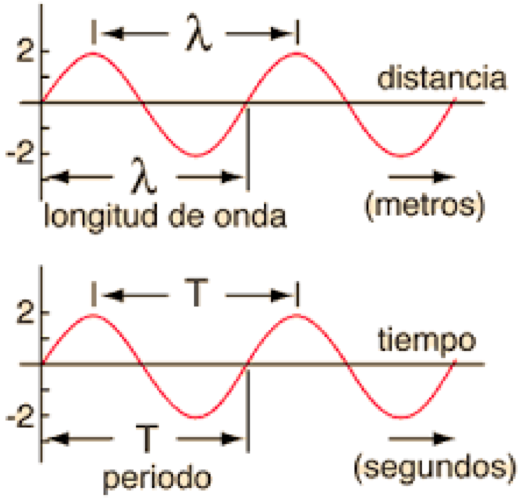
Conceptos básicos: Ondas

- **Onda electromagnética:** se propaga en un medio físico a una velocidad v 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



- 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.

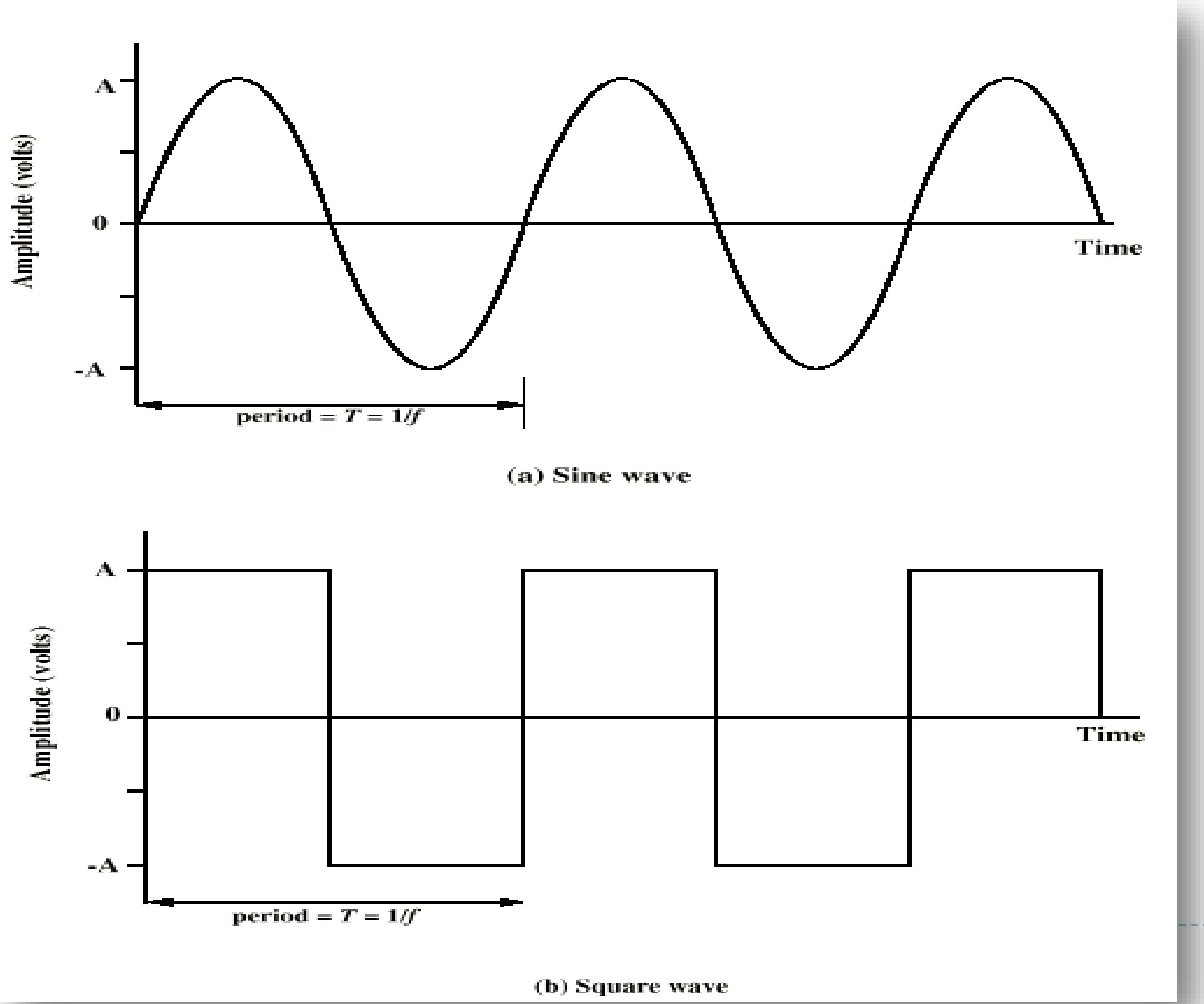
- Se cumple:

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

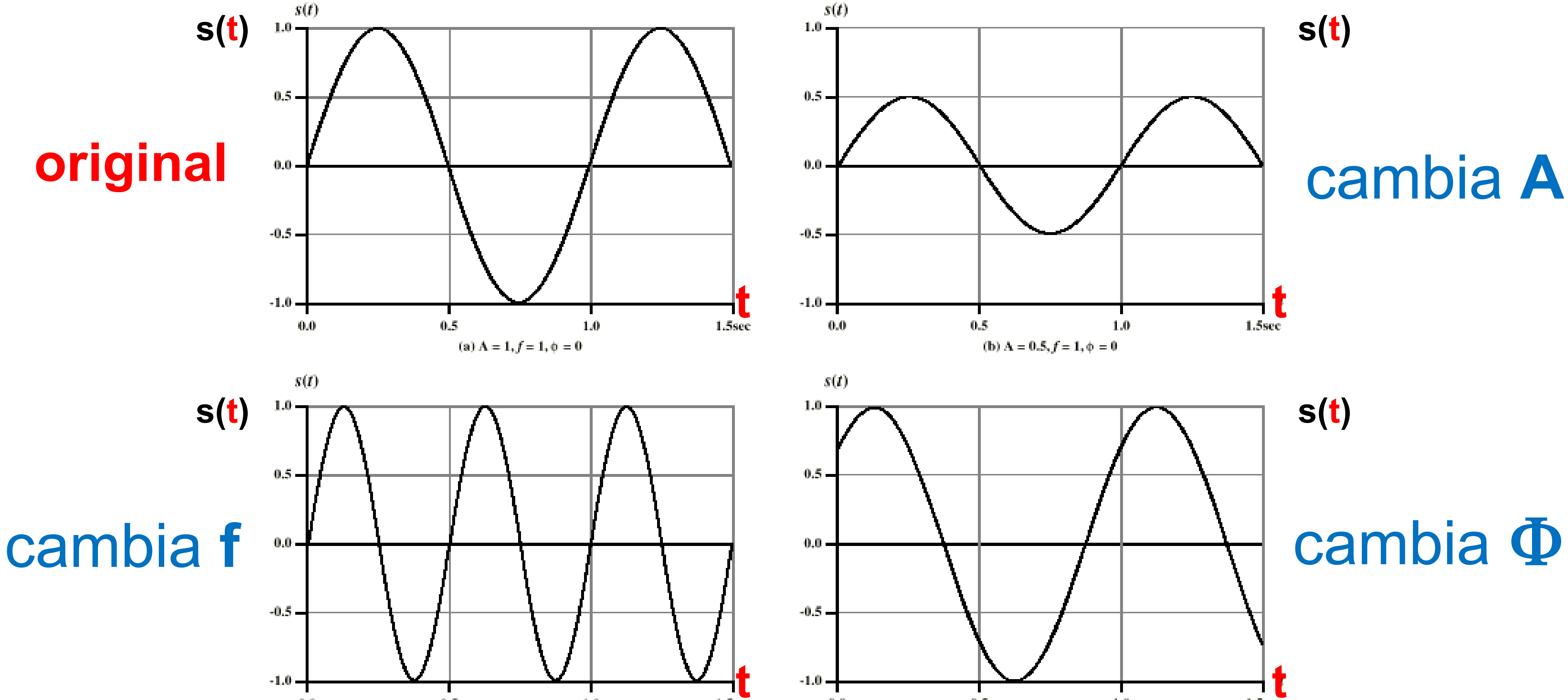
- *Es f(t) = constante una función periódica?*

Señales Periódicas

Período T = 1 / f



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



(a) $A = 1, f = 1, \phi = 0$

(b) $A = 0.5, f = 1, \phi = 0$

(c) $A = 1, f = 2, \phi = 0$

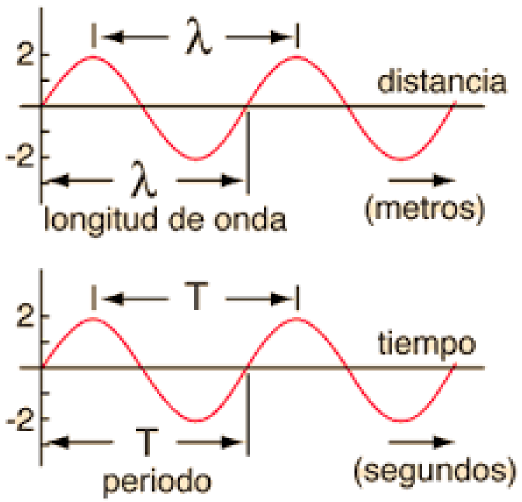
(d) $A = 1, f = 1, \phi = \pi/4$

Onda Senoidal

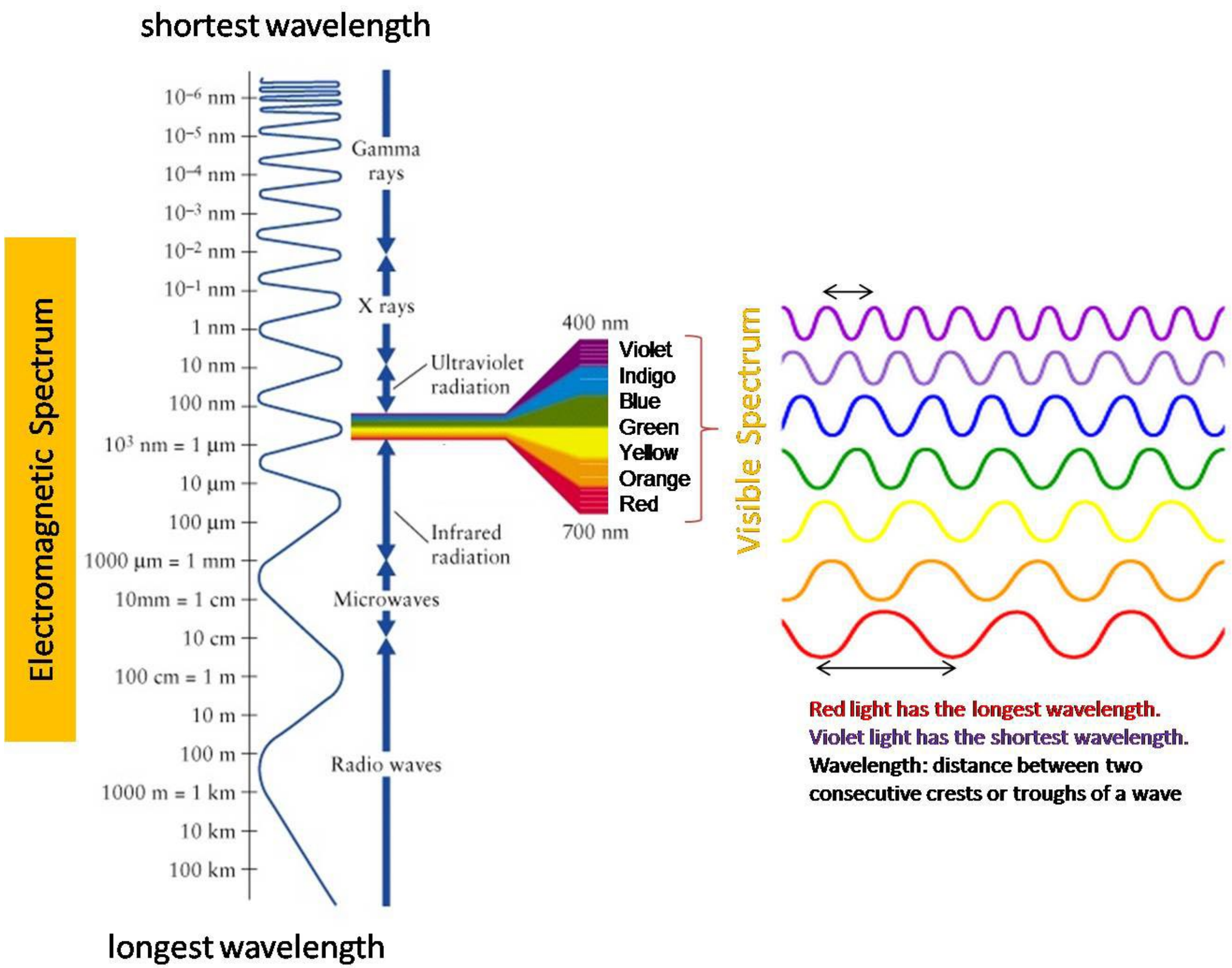
- A = Amplitud
  - Amplitud (Magnitud física, ej.: Volts)
    - (ej: CA, A=310 Volt, Valor Eficaz = 220 Volt)
- w = Frecuencia Angular. $w = 2.\pi.f$
  - Radianes/segundo
- f = Frecuencia Temporal
  - Hertz (Hz) o ciclos/segundo
- T = Período
  - Tiempo en que se completa un ciclo de valores
  - $T = 1/f$
- ϕ = Fase
  - Posición relativa (o desfasaje) en el tiempo

Longitud de Onda (λ)

- "Distancia ocupada" por un ciclo
- Distancia espacial 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** de luz en el vacío = **c** = 3.10^8 [m/s]
  - Longitud de onda de la luz en el vacío: λ **= c / 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: la frecuencia

- 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.

Veremos dos herramientas:

1. Serie de Fourier
2. Transformada de Fourier

Serie trigonométrica de Fourier

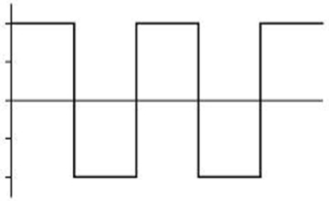
- Cualquier función periódica *f(t)* de periodo *T* puede expresarse por la siguiente serie, llamada ***serie trigonométrica de Fourier***

$$f(t) = \tfrac{1}{2}a_0 + a_1\cos(\omega_0 t) + a_2\cos(2\omega_0 t) + a_3\cos(3\omega_0 t) + \ldots$$
$$\ldots + b_1 sen(\omega_0 t) + b_2 sen(2\omega_0 t) + b_3 sen(3\omega_0 t) + \ldots$$

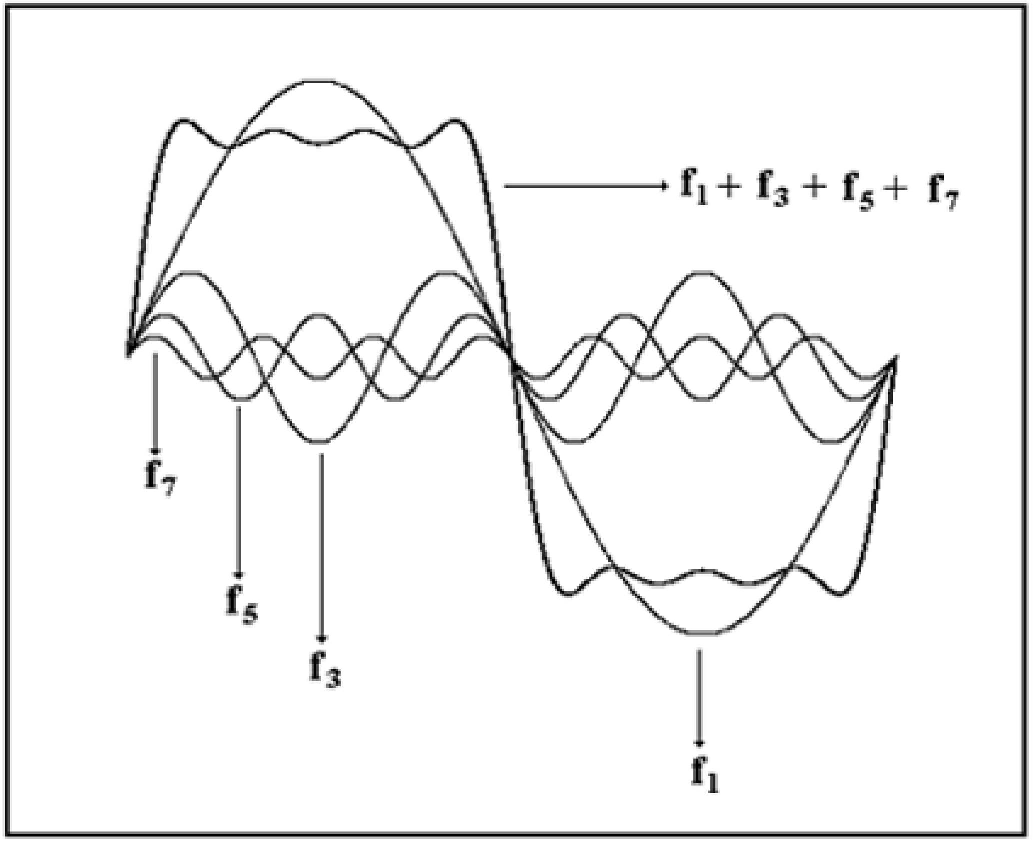
  - Donde $w_0 = 2\pi / T = 2.\pi.f_0$ se denomina frecuencia fundamental

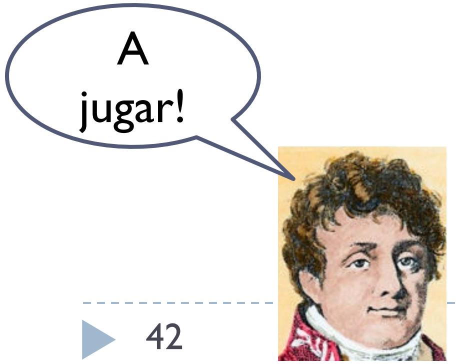
$$f(t) = \tfrac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}[a_n\cos(n\omega_0 t) + b_n sen(n\omega_0 t)]$$

La onda Cuadrada



- 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…

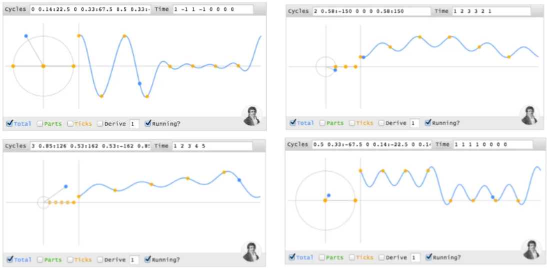




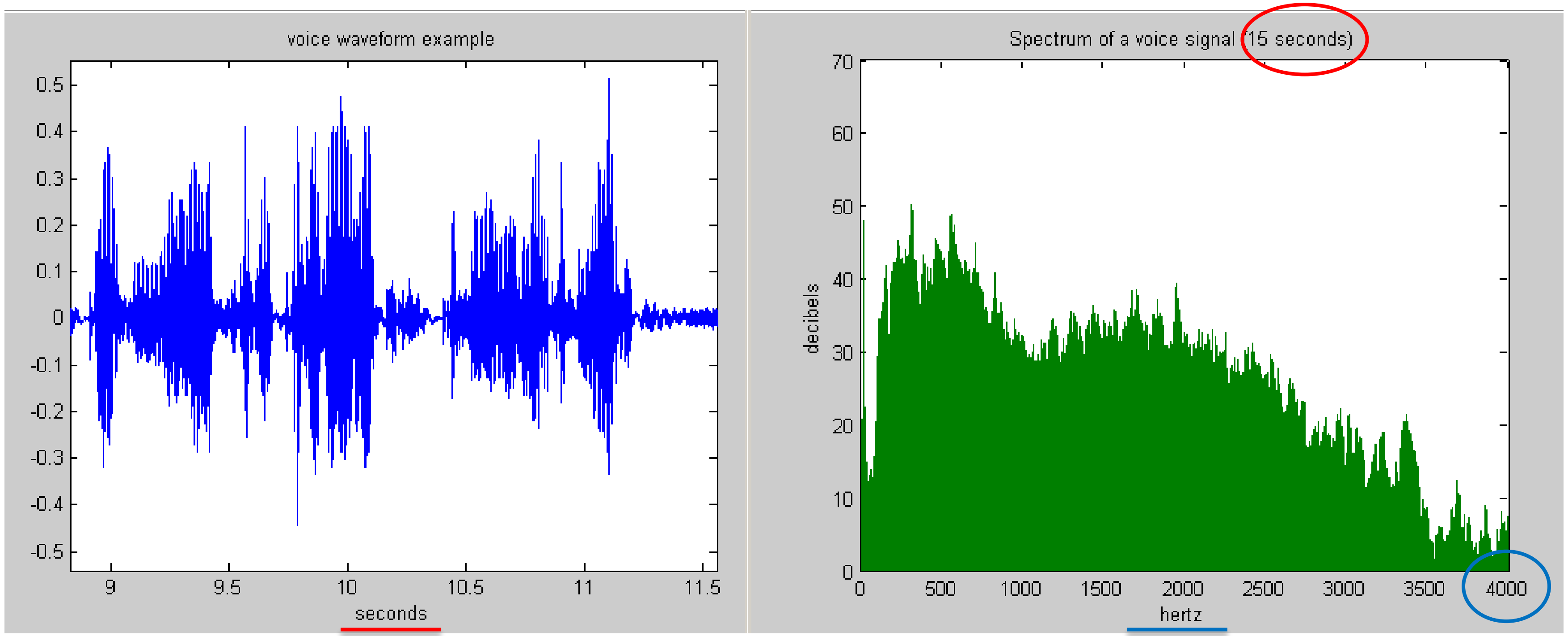
Experimentos web interactivos:

http://www.intmath.com/fourier-series/fourier-graph-applet.php

http://betterexplained.com/articles/an-interactive-guide-to-the-fourier-transform/



Una señal vocal

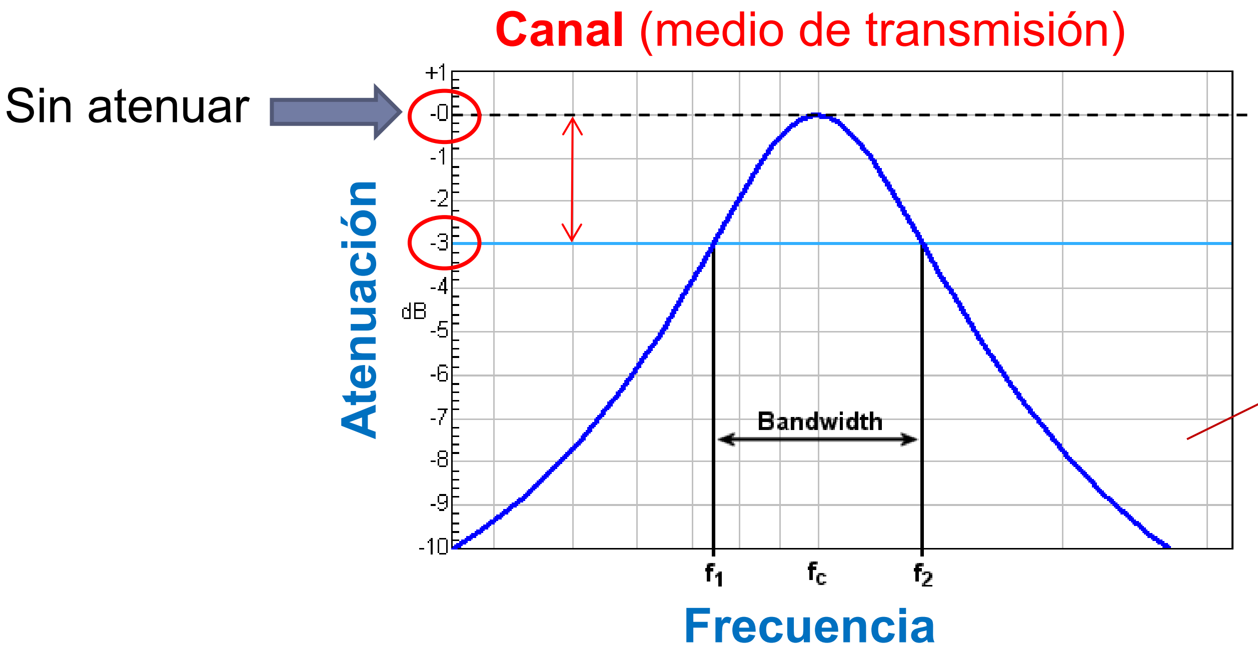


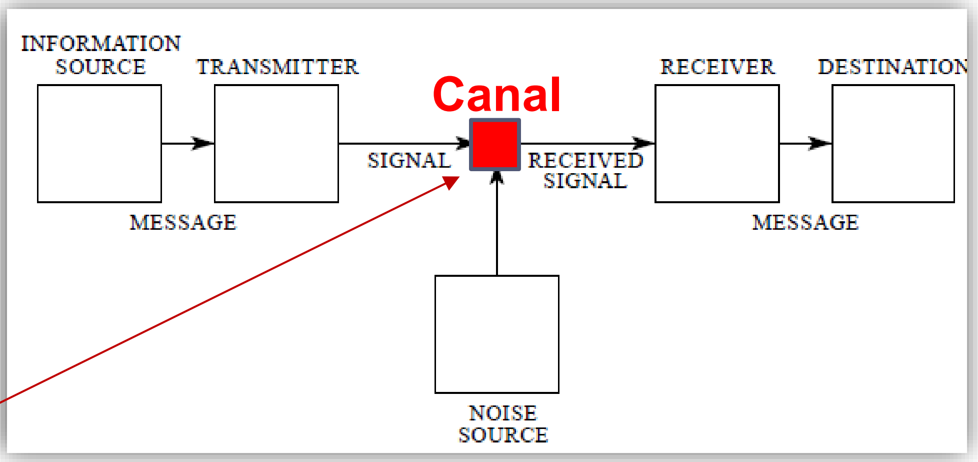
En el dominio del tiempo y de la frecuencia

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

Ancho de Banda

- "Experimento" en el pizarrón con una señal senoidal.

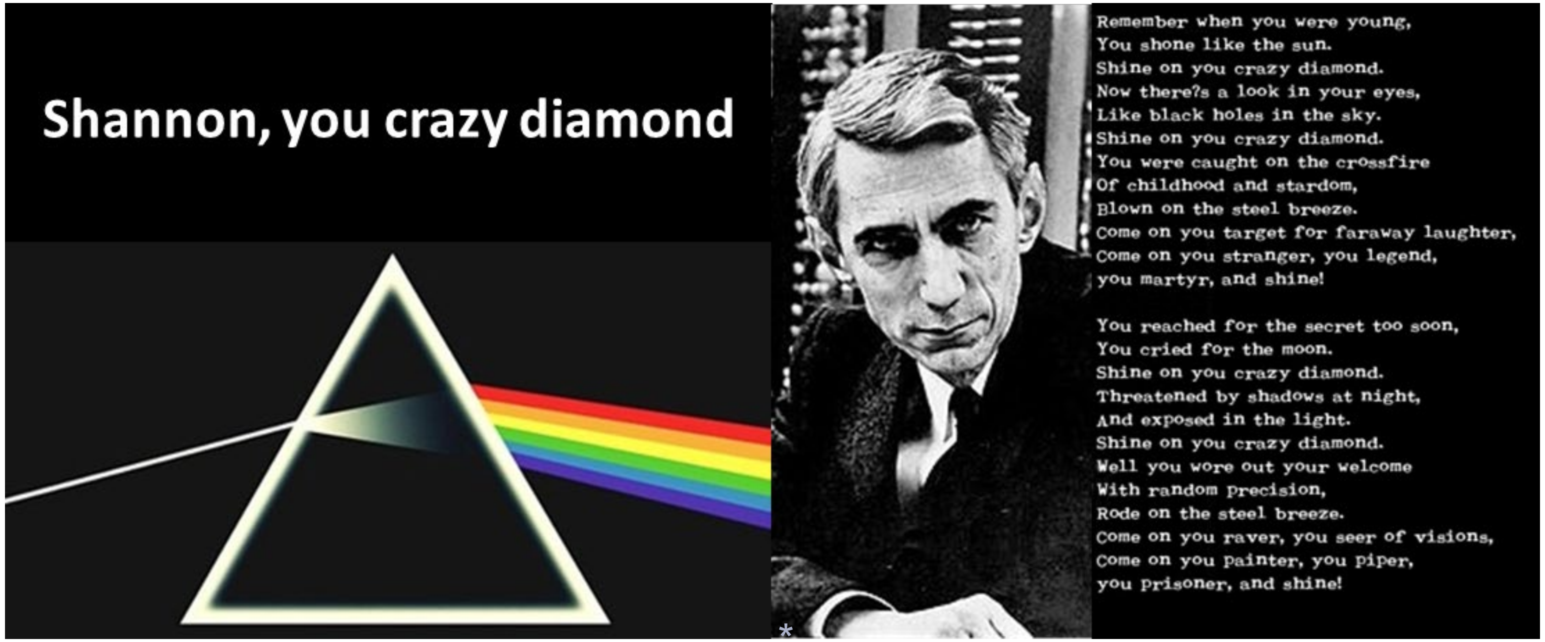




Formalmente la **frecuencia de corte** es donde se produce una **atenuación de 3dB**

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

dB=10.$\log_{10}$(P1/P2), 3dB="el doble"



* Claude Shannon

Teoría de la Información

Introducción

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

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

google scholar 2018: 104583 citas

"*Mi mente divaga y concibo diferentes cosas día y noche. Como un escritor de ciencia ficción, estoy pensando, ¿y si fuera así?"*

Claude Shannon

1945 : A MATHEMATICAL THEORY OF CRYPTOGRAPHY

- Proporcionó un análisis de los posibles "métodos criptográficos inquebrantables".
- Determinó qué "métodos secretos" serían ideales o más prácticos si no se pudiera implementar un "sistema inquebrantable"
- Proporcionó una prueba de que todos los "unbreakable ciphers" teóricamente "irrompibles" deben tener los mismos requisitos que el "one-time-pad" - un tratamiento fundamental de la criptografía moderna.
- Hizo una astuta observación de que el lenguaje, particularmente el inglés, era redundante y predecible.

- Demostró que en un enlace punto a punto libre de errores donde un intruso "escucha" el mensaje transmitido sin error, con suficiente aleatoriedad común entre el transmisor y el receptor, se puede lograr un enlace de comunicación "perfectamente seguro".

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 (Gregory Chaitín y otros)

Dos Teoremas Fundacionales:

1. Codificación para una <u>fuente sin ruido</u>
2. Codificación para un <u>canal ruidoso</u>

Teoría de Shannon

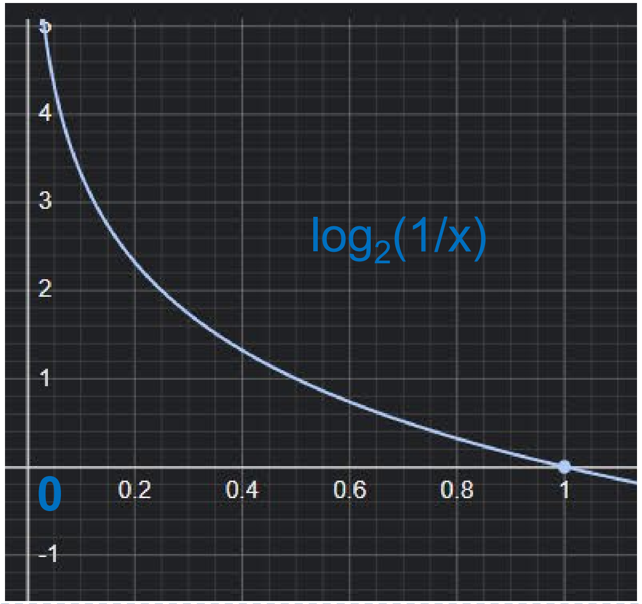
- Uno de ellos describe la máxima eficiencia posible de un método de corrección de errores (codificación) frente a los niveles de ruido y de corrupción de los datos.

  - 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)

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.



Google: plot $\log_2(1/x)$

Información: unidades

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

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

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

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

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).

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

1 Bit – Alguien sabe que es?

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

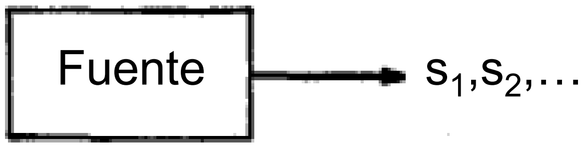


FIG. 2-1. Fuente de información.

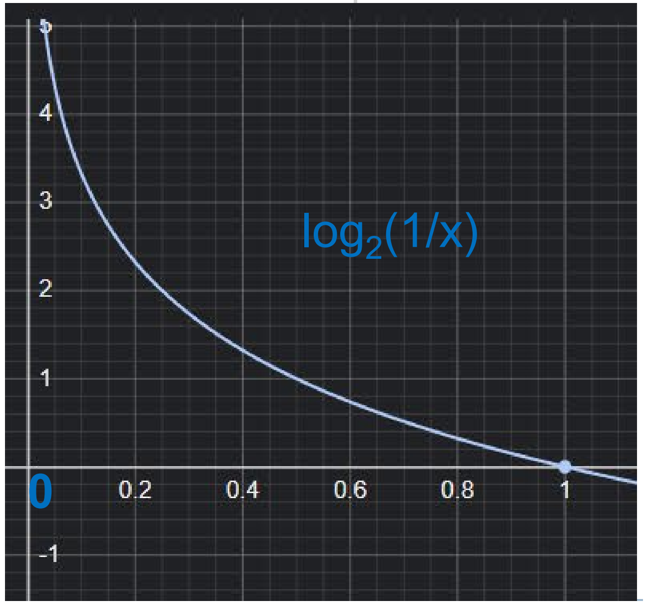
Imaginemos la fuente emitiendo una secuencia de símbolos pertenecientes a un alfabeto finito y fijo, $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_q\}$. Los símbolos emitidos sucesivamente se eligen de acuerdo con una ley fija de probabilidad. Ocasionalmente nos referimos a la fuente misma como S; sin que esto deba dar 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

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



Entropía!

Para un símbolo cualquiera 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 *.

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

Entropía (cont)

- Entropía de una fuente S de n mensajes s_i :

$$H(S) = \sum_{i=1}^{n} p(s_i).\log\frac{1}{p(s_i)} = -\sum_{i=1}^{n} p(s_i).\log p(s_i)$$

- 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 en promedio al observar la aparición de cada nuevo símbolo.

Entropía: Fuente Binaria

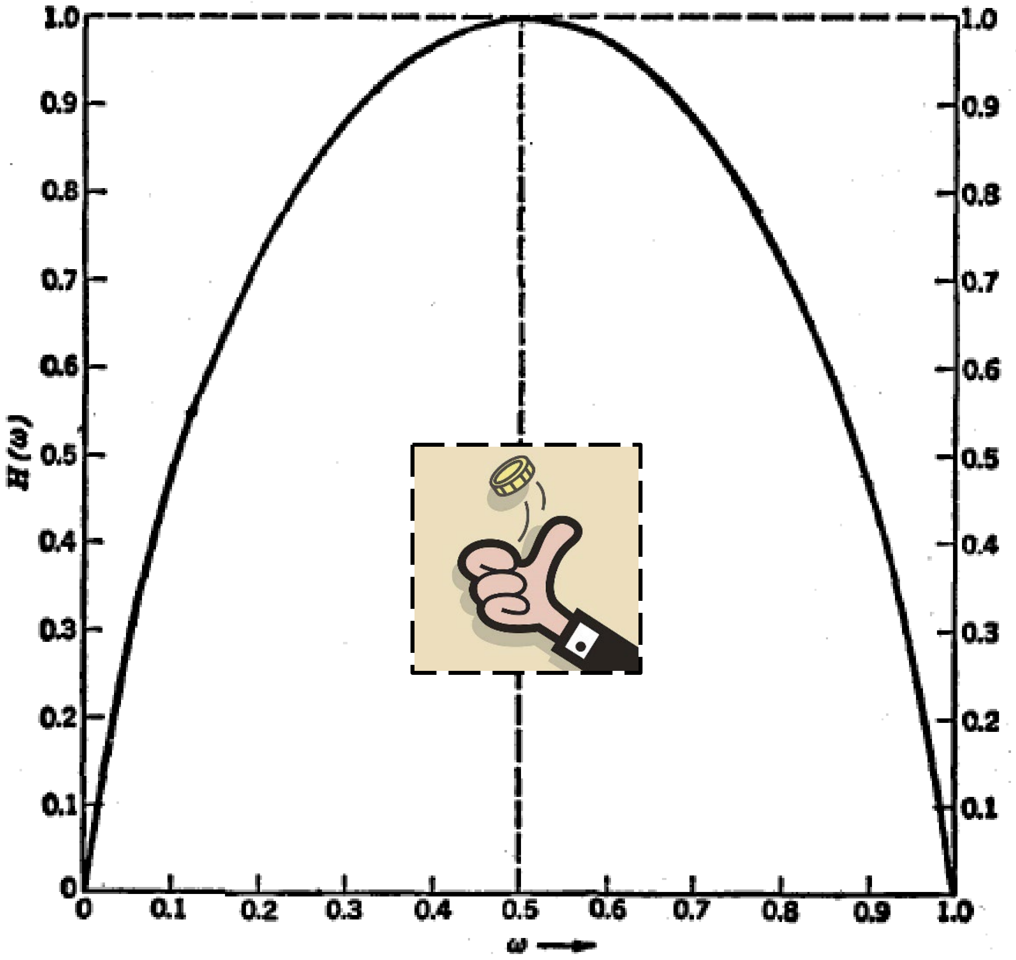


FIG. 2-3. $H(\omega)$, función entropía.

Propiedades de la entropía

a) La entropía es **no negativa**. Se **anula** si y solo si un estado de la variable es igual a 1 y el resto es igual a 0 (caso determinista)

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:

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

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

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

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

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

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

$$= 3 \text{ bits/símbolo}$$

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

- Bloque
- Singular
- Separable (unívocamente decodificable)

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.

Códigos eficientes

- Asignar palabras de código *más cortas* a los **símbolos de fuente** *más probables*
  - **L_i** : longitud de la palabra que codifica al símbolo (mensaje) m_i de la fuente
  - **p_i** : probabilidad de aparición de m_i
  - **r** : # de símbolos diferentes del alfabeto del código
- **$L = \sum p_i L_i$** : Longitud media de un código

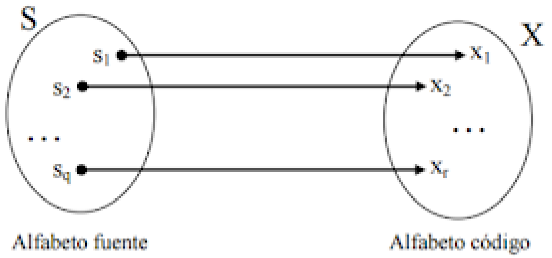
- log r : cantidad promedio información máxima de un símbolo del código
- $L \log r \geq H(S)$
  - Y para la una fuente binaria?

- **$h = H(S) / (L \log r)$** es la **Eficiencia del Código.** $(h_{max} = 1)$

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).



Símbolos de la fuente	Código
s_1	0
s_2	11
s_3	00
s_4	01

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:

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

- 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

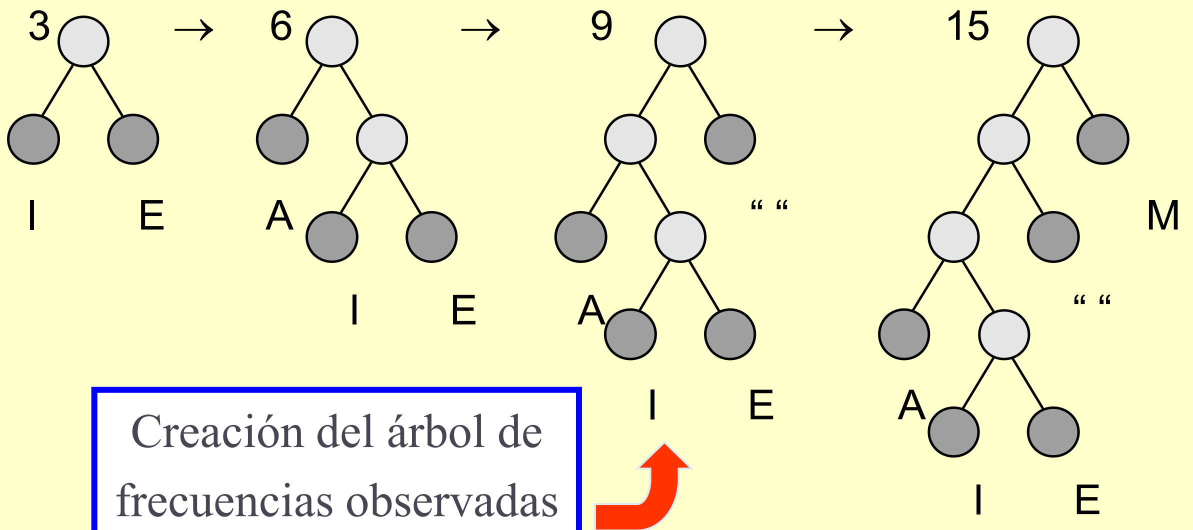
- Un Codificador Óptimo es aquel que para codificar un mensaje X usa el menor número posible de bits ("dígitos binarios").

Codificación de Huffman

Mensaje: MI MAMA ME MIMA → 15 símbolos

Letra	Frecuencia
E	1 vez
I	2 veces
A	3 veces
“ “	3 veces
M	6 veces

Ocurrencias →



Creación del árbol de frecuencias observadas

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.

Los medios de transmisión **reales**

Sus perturbaciones y no idealidades

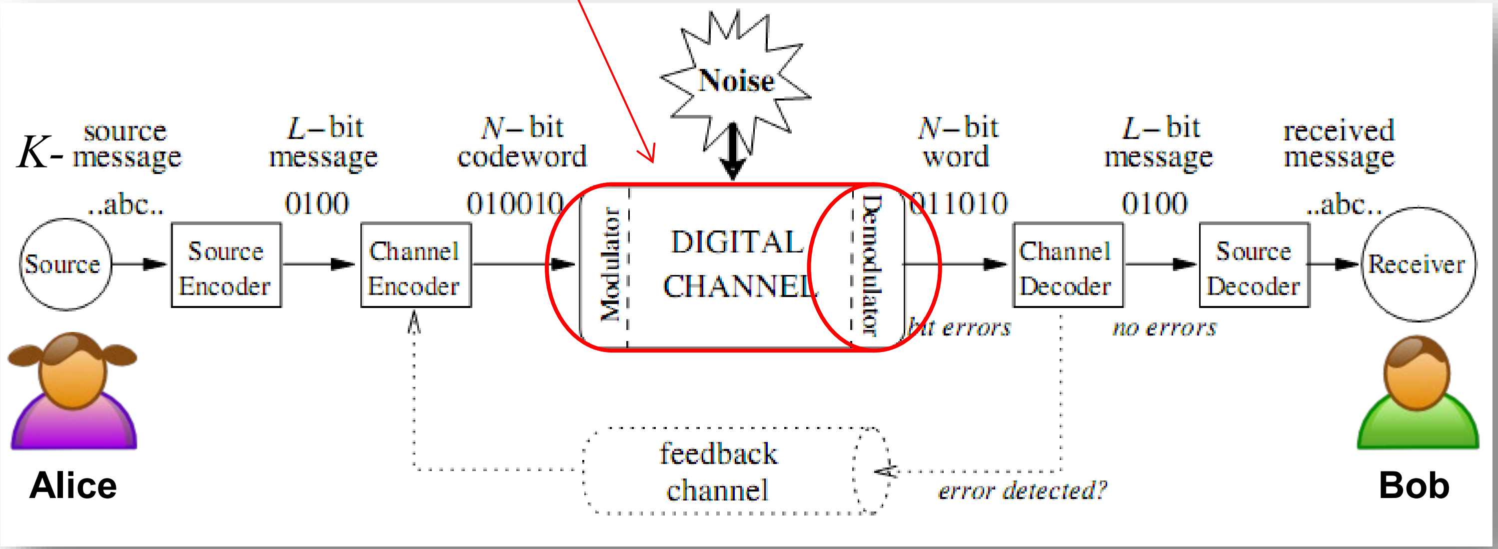
Modelo de un Sistema de Comunicaciones

Sistema de Comunicación ideal:

Modelo de un Sistema de Comunicaciones

Sistema de Comunicación real:

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



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

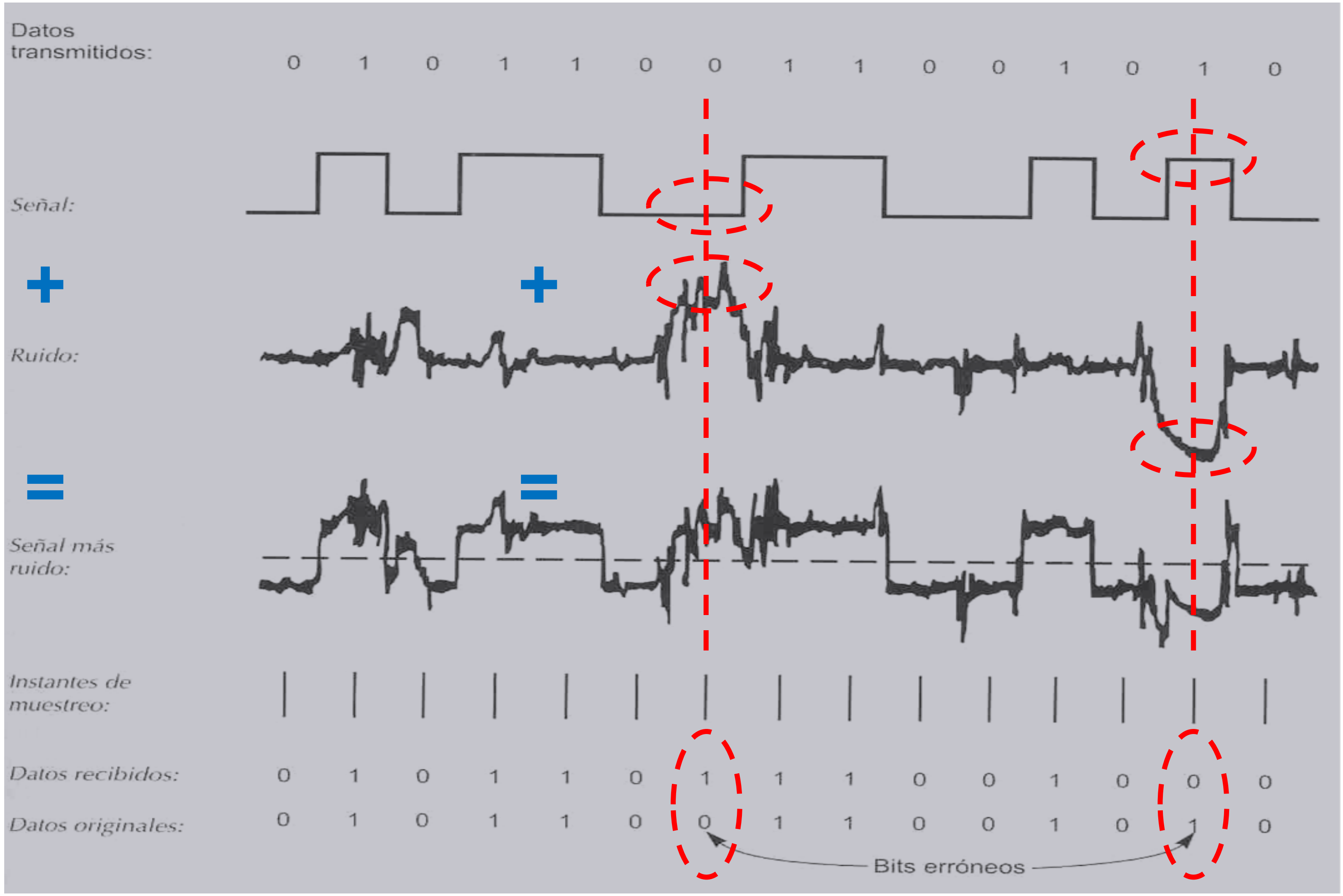
Ruido (1)

- 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



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 (errores por segundo)
  - 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:
  - Un aumento del ancho de banda ***B*** aumenta el ruido
  - Un aumento de potencia de señal ***S*** aumenta las no linealidades y el ruido de intermodulación
- Según Shannon, la velocidad binaria teórica máxima para un canal CON RUIDO será:

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

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, luego SNR=$10^{(24/10)}$=251

Calcular ancho de banda

- Respuesta: ***B*** = 1 MHz

Calcular la velocidad binaria teórica máxima y el número de niveles

- Respuesta: ***C*** = 8 Mbps (en realidad 7.97727…)
- Respuesta: ***M*** = 16 niveles

Visión integradora de la Teoría de la Información

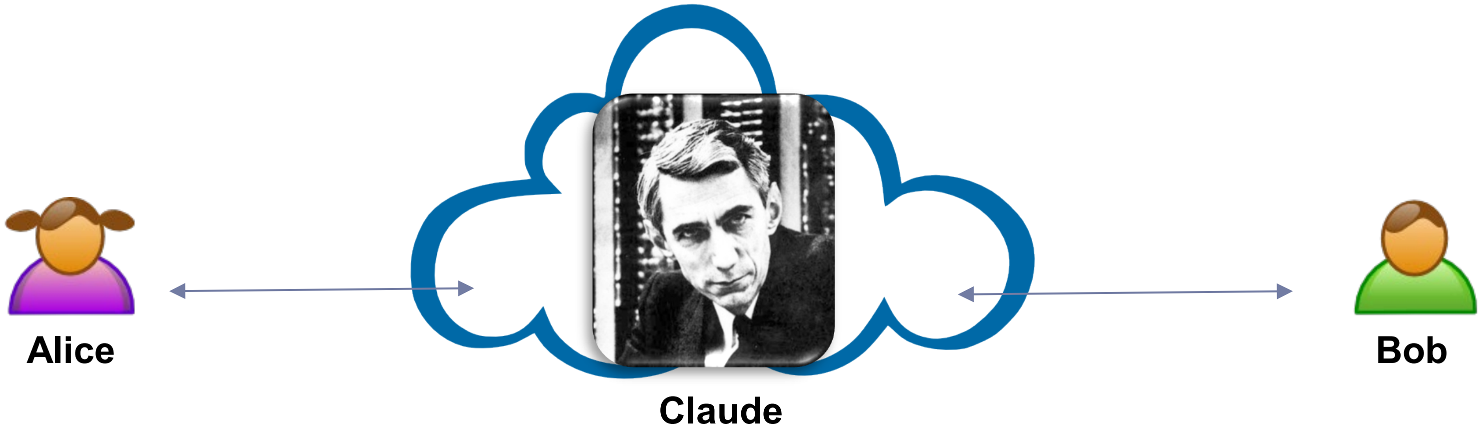
- "Límites fundamentales" y "Resultados no intuitivos"

  - ¿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**)

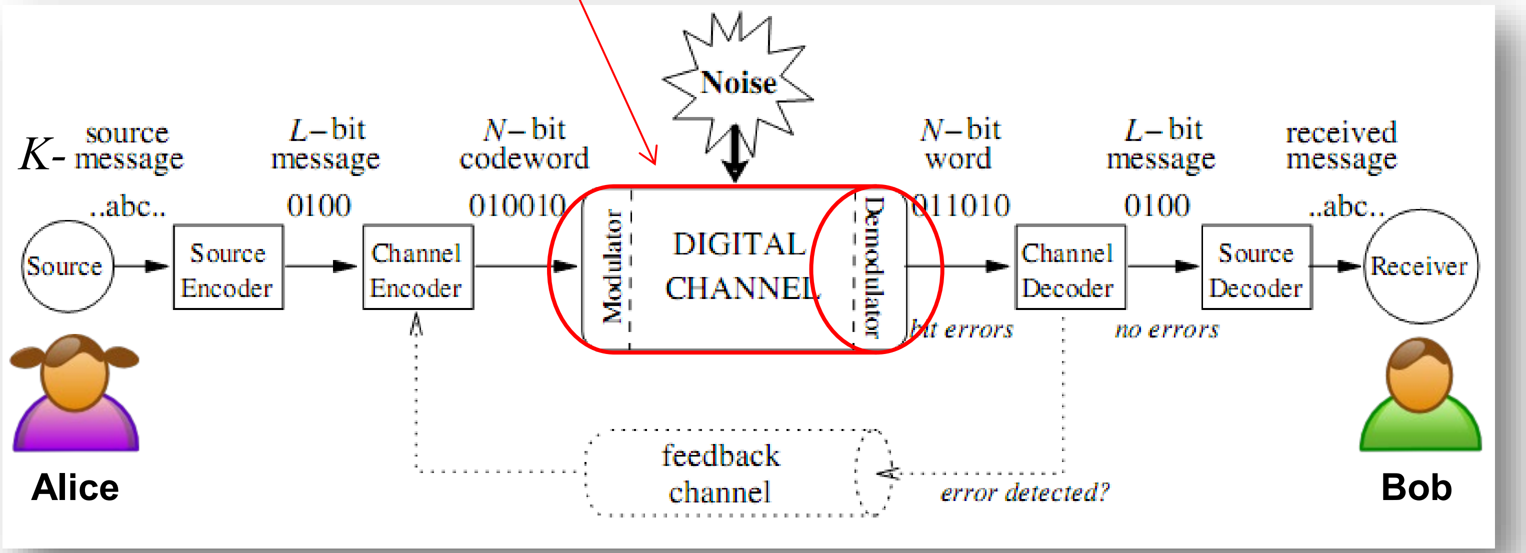
- Estos aspectos se reflejan en aplicaciones prácticas.

Marco de Referencia



Marco de Referencia

Sistema de Comunicación real:
Canal sometido a ruido, limitado en potencia y en ancho de banda

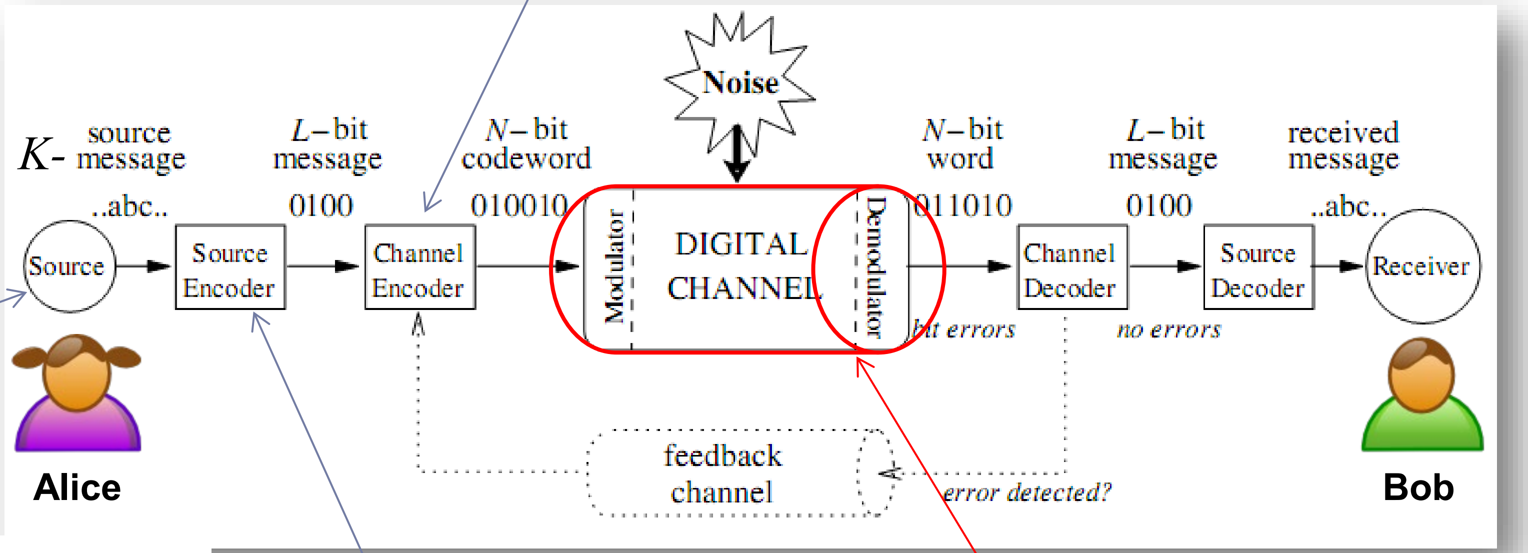


Marco de Referencia

3° Teorema de Codificación de Canal

Comunicación **Confiable** (error bajo control)

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



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

$0 \leq H(S) \leq log_2K$

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

2° Teorema de Codificación de Fuente

Comunicación **Eficiente**

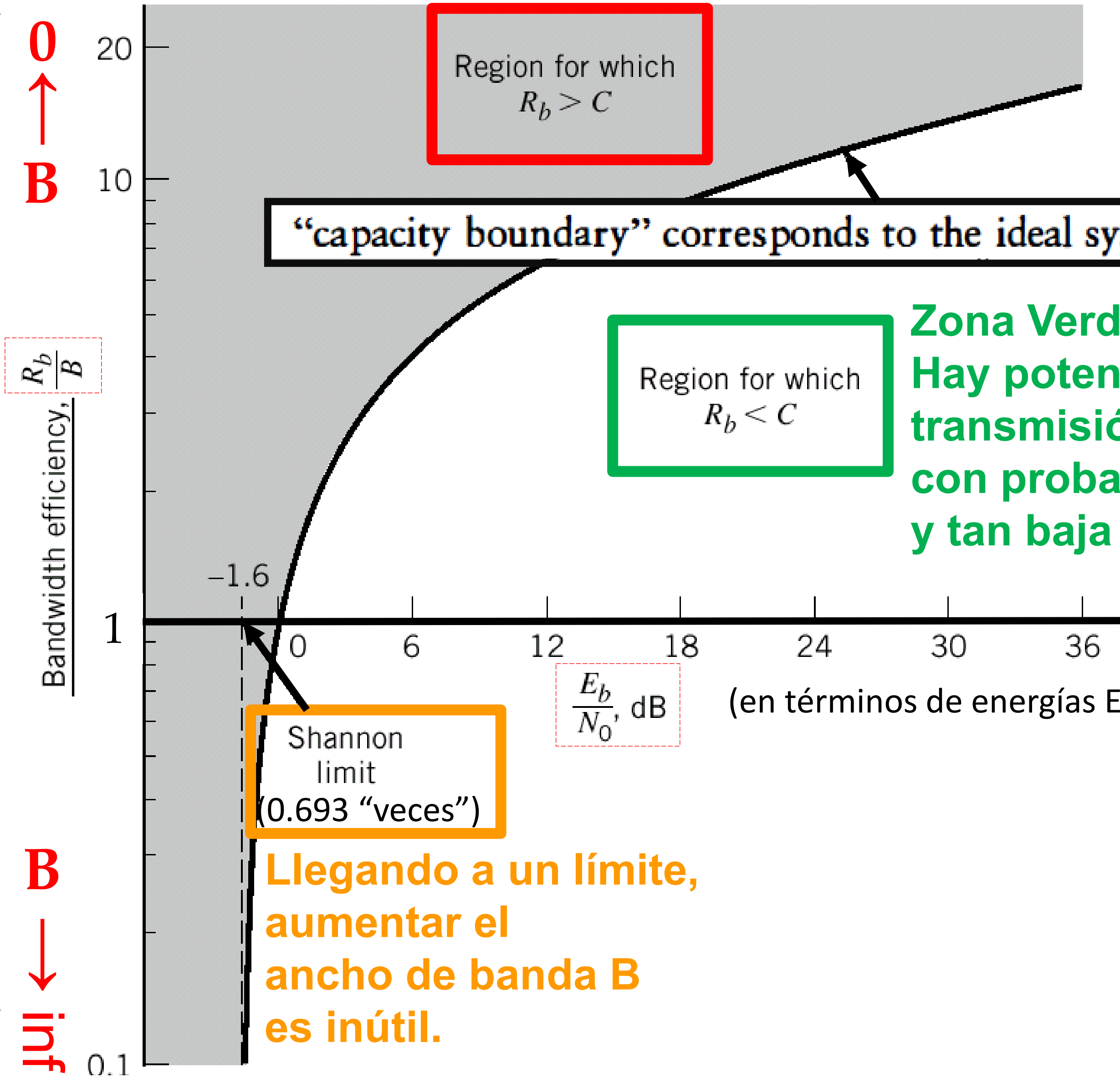
$$C = B.log_2(1 + \frac{S}{N})$$

4° Teorema de Capacidad de Información

Compromiso Ancho de banda vs. Relación Señal a Ruido

Diagrama de “Eficiencia del Ancho de Banda” o “El semáforo de Shannon”

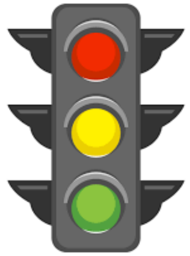
Zona Roja: El sistema está condenado a tener una muy alta probabilidad de errores, sin posibilidad de control.



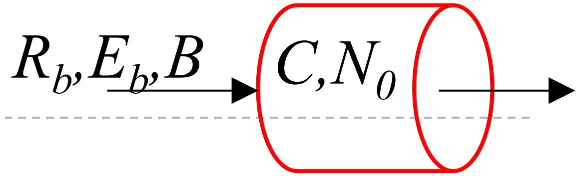
Zona Verde:
Hay potencial para soportar transmisión libre de errores con probabilidad controlada y tan baja como se desee.

SNR (Signal to Noise Ratio)
(en términos de energías E_b y N_0, no de Potencias S y N)

Llegando a un límite, aumentar el ancho de banda B es inútil.



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



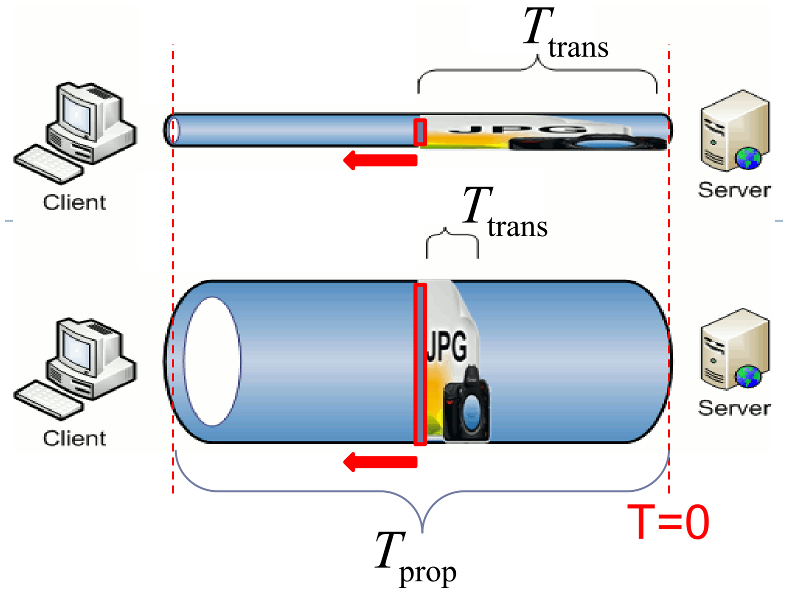
$$\frac{C}{B} = \log_2\left(1 + \frac{E_b}{N_0}\frac{C}{B}\right)$$

S

N

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

Delay (retardo total)



"descarga de una foto desde un servidor"

- T_{prop} = retardo de <u>propagación</u>
  - Desde unos pocos microsegundos hasta a cientos de milisegundos.
    Significativo para: enlaces muy distantes.
- T_{trans} = retardo de <u>transmisión</u>
  - = 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 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 30 Km 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/