

# Sincronismo

---

EDICIÓN 2024

# Agenda

---

---

## **Introducción**

Motivación

Definiciones

---

## **Fuente de Reloj**

GNSS

Osciladores

---

## **Estándares**

Tipos de Redes

Funcionamiento y Desempeño

---

## **Protocolos en Redes de Paquetes**

SyncE

NTP

PTP

---

# Introducción

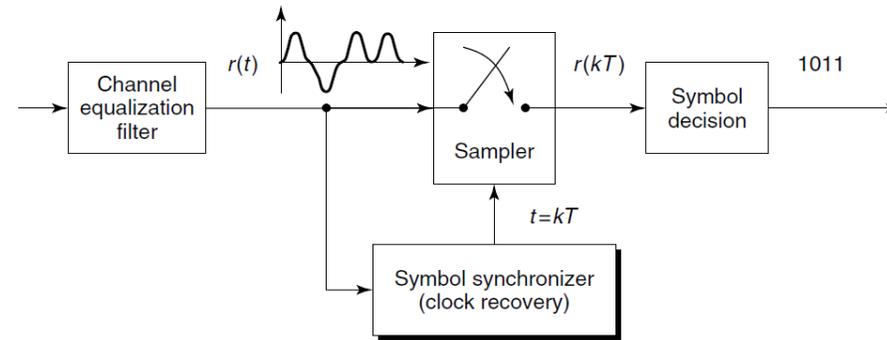
---

# ¿Por qué es necesario sincronismo?

En sistemas digitales, es necesario sincronismo a varios niveles:

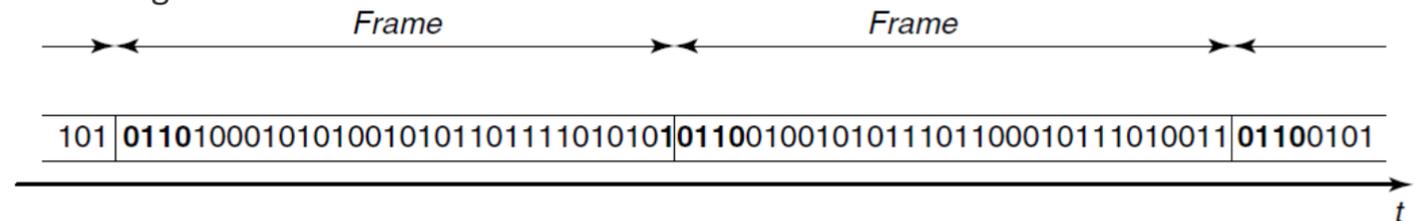
## Sincronismo de **símbolos**

- Permite decodificar correctamente cada bit



## Sincronismo de **tramas**

- Permite identificar el comienzo de tramas en redes digitales



## Sincronismo de **red**

- Permite que todos los elementos de la red estén sincronizados

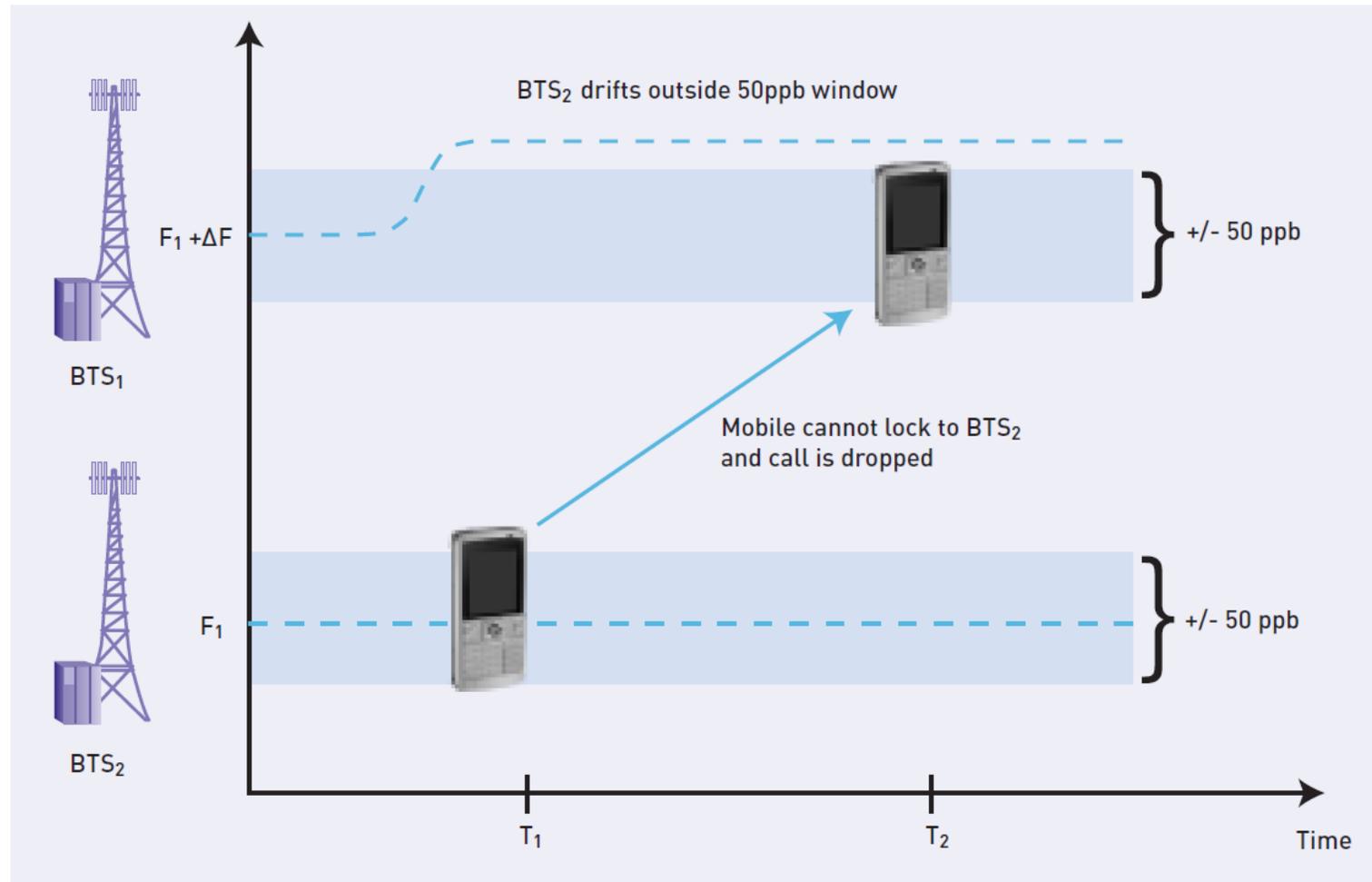
## Sincronismo de **relojes de tiempo real**

- Fundamental para la toma de acciones y seguimiento de incidentes en tiempo real

Imágenes tomadas de "Synchronization of Digital Telecommunications Networks", Stefano Bregni

# ¿Por qué es necesario sincronismo?

En redes móviles



Tomado de: Synchronizing IP Mobile Networks, Symetricom

# Efectos en ausencia de sincronismo

---

## Efectos percibidos por los usuarios

- Llamadas perdidas o cortadas
- Clics audibles en el audio
- Errores en las transmisiones
- Artefactos en el video (pixelado, congelamientos, ...)
- Enlaces de datos “lentos”
- Errores en la facturación
- Imposibilidad del seguimiento de fallas

# Sincronismo

---

El aumento constante de las velocidades de transmisión por diferentes vías y entre equipos, sistemas o nodos lejanos, requiere cada vez **mayor precisión** en los ajustes de las frecuencias utilizadas en los relojes de cada equipo.

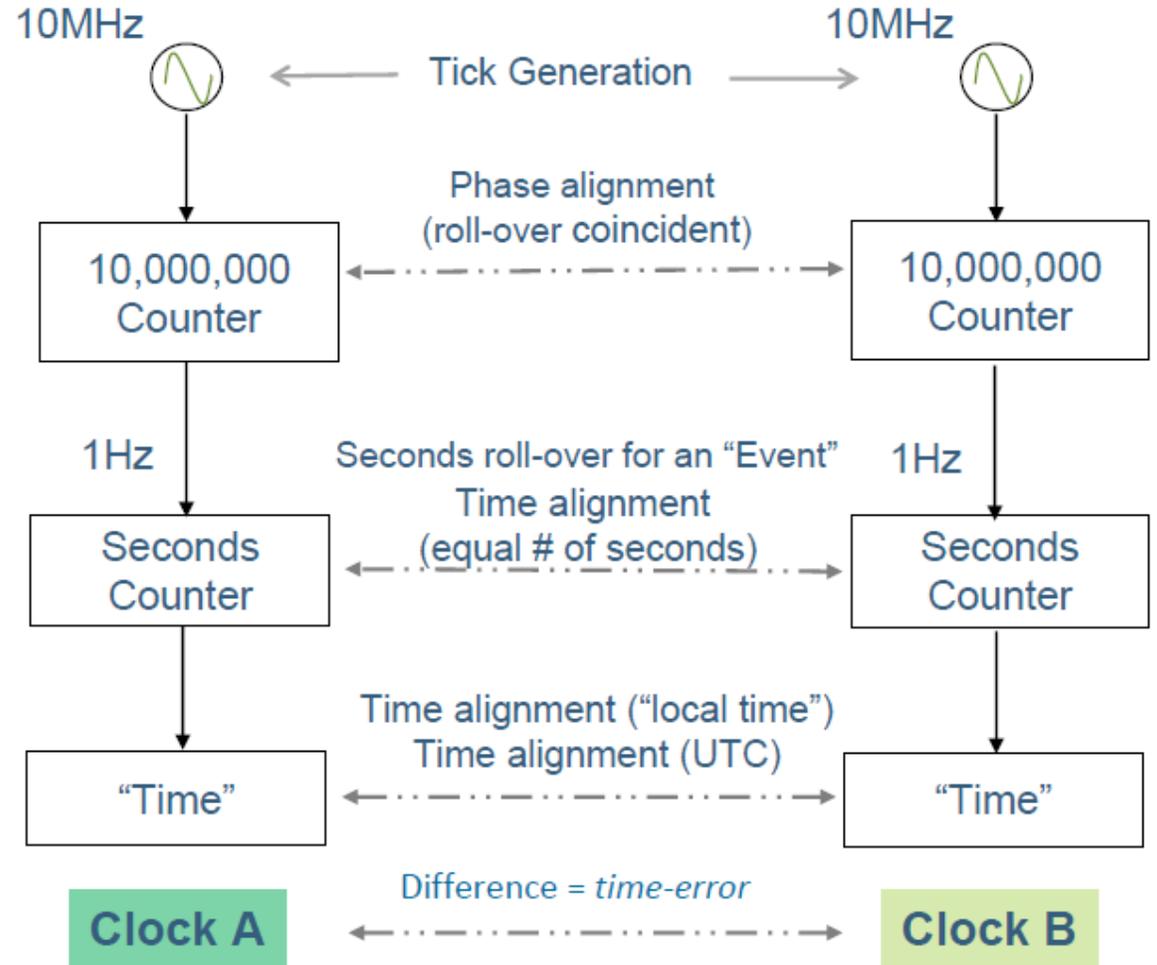
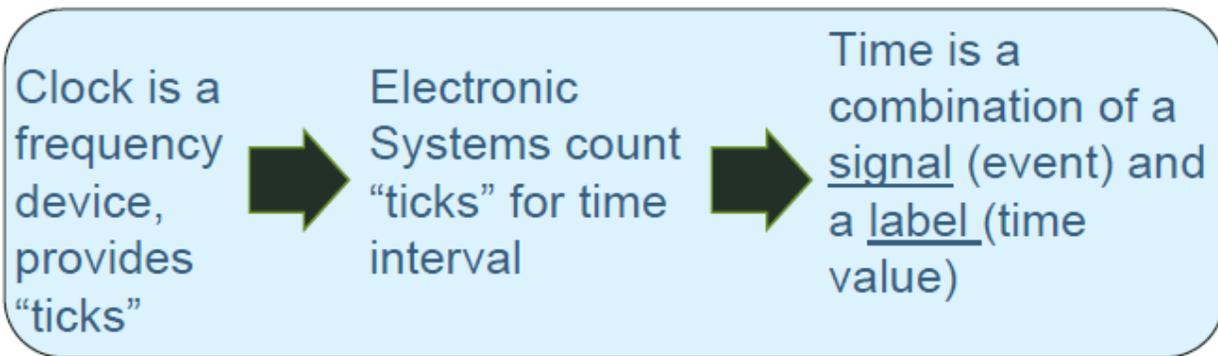
Las tecnologías de sincronismo permiten la distribución de información de ***frecuencia y tiempo*** dentro de la red de telecomunicaciones.

Para realizarlo se emplea una red de **relojes** extendidos sobre un **área** geográficamente **amplia**.

Se sincroniza **frecuencia y tiempo** de todos los relojes de la red, utilizando las capacidades de los enlaces de la red.

# Frecuencia, Fase y Tiempo

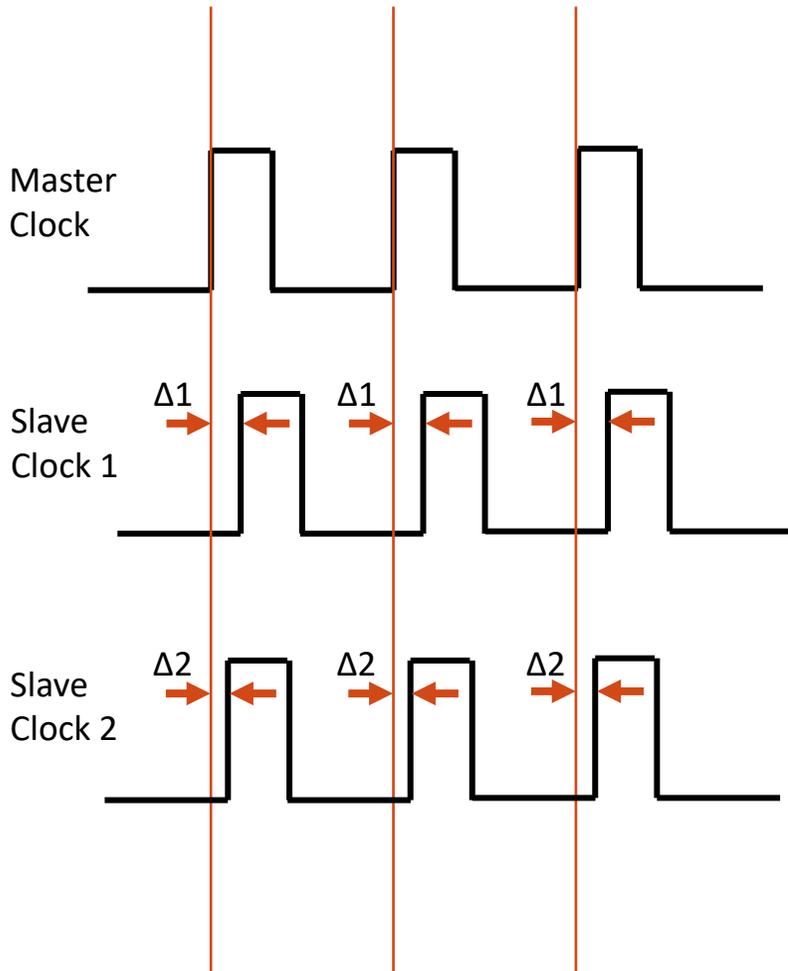
Aligning (or Synchronization) of two Time Clocks implies:			
Frequency B	=	Frequency A	Syntonzation
Phase B	=	Phase A	Roll-over instant
Seconds B	=	Seconds A	Elapsed time equal
"Time": Same formatting convention, time-zone, etc.			



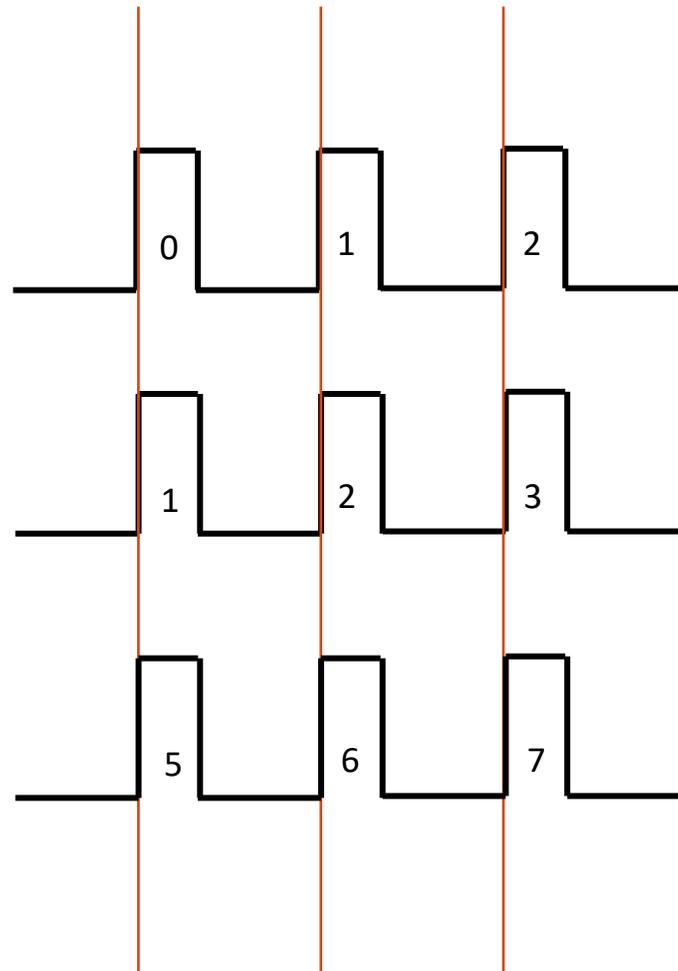
Tomado de: IEEE 802 Plenary – Tutorial on Synchronization: A Key Function in Time-Sensitive Networking and Beyond, 3/2/2021

# Frecuencia, Fase y Tiempo

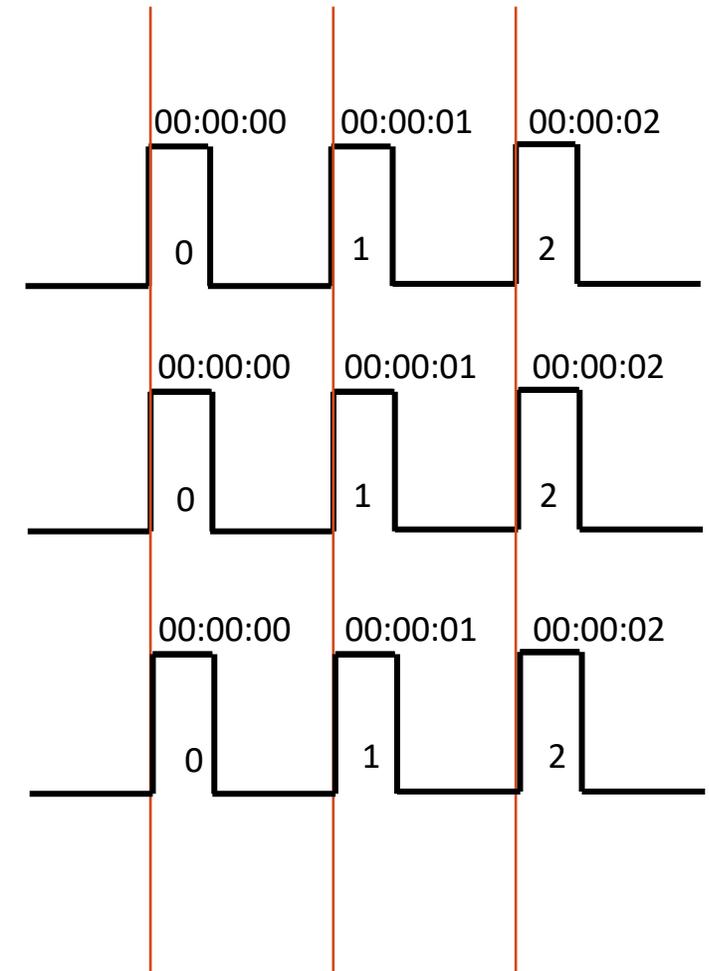
## Sincronismo de Frecuencia



## Sincronismo de Fase



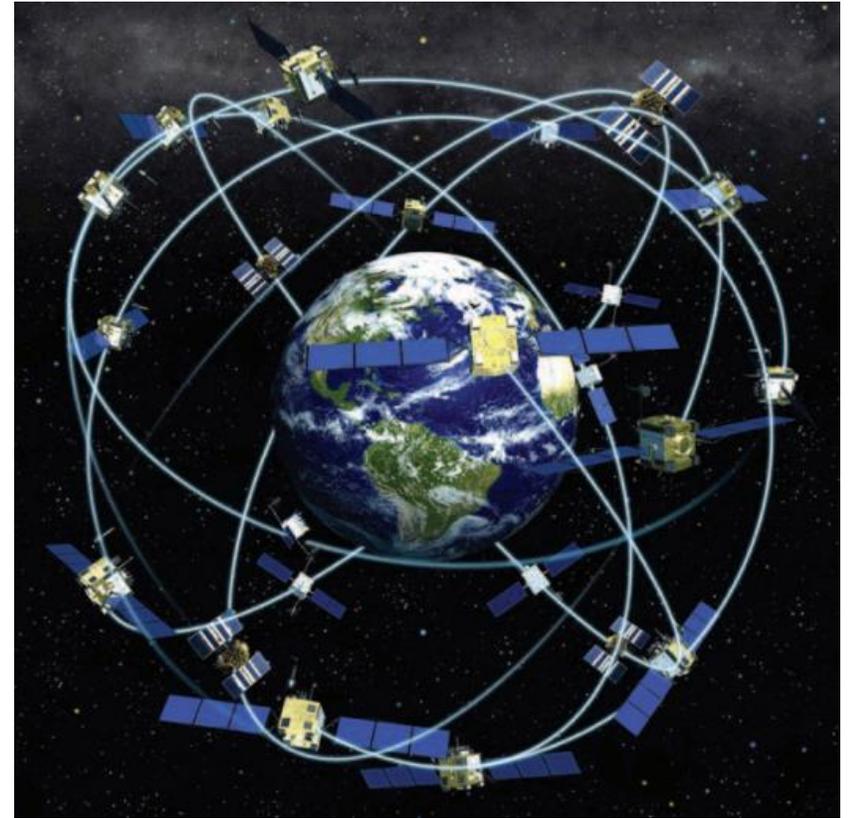
## Sincronismo de Tiempo



# Fuente de Reloj

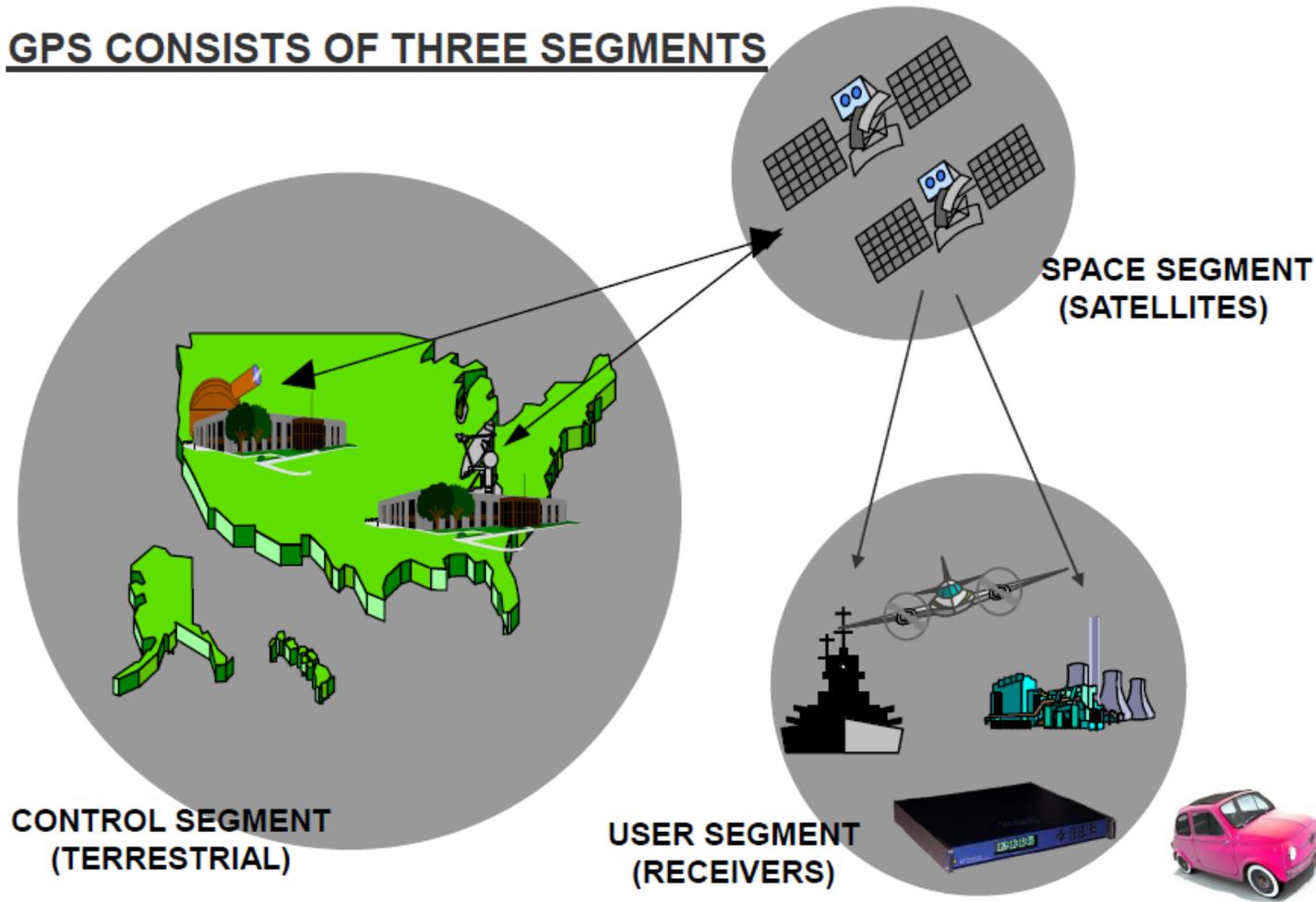
---

GNSS



# Segmentos del Sistema GPS

**GPS CONSISTS OF THREE SEGMENTS**



Imágenes tomadas de "Synch Introduction",  
Microchip

# Segmento Espacial GPS

---

## Segmento espacial GPS:

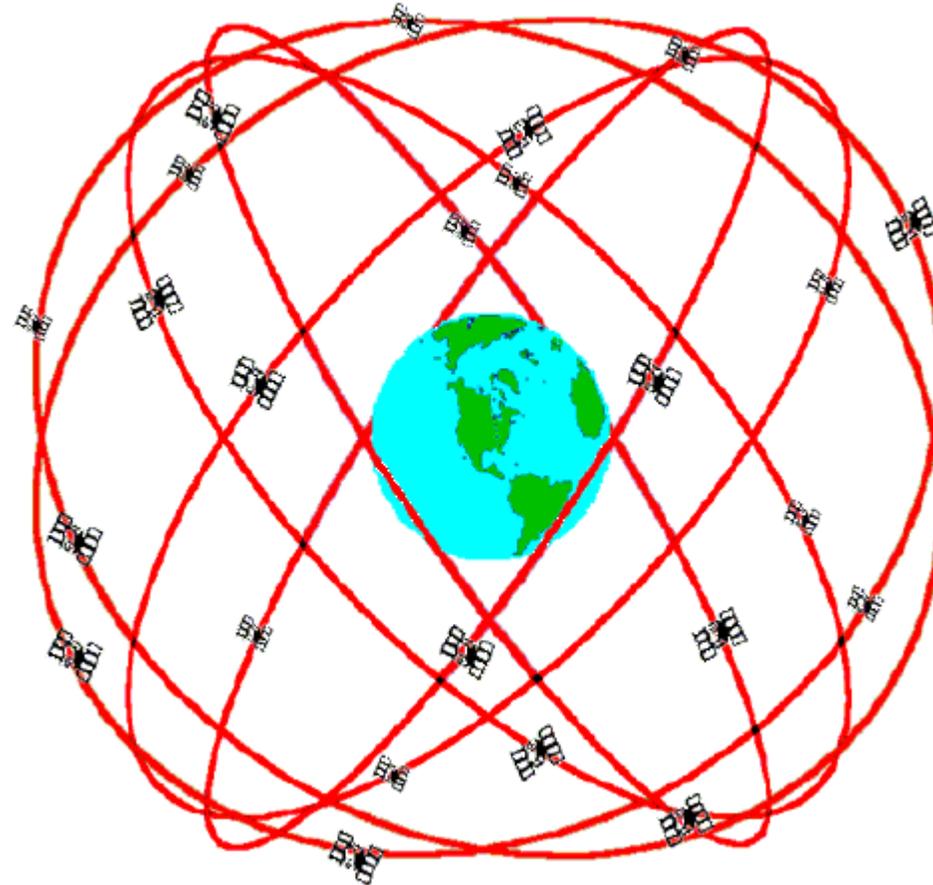
32 satélites

6 planos orbitales equiespaciados

Orbitas MEO (20200 km)

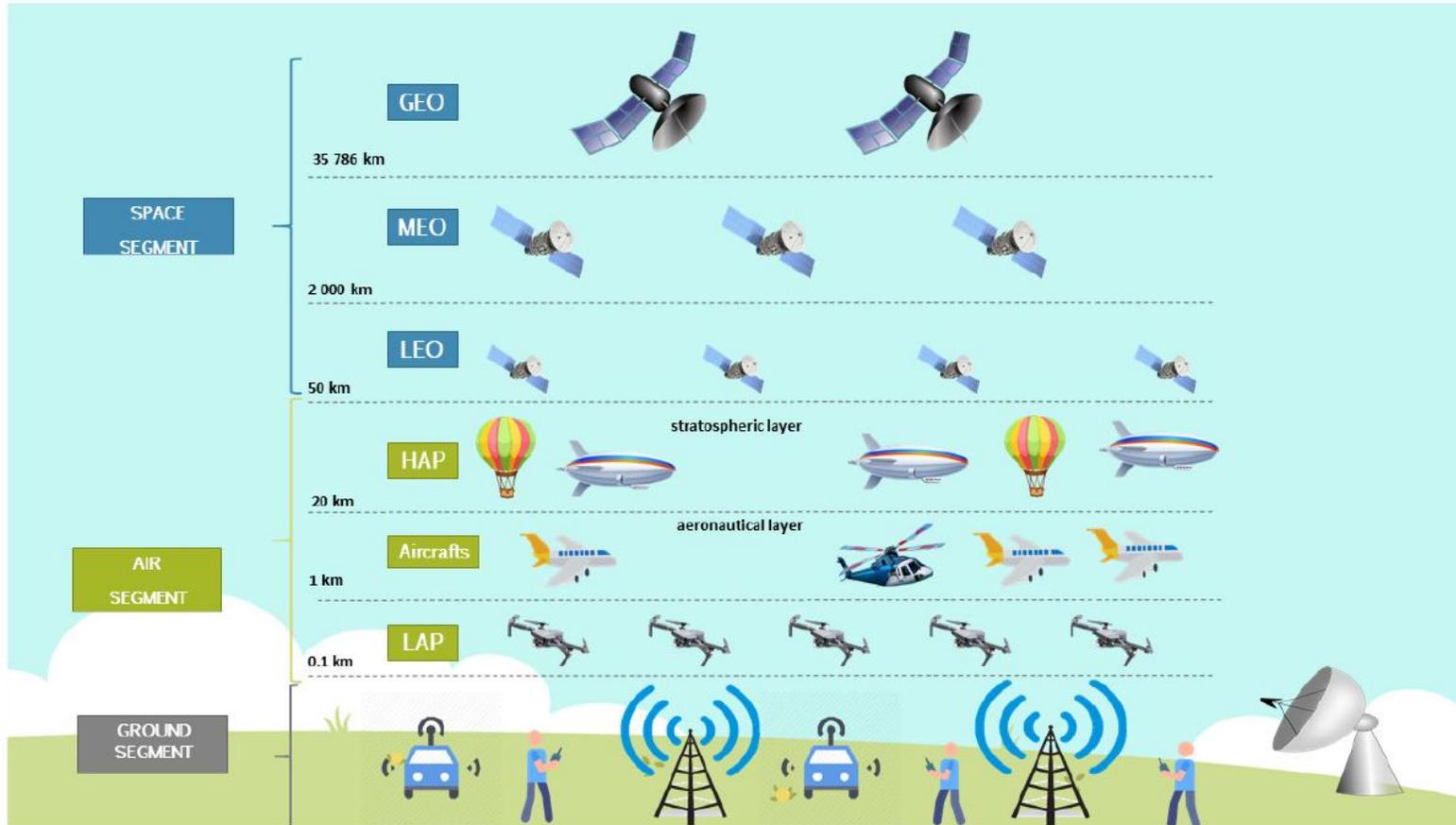
Período: 11h 58min

Tiempo de vida: 7-12 años



Imágenes tomadas de "Synch Introduction",  
Microchip

# Segmento Espacial: GEO, MEO, LEO



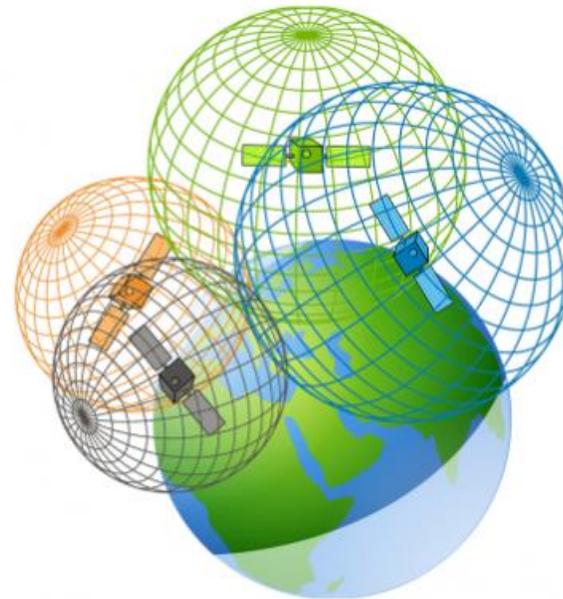
Imágenes tomadas de "Non-Terrestrial Networks in a Nutshell", Msadaa et. al

# Segmento Espacial GPS

---

## Trilateración (midiendo distancias)

- Satélites tienen relojes atómicos (muy precisos)
- Posición a partir de medición de tiempo
- Satélite hace broadcast de su posición y el tiempo.
- Receptor realiza la trilateración:
  - $D1 = c \times t1$
  - $D2 = c \times t2$
  - $D3 = c \times t3$
  - ( $D4 = c \times t4$ )



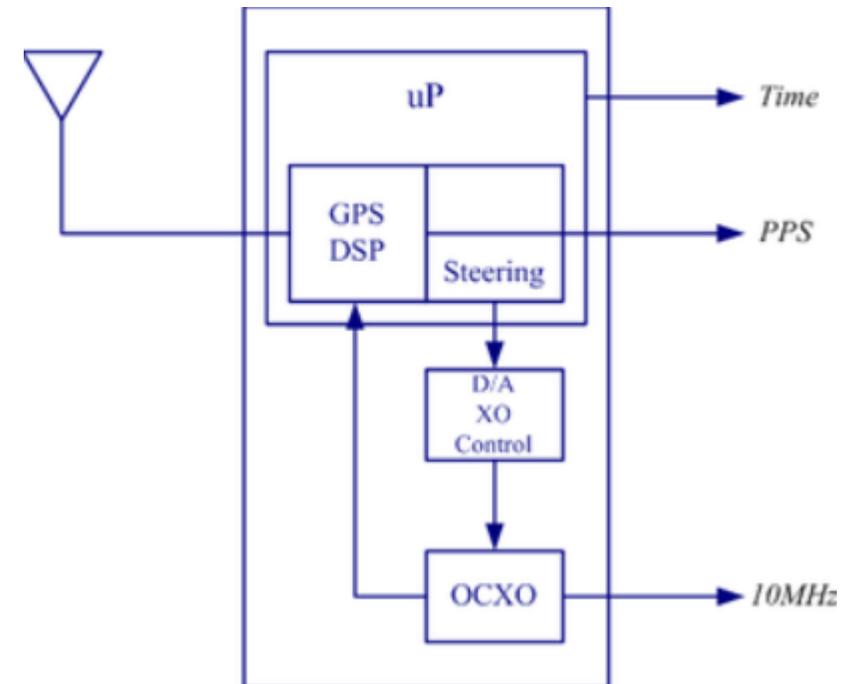
No se usa Triangulación (midiendo ángulos)

# GPS y Tiempo

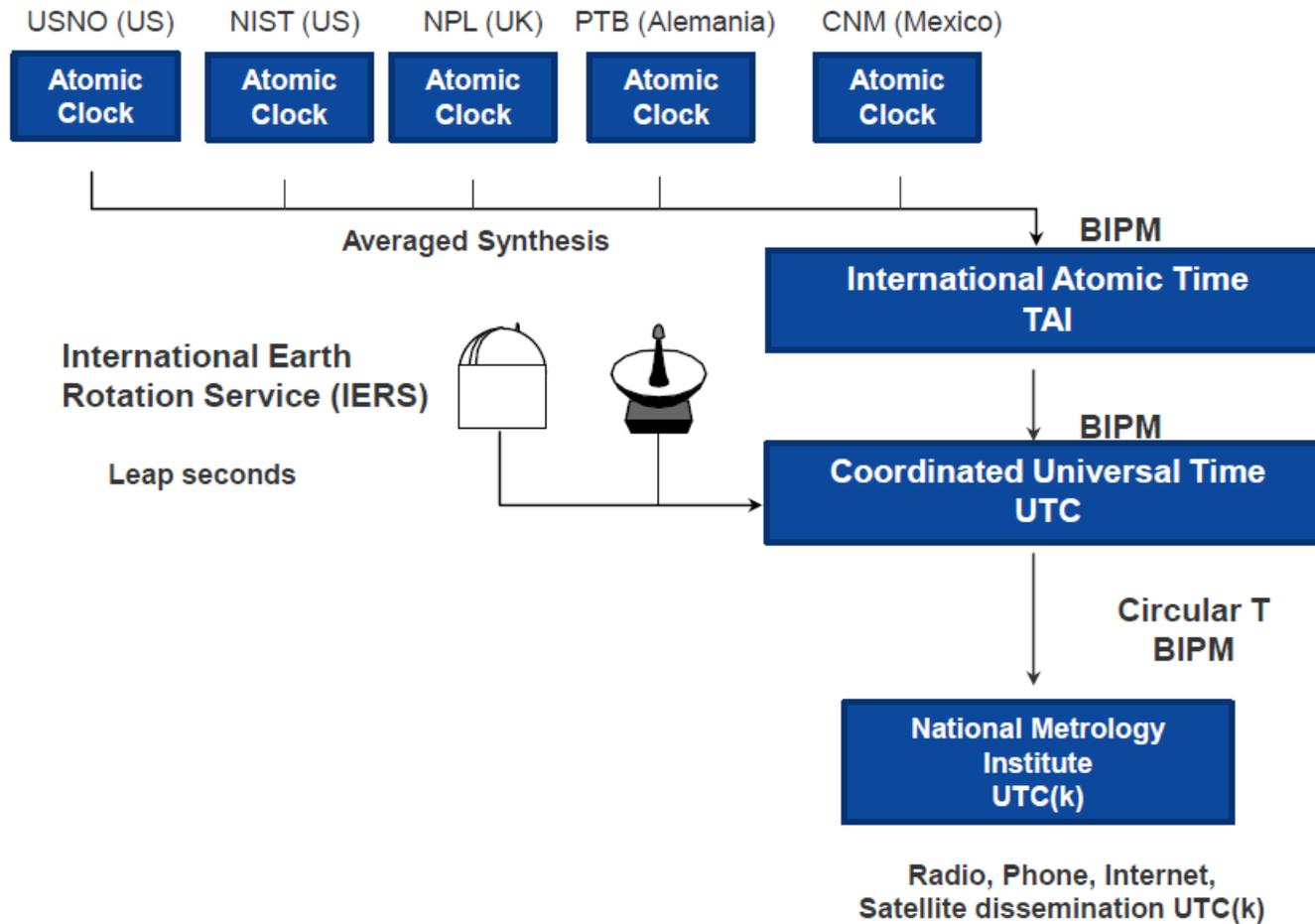
---

En tierra: GPSDO:

Oscilador disciplinado por GPS

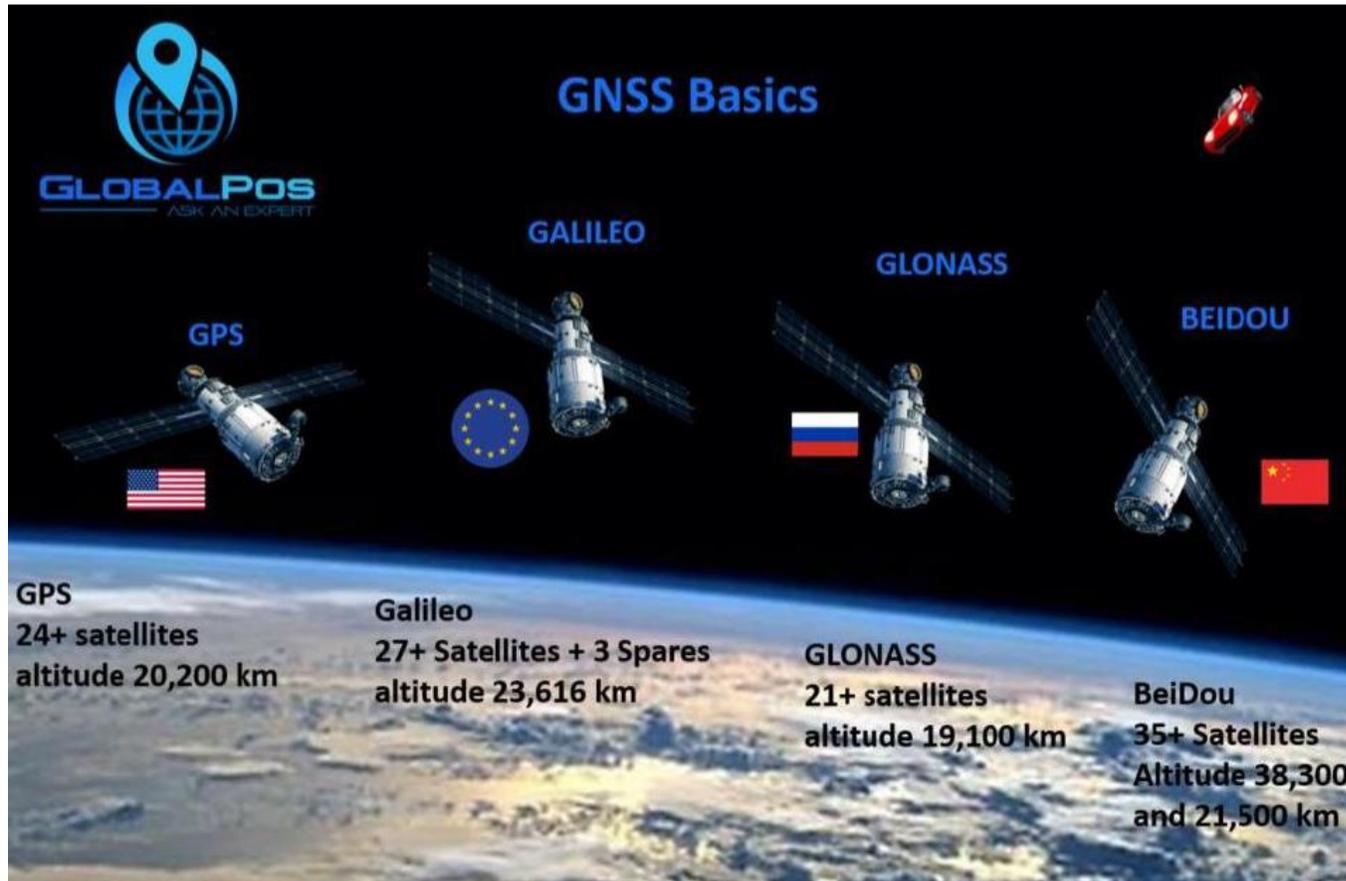


# Escala de Tiempo UTC



Imágenes tomadas de "Synch Introduction", Microchip

# Constelaciones GNSS

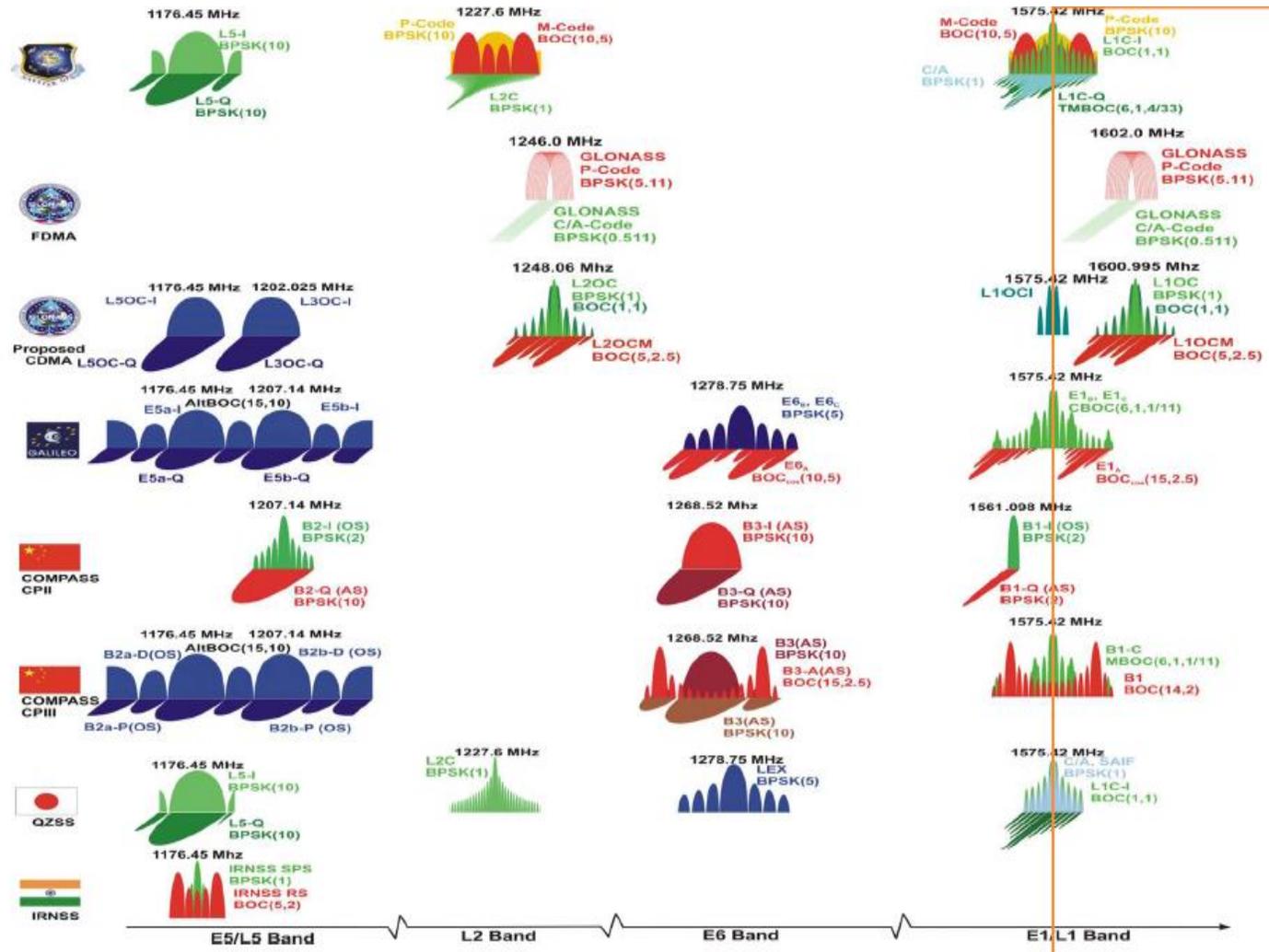


GNSS:

Global Navigation Satellite System

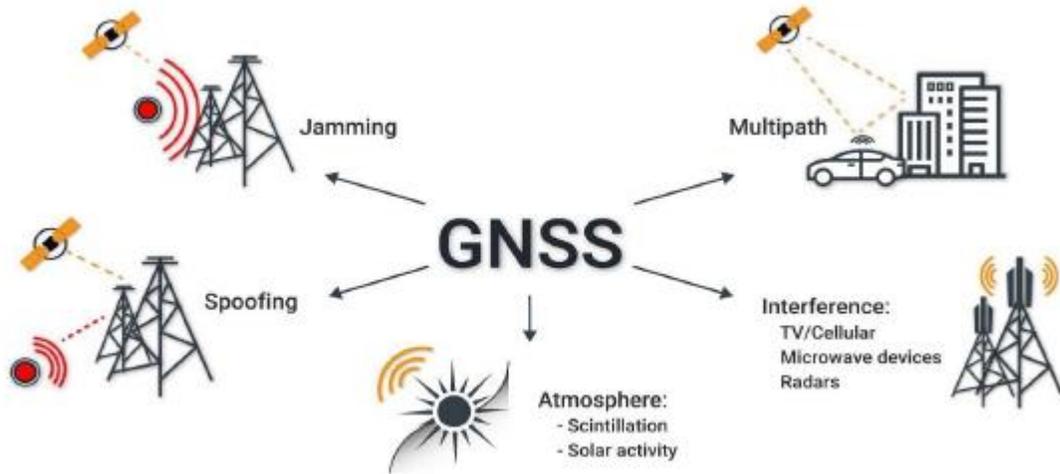
Imágenes tomadas de "About Synchronization Solutions", Albedo

# Espectro GNSS



Imágenes tomadas de “WSTS 2019 SYNC Masters”, Marc A. Weiss

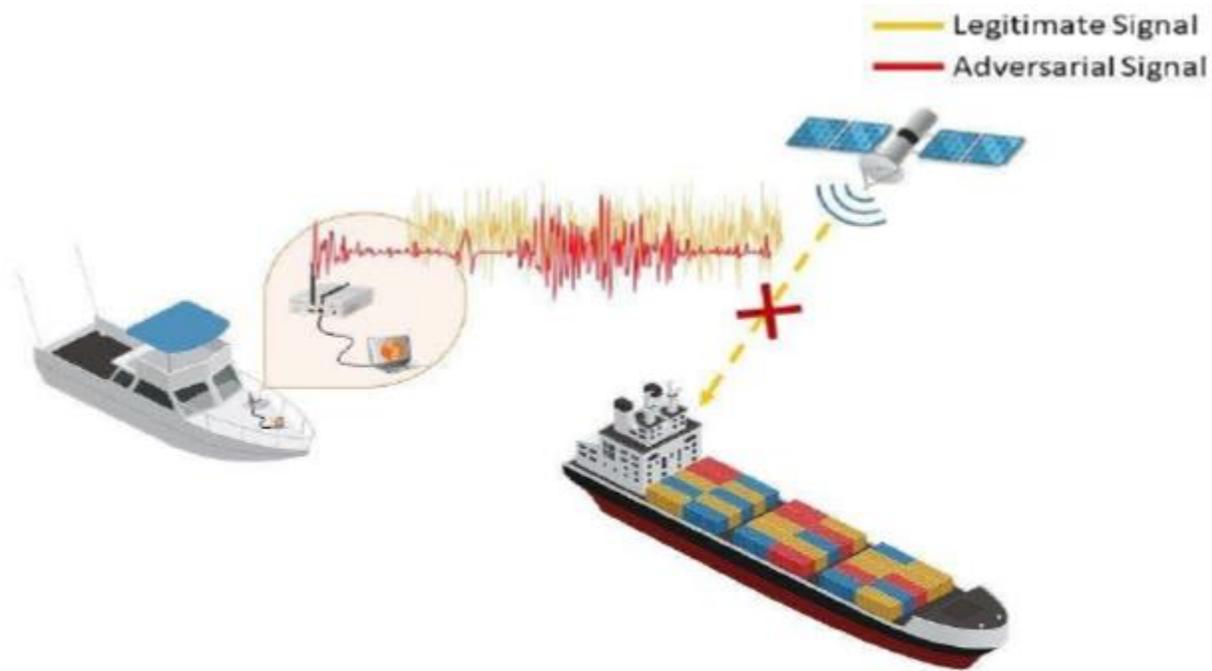
# Debilidades GNSS



- Fallas de instalación en sistemas de antenas
- Efecto multicamino
- Interferencias
- Ruido: clima, atmósfera, espacio, actividad solar
- Ciberataques: jamming/spoofing
- Emisiones fuera de banda (no intencionadas)
- Emisiones en banda (misma u otras constelaciones)

Imágenes tomadas de "About Synchronization Solutions", Albedo

# Jamming



- Señal de gran potencia en la misma banda que la señal GNSS
- Robar un auto (pérdida de posición GPS)
- Producir apagones

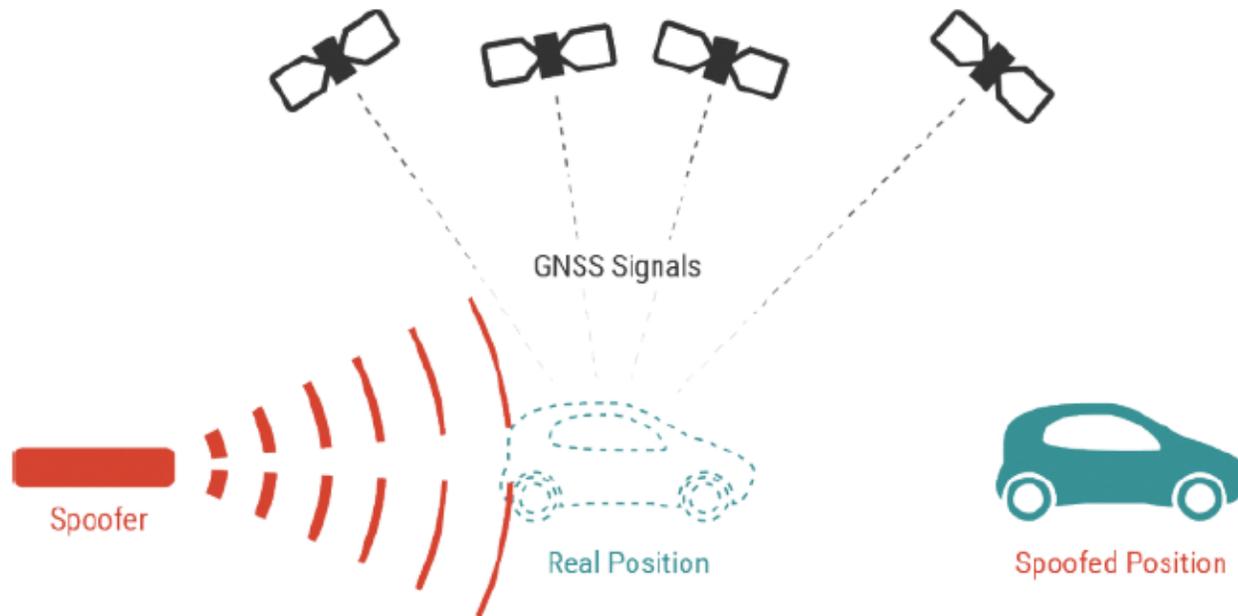
Imágenes tomadas de “About Synchronization Solutions”, Albedo



- Antena “Anti Jamming”
- Adaptive digital nulling
- Jammer direction-finding

# Spoofing

- Señal idéntica a la GNSS pero con otra posición



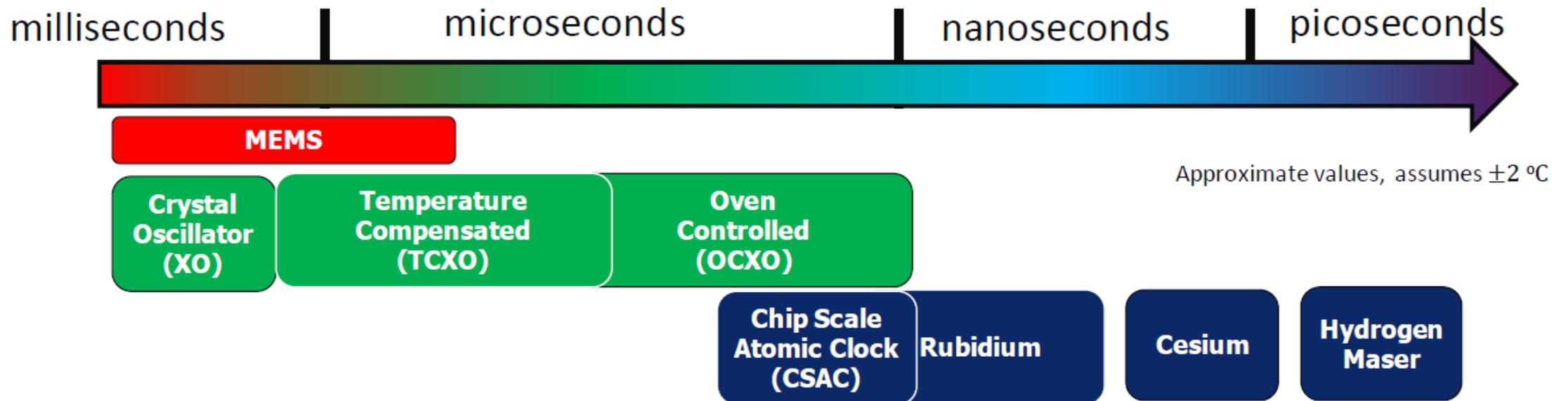
Imágenes tomadas de "About Synchronization Solutions", Albedo

# Fuente de Reloj

---

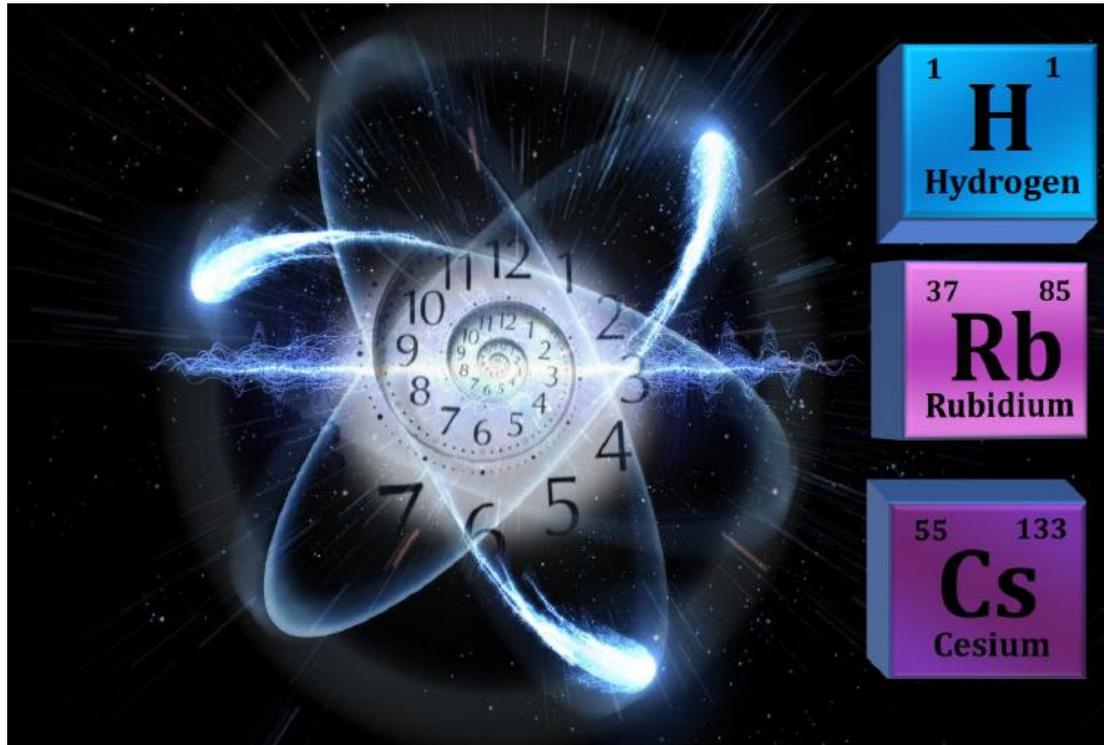
OSCILADORES

# Osciladores: diferentes precisiones



Imágenes tomadas de "Summary of Capability",  
Microchip

# Relojes atómicos

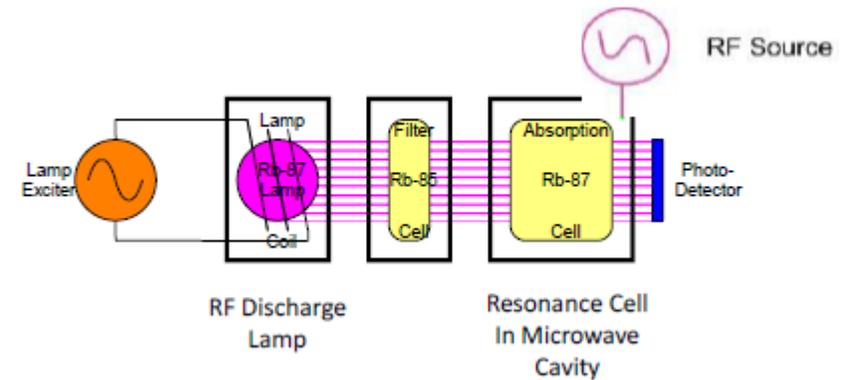
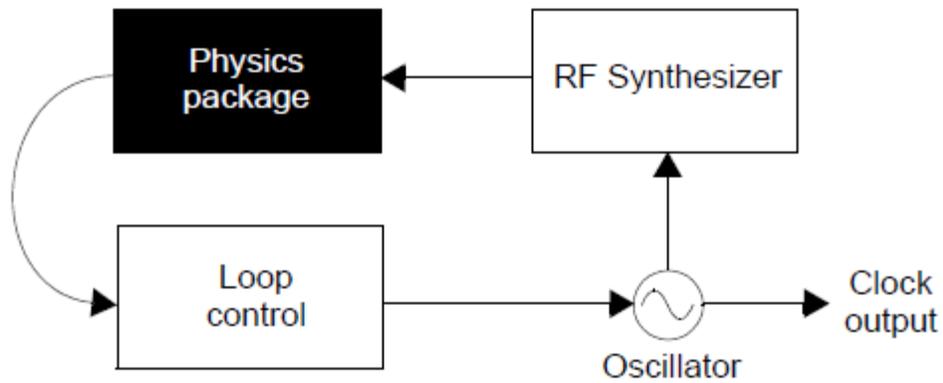


1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuc
		*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
		**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

9.19263177 GHz (Cs)  
 6.83468261 GHz (Rb)  
 1.42040575 GHz (H)

Imágenes tomadas de "Summary of Capability",  
 Microchip

# Reloj atómico: Diagrama simplificado



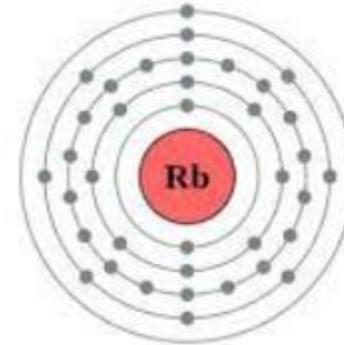
**Figure 5** *Simplified block diagram of an atomic clock. The feedback from the physics package is used to tune a conventional oscillator such as an OCXO.*

Imágenes tomadas de "PTP Testing Guide", Albedo

# Rubidio: ventajas

---

- Tamaño compacto
- Bajo costo
- Bajo consumo de energía
- Poco tiempo de calentamiento (< 30min)
- Excelente estabilidad en poco tiempo (< 1h)
- Gran vida útil (> 10 años)
- Transportable



# Comparativa osciladores

Technology	Intrinsic Accuracy	Stability (1s)	Stability (floor)	Aging (/day) initial to ultimate	Applications
Cheap Quartz, TCXO	$10^{-6}$	$\sim 10^{-11}$	$\sim 10^{-11}$	$10^{-7}$ to $10^{-8}$	Wristwatch, computer, cell phone, household clock/appliance,...
Hi-quality Quartz, OCXO	$10^{-8}$	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-12}$	$10^{-9}$ to $10^{-11}$	Network sync, test equipment, radar, comms, nav,...
Rb Oscillator	$\sim 10^{-9}$	$\sim 10^{-11}$	$\sim 10^{-13}$	$10^{-11}$ to $10^{-13}$	Wireless comms infrastructure, lab equipment, GPS, ...
Cesium Beam	$\sim 10^{-13}$	$\sim 10^{-11}$	$\sim 10^{-14}$	nil	Timekeeping, Navigation, GPS, Science, Wireline comms infrastructure,...
Hydrogen Maser	$\sim 10^{-11}$	$\sim 10^{-13}$	$\sim 10^{-15}$	$10^{-15}$ to $10^{-16}$	Timekeeping, Radio astronomy, Science,...

Imágenes tomadas de "WSTS 2019 SYNC Masters", Marc A. Weiss

# Estándares

---

TIPOS DE REDES

# Sincronismo de frecuencia en redes TDM

---

## Serie de recomendaciones ITU-T G.81x

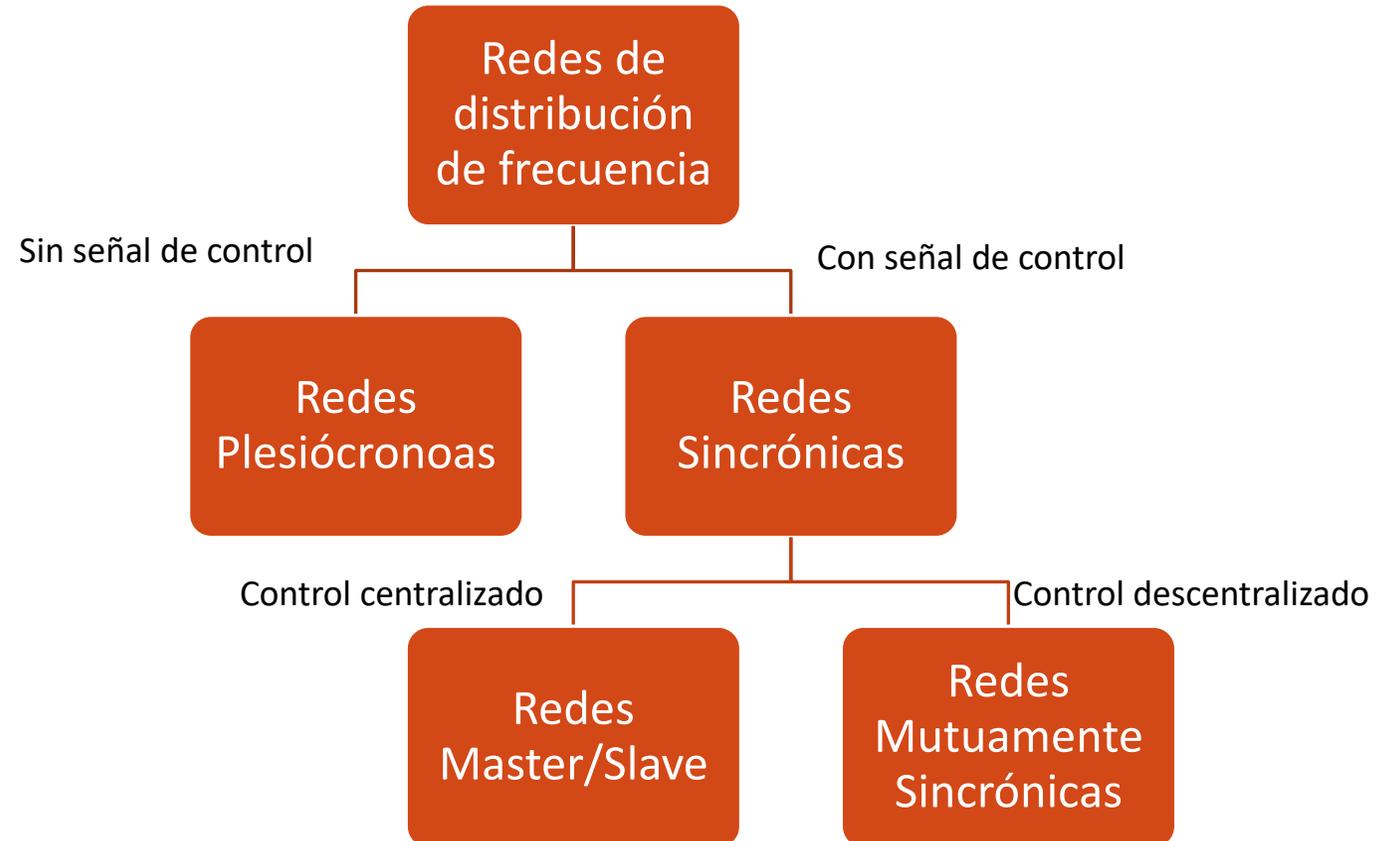
- G.810: Definitions and terminology for synchronization networks
- G.811: Timing characteristics of primary reference clocks
  - G.811.1 Timing characteristics of enhanced primary reference clocks
- G.812: Timing requirements of slave clocks suitable for use as node clocks in synchronization networks
- G.813: Timing characteristics of SDH equipment slave clocks (SEC)

## Origen de la tecnología Synchronous Digital Hierarchy (SDH)

- Se toma una frecuencia de referencia, ubicada en un Primary Reference Clock (PRC), y se distribuye en la red, utilizando la red de transmisión

# Clasificación

---

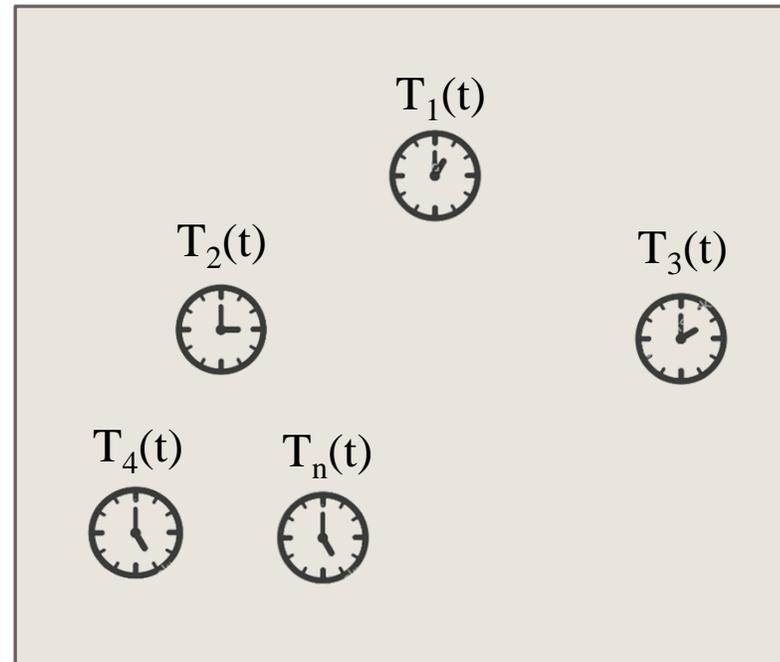


# Redes Plesiócronas

---

Cada nodo tiene un reloj

No hay señal de control que coordine la operación entre estos relojes



# Redes Plesiócronas

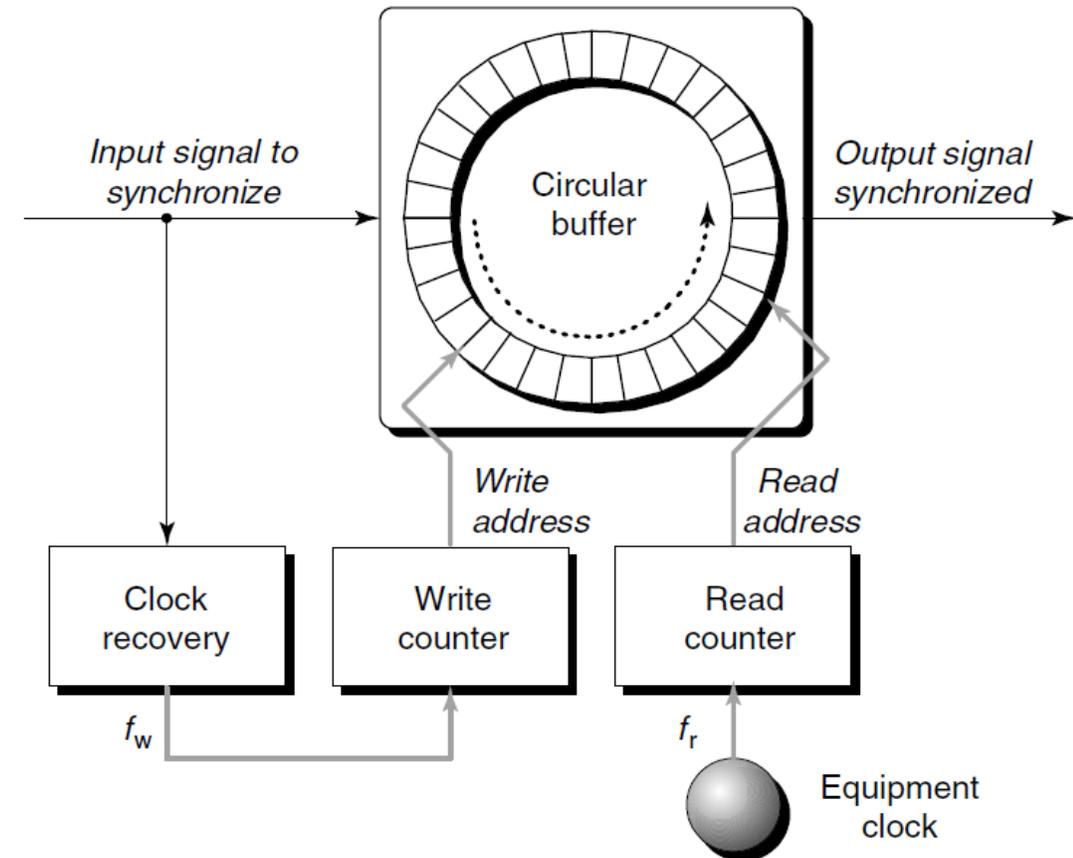
Frecuencias de relojes corren libres causando un error creciente de tiempo.

Se requieren calibraciones periódicas.

El período entre actualizaciones es función de la calidad de los relojes y diferencia de tiempo tolerable en la red.

Se requieren buffers para evitar “deslizamientos” (“slips”)

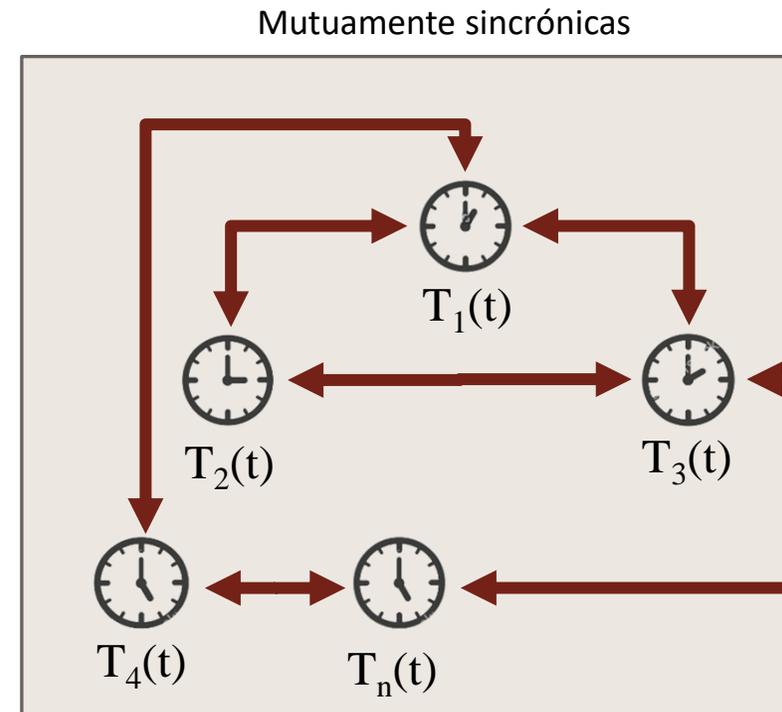
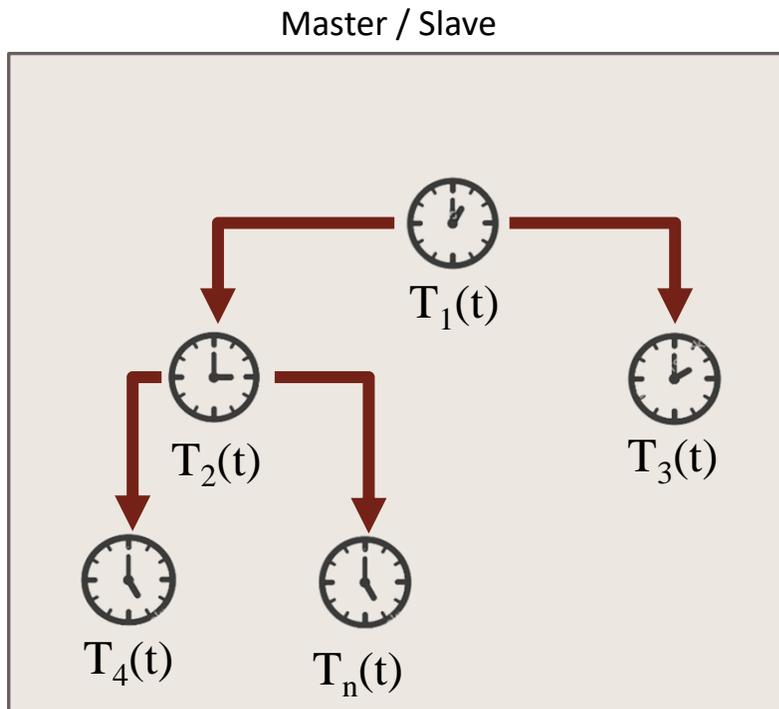
Es necesario preverlo en las tramas de “alto nivel” (estrategias de “justificación” y “relleno”, como las utilizadas en PDH)



Imágenes tomadas de "Synchronization of Digital Telecommunications Networks", Stefano Bregni

# Redes Sincrónicas

Los relojes de una red síncrona están “enganchados” en frecuencia y fase



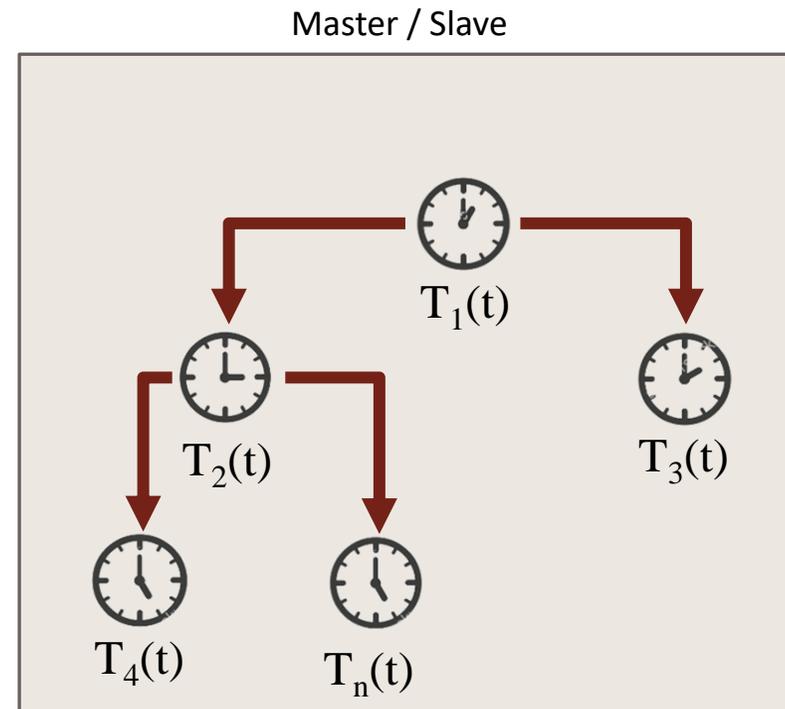
# Redes Sincrónicas -Centralizadas

Se compone de:

- Reloj central Maestro (“Master”)
- Relojes remotos Esclavos (“Slaves”)

Los relojes slave están directamente subordinados al master

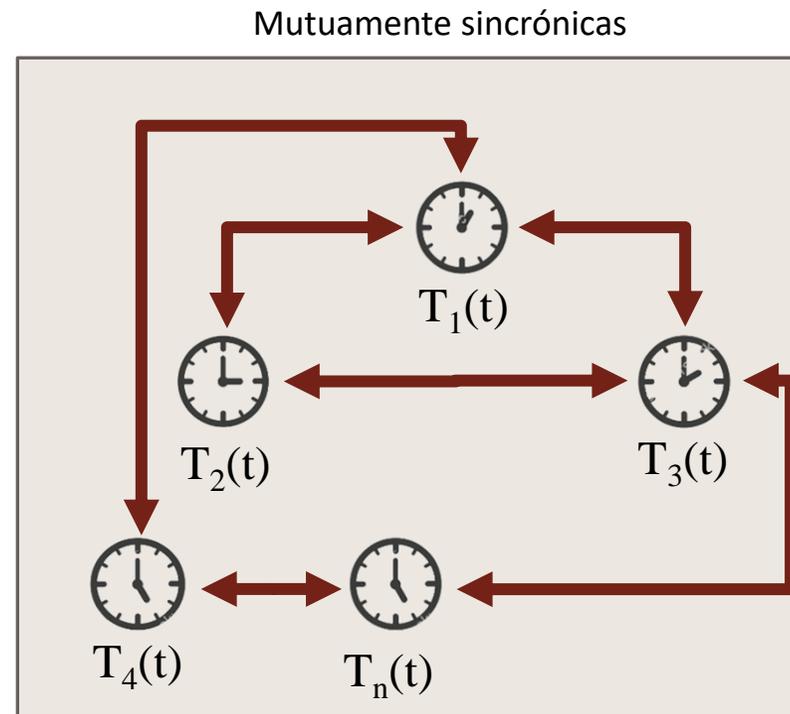
- El oscilador del slave se dice *disciplinado* respecto de la señal de referencia proveniente del Master.



# Redes Sincrónicas - Descentralizadas

Se basan en el principio de sincronización mutua

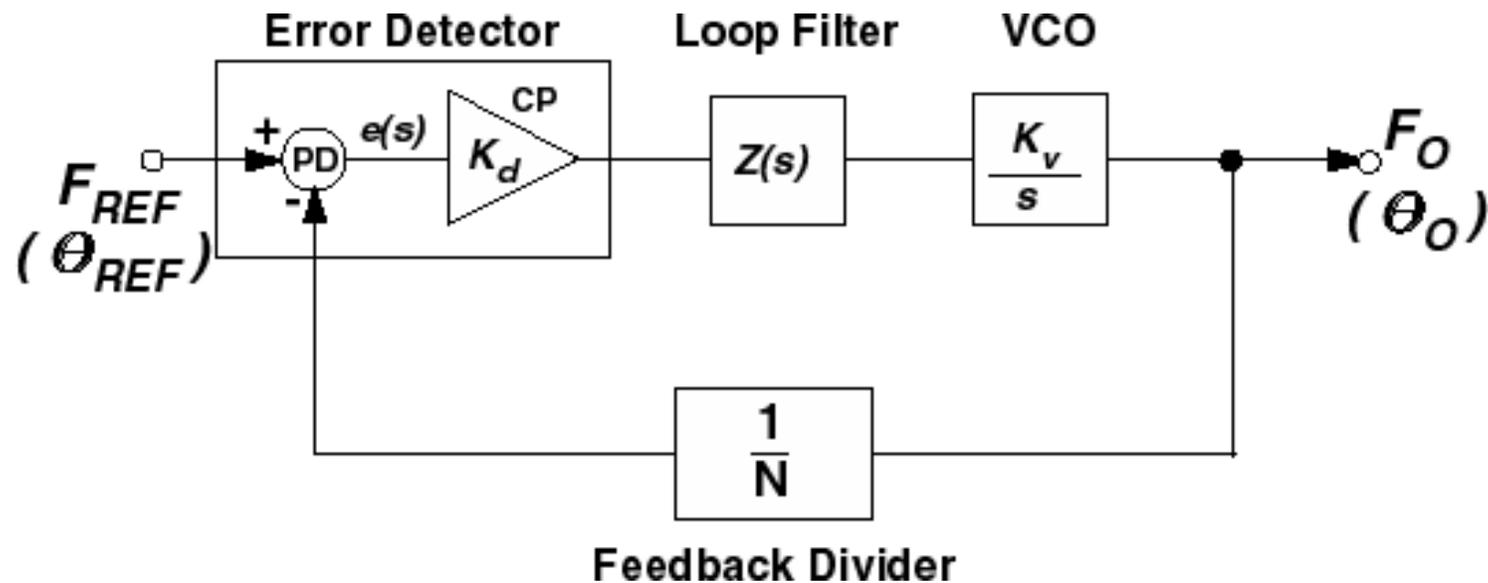
Todos los relojes de la red contribuyen a la determinación de tiempo y frecuencia.



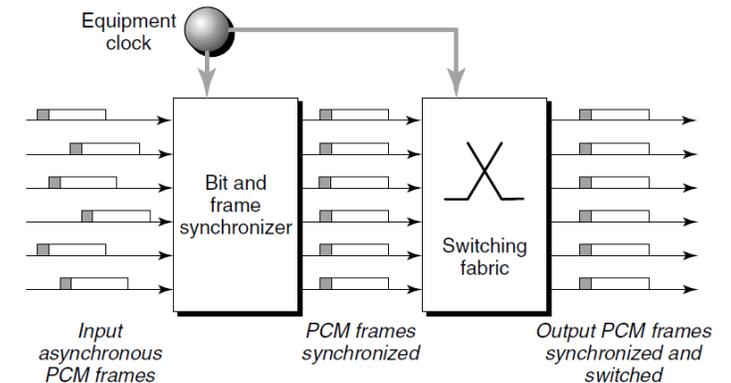
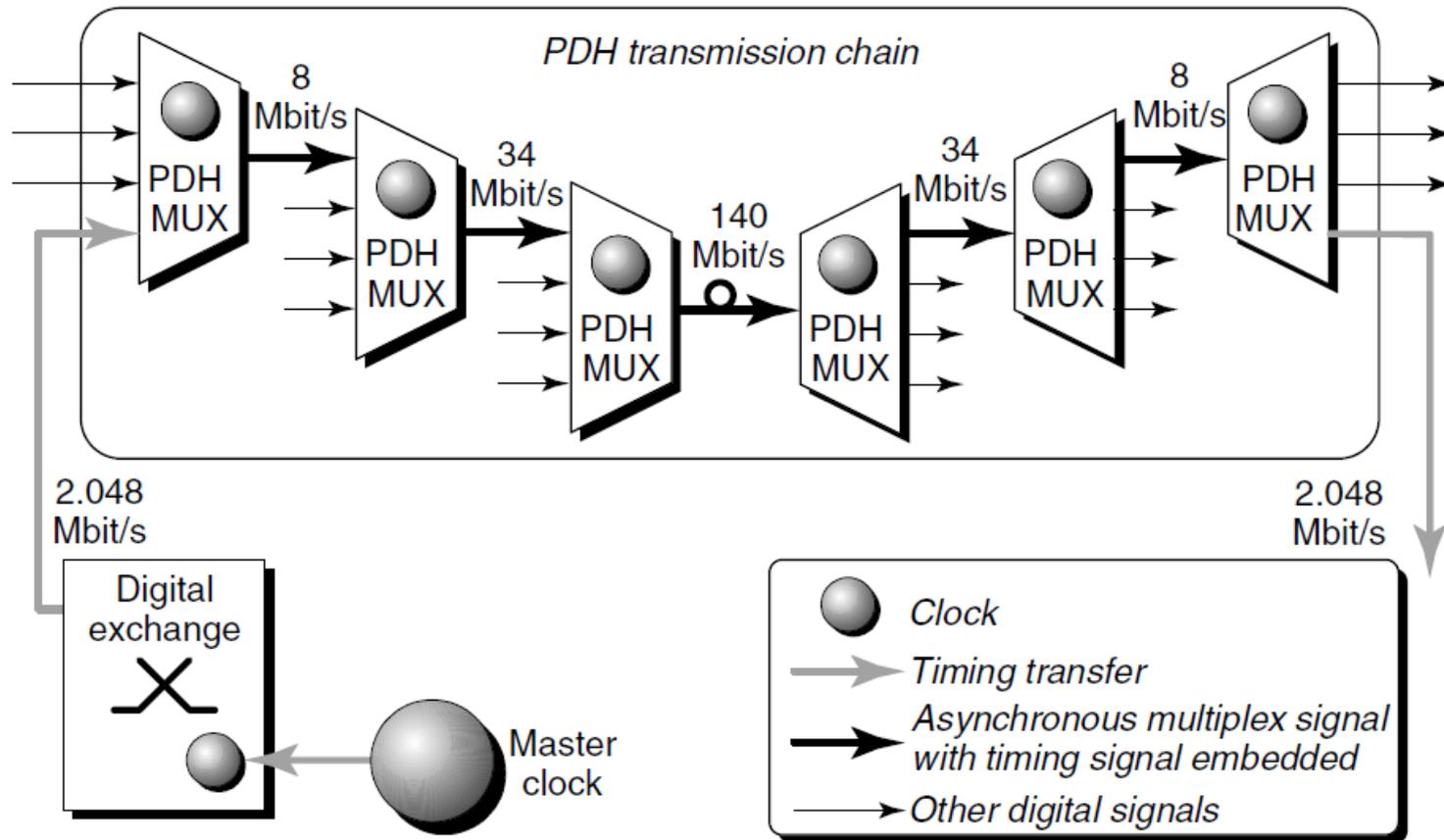
# Operación Master – Slave

Basado en Phase Locked Loop (PLL)

- Circuito de lazo cerrado.
- El Voltage Controlled Oscillator (VCO) se alimenta de la señal error  $e(s)$ , la que es amplificada y filtrada.
- El resultado es que la frecuencia de salida  $F_o$  “sigue” a la frecuencia de referencia  $F_{REF}$  (o es múltiplo de  $F_{REF}$ ).



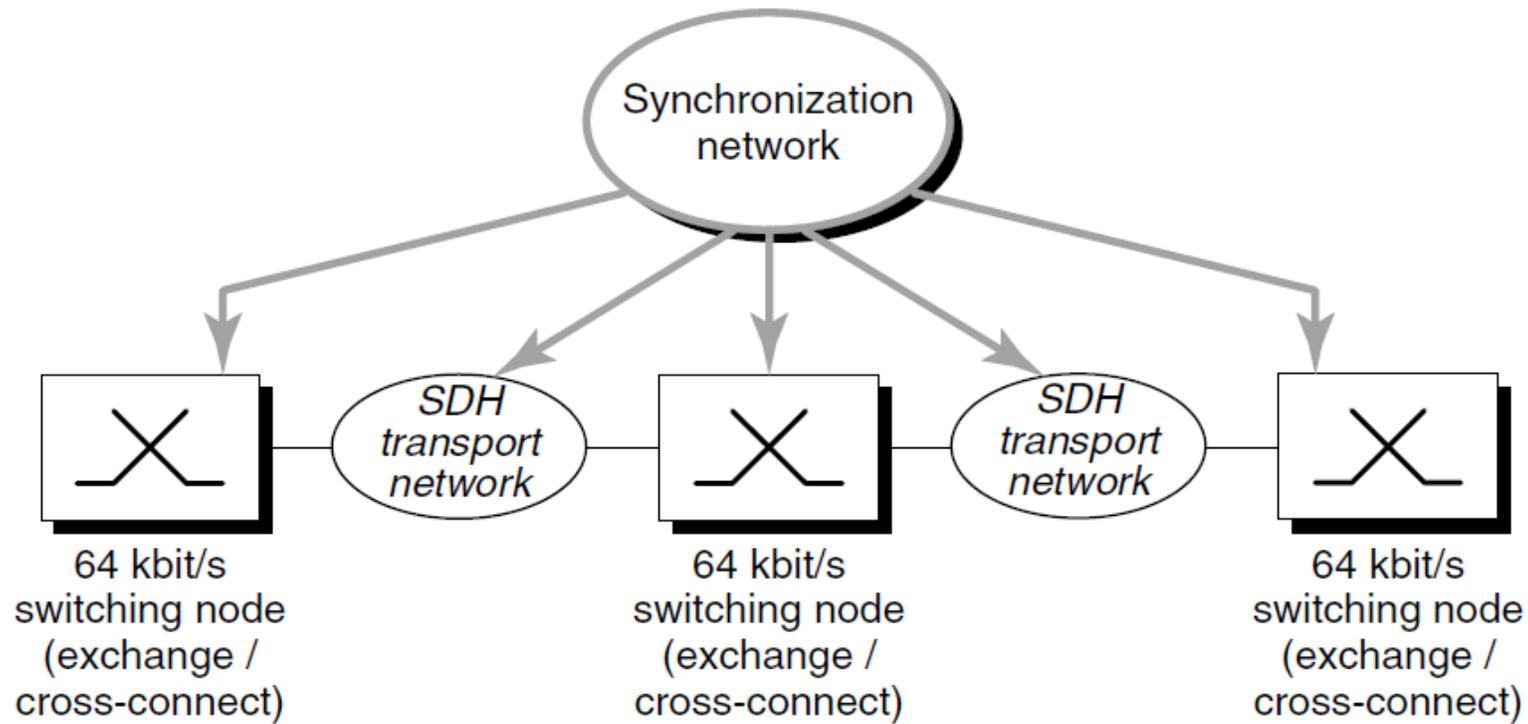
# Nodos Sincronizados con Transmisión Plesiócroma



Imágenes tomadas de "Synchronization of Digital Telecommunications Networks", Stefano Bregni

# Red Sincrónica

---



Imágenes tomadas de "Synchronization of Digital Telecommunications Networks", Stefano Bregni

# Tipos de relojes y funciones

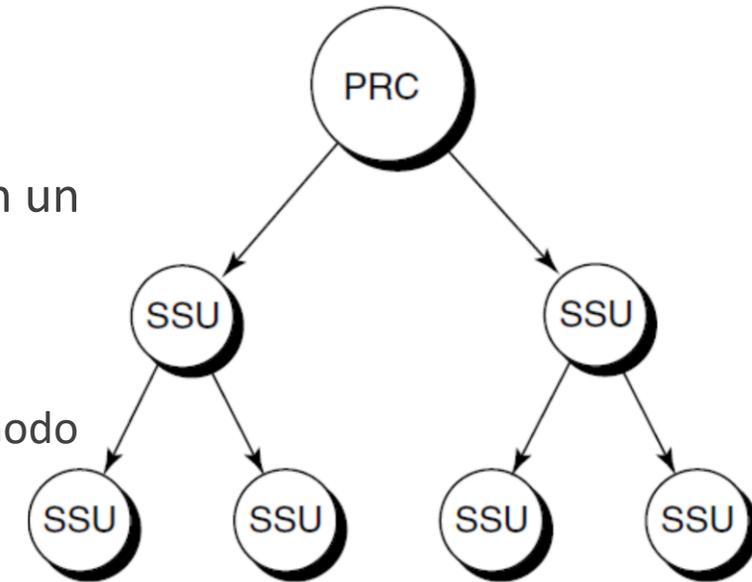
**PRC: Primary Reference Clock.** Se define como una función que representa un reloj autónomo o un reloj que acepta la sincronización de referencia de una señal “externa” muy estable y confiable (por ejemplo, relojes de Cesio). El PRC, por lo tanto, representa el reloj maestro de la red. La misma expresión PRC denota también la implementación física de la función lógica (es decir, un reloj independiente).

Requiere una estabilidad de 1 parte en  $10^{11}$  (estandarizado originalmente en G.811 en 1988 para redes PDH y actualizado en 1997 para redes SDH)

**ePRC: enhanced PRC.** Mejora la estabilidad del PRC a 1 parte en  $10^{12}$  (estandarizado en G.811.1 en 2017, para funcionar junto a un ePRTC)

**SSU: Synchronization Supply Unit.** Se define como una función que, en un nodo de red:

- acepta entradas de sincronización de fuentes externas
- filtra la señal de temporización derivada de esta fuente seleccionada
- distribuye la señal de temporización filtrada a otros elementos dentro del nodo
- puede usar una fuente de temporización interna si todas las referencias de sincronización externas fallan o se degradan



# Estándares

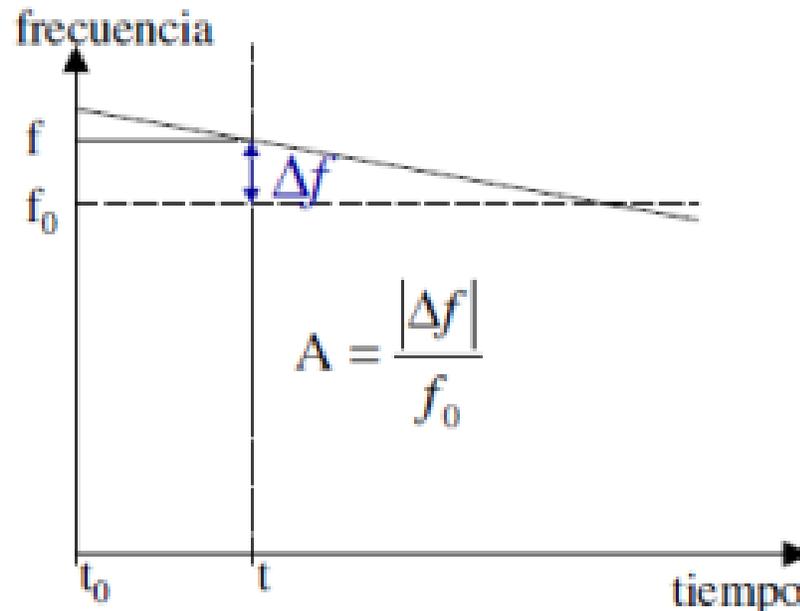
---

PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y MEDIDAS DE DESEMPEÑO

# Relojes: Parámetros de funcionamiento

---

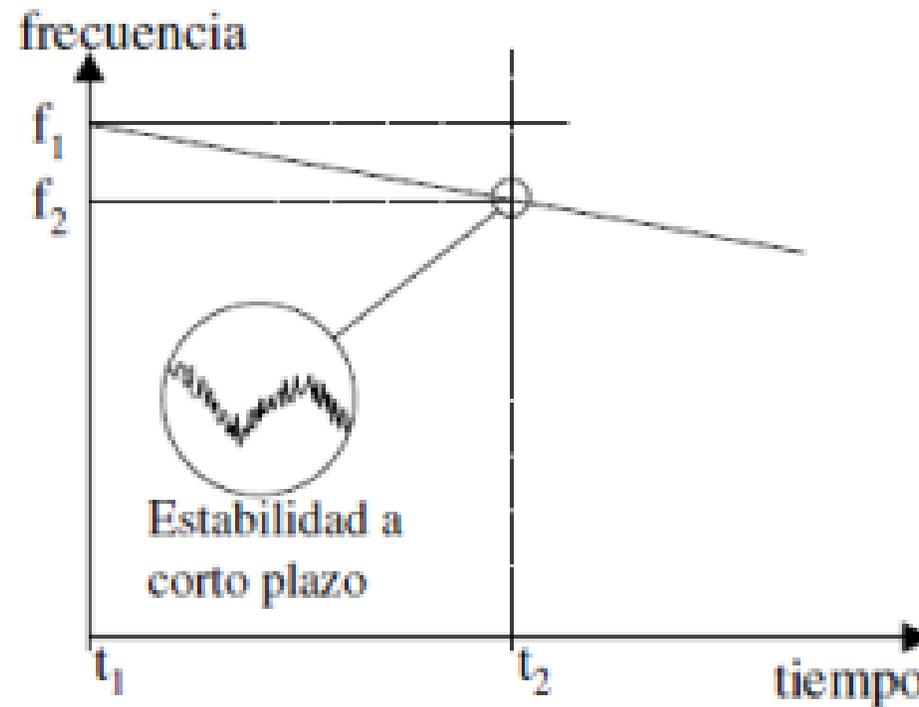
**Precisión:** Dada por la diferencia fraccional de frecuencia en un momento dado.



$$A = \frac{|f - f_0|}{f_0}$$

# Relojes: Parámetros de funcionamiento

**Estabilidad:** Expresa la variación de la frecuencia en función del tiempo.



# Relojes: Precisión vs Estabilidad

---

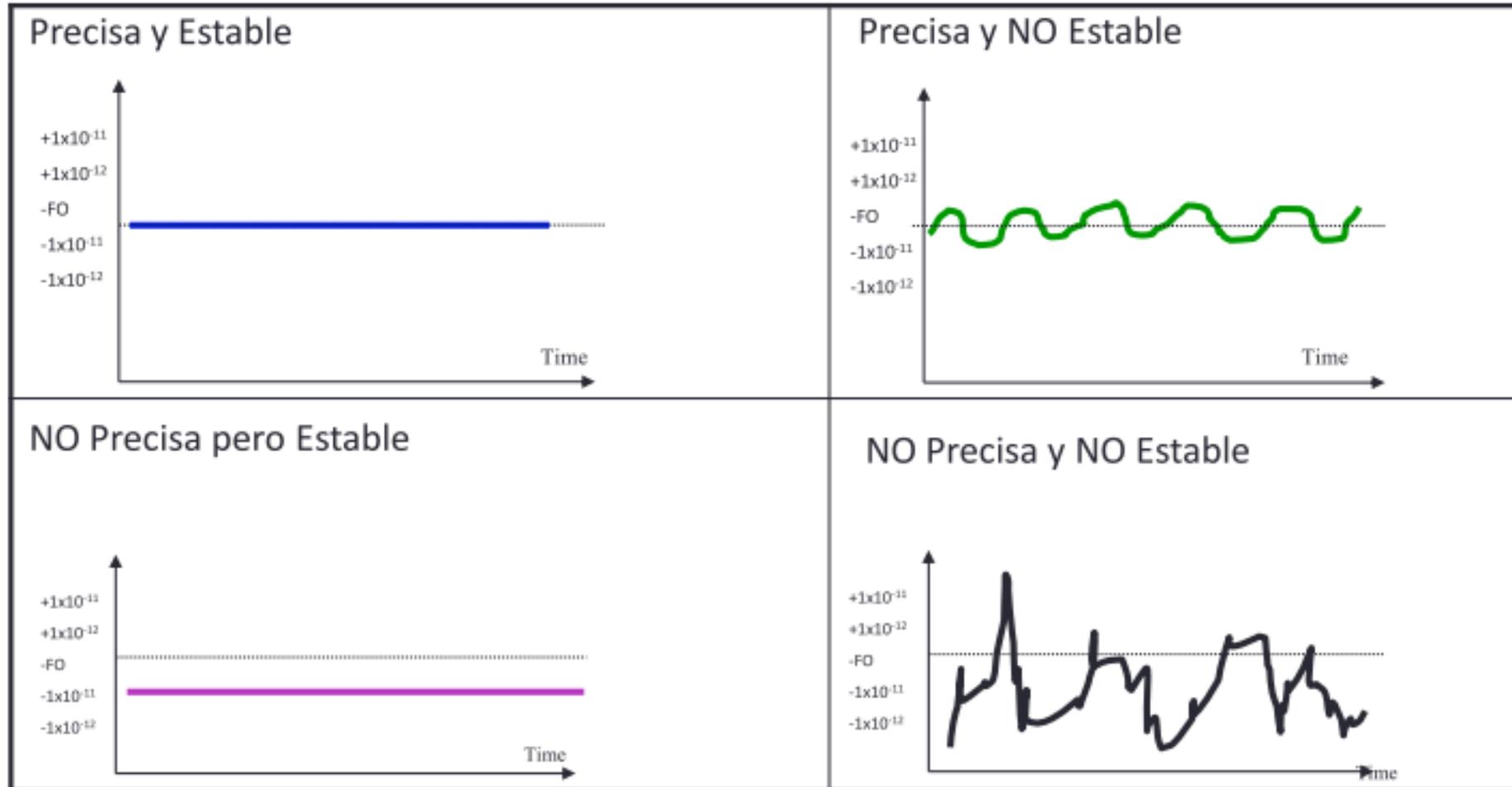
## **Precisión de Frecuencia**

- Medición de largo plazo basada en la acumulación de fase PROMEDIO sobre el tiempo, usualmente expresada en offset fraccional de frecuencia.

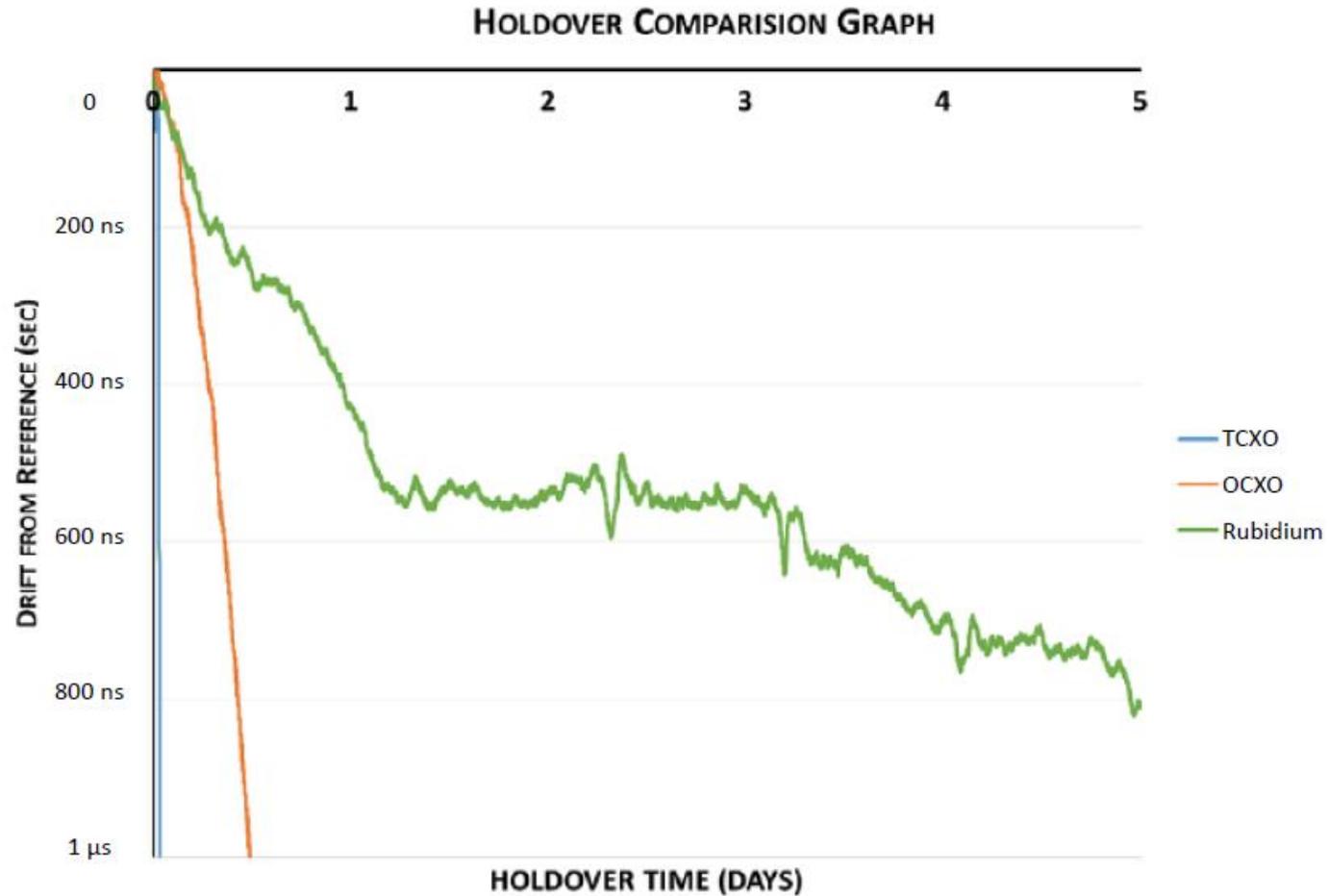
## **Estabilidad de Frecuencia**

- Medición de corto a mediano plazo basada en los cambios de fase sobre el tiempo, usualmente expresado como jitter, wander, y transientes de fase.

# Relojes: Precisión vs Estabilidad



# Relojes: Holdover



# Tipos de relojes: Estratos

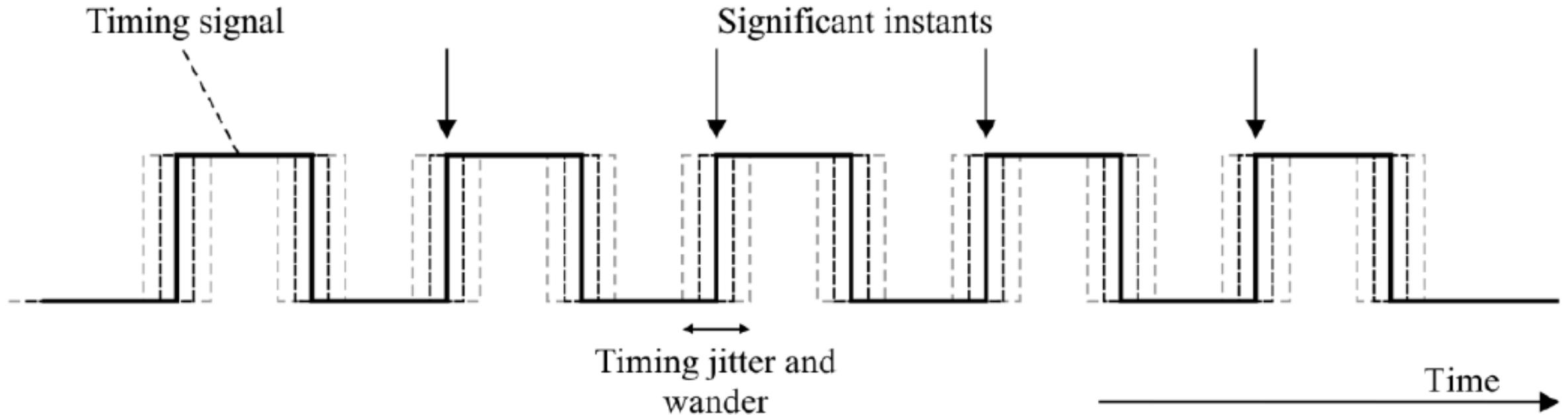
---

ESTRATO	PRECISION	HOLDOVER	RELOJ
1+	$1 \times 10^{-15}$	N/A	Masa de Hidrógeno
1	$1 \times 10^{-11}$	N/A	Patrón de Cesio o GPS (PRC)
2	$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-10}$ /día	Osciladores de Rubidio (PRC)
3	$1 \times 10^{-6}$	$3.7 \times 10^{-7}$ /día	Osciladores de Cristal Cuarzo (Esclavo)
4	$1 \times 10^{-5}$	N/A	Osciladores implementados con circuitos

PRC – Primary Reference Clock

# Jitter & Wander

---



Tomado de: ITU-T G.8260

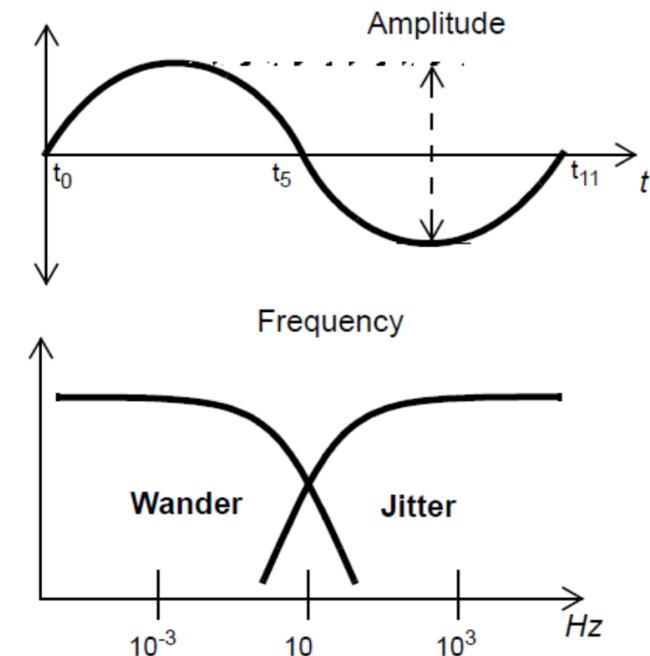
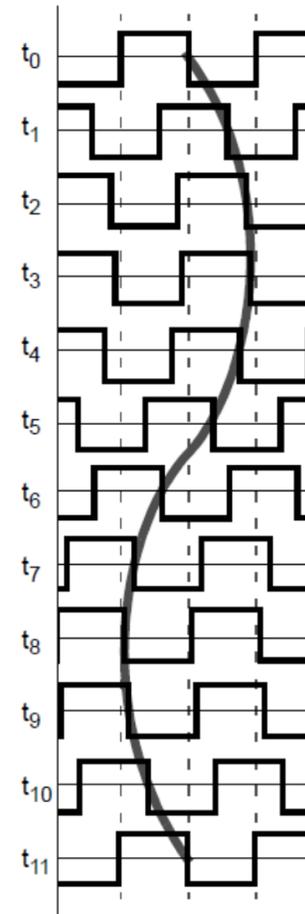
# Jitter & Wander

## Jitter: Fluctuación de fase

Variaciones a corto plazo de los instantes significativos de una señal digital con respecto a sus posiciones ideales en el tiempo (a corto plazo significa que la frecuencia de estas variaciones es **mayor** o igual a **10 Hz**). (según ITU-T G.810)

## Wander: Fluctuación lenta de fase

Variaciones a largo plazo de los instantes significativos de una señal digital con respecto a sus posiciones ideales en el tiempo (a largo plazo significa que la frecuencia de estas variaciones es **menor** que **10 Hz**). (según ITU-T G.810)



Imágenes tomadas de "Jitter & Wander measurements", Albedo Telecom

# Métricas de Desempeño

---

TE = Time Error

TIE = Time Interval Error

MTIE = Maximum Time Interval Error

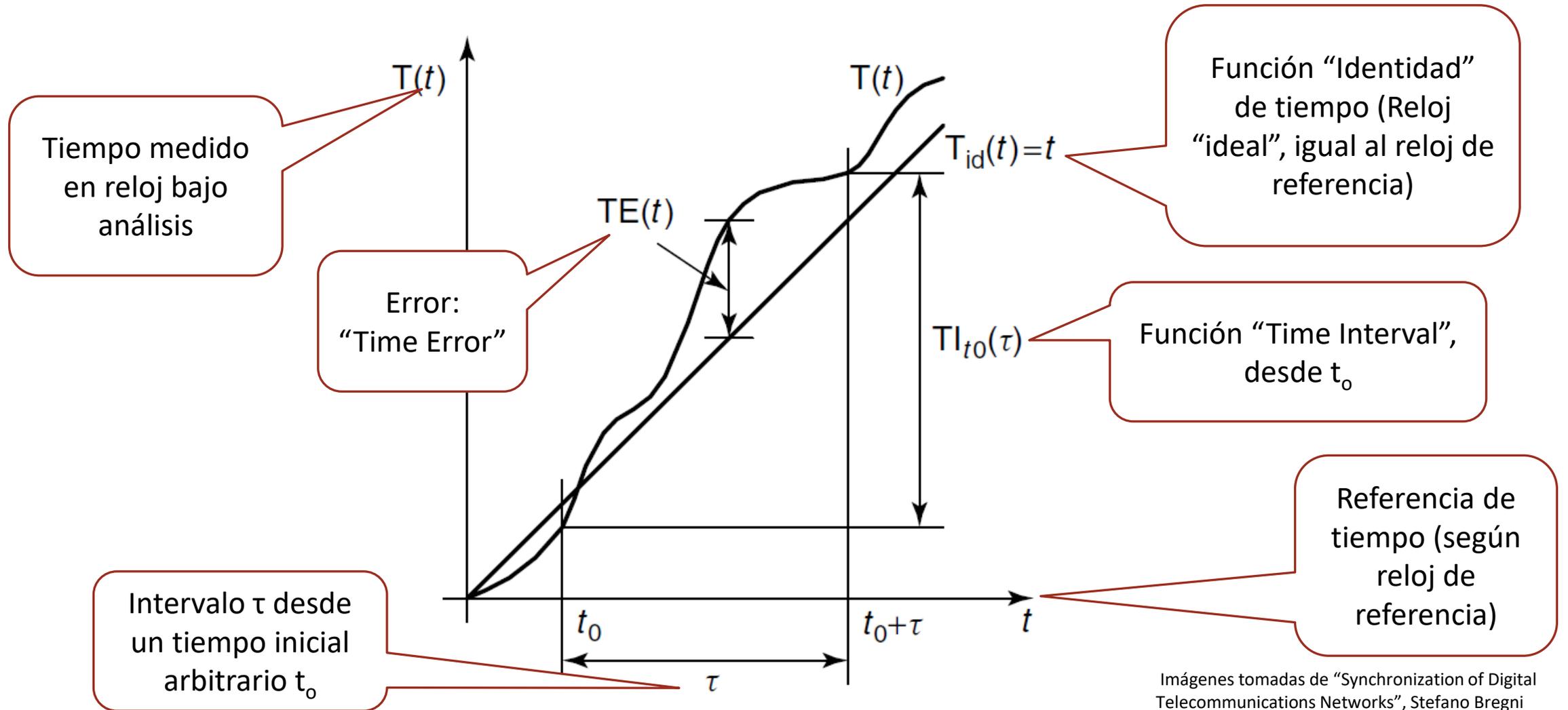
$MTIE/\tau$  = Maximum frequency error estimate from MTIE

TDEV = Time Deviation

MDEV = Modified Allan Deviation

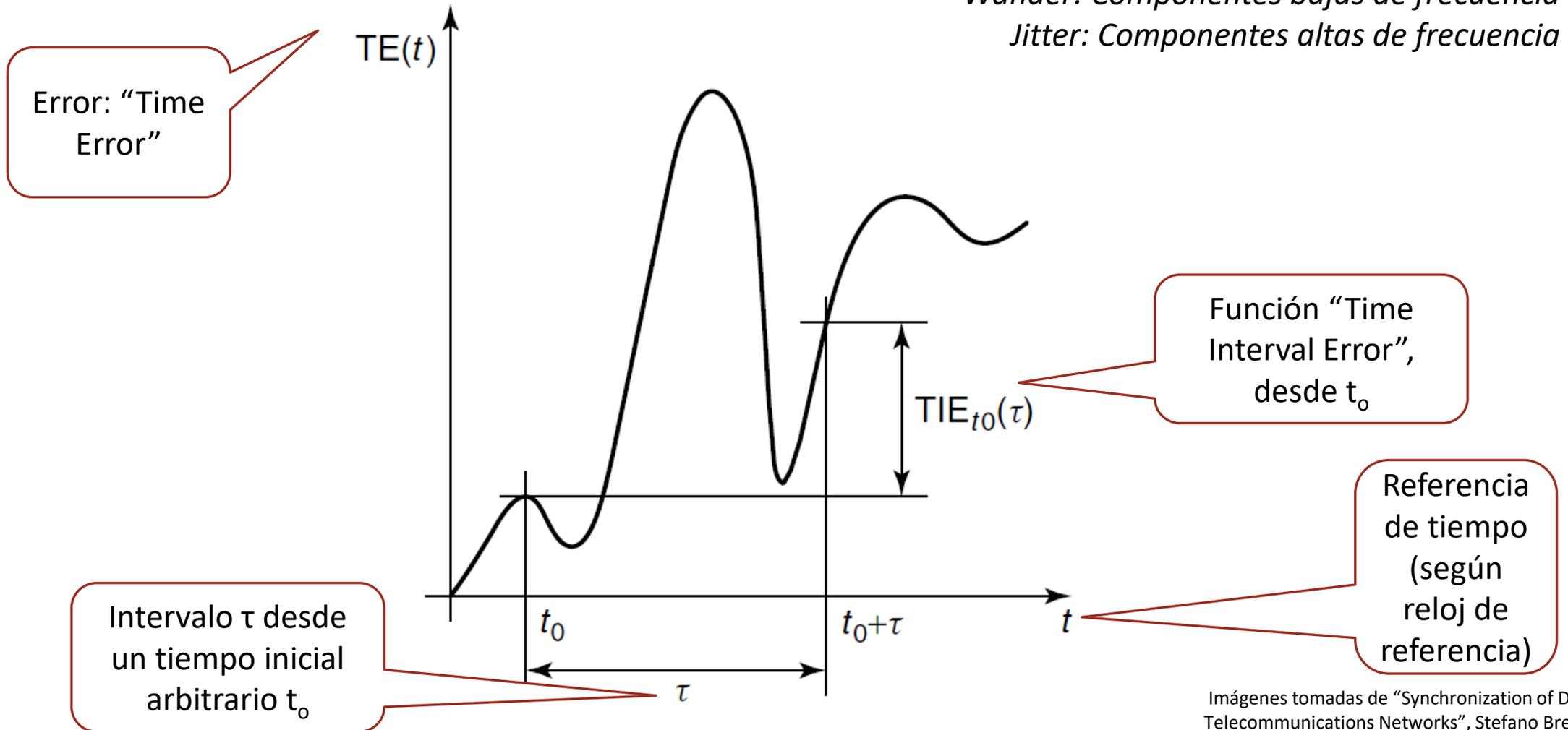


# Time Error



# Time Interval Error

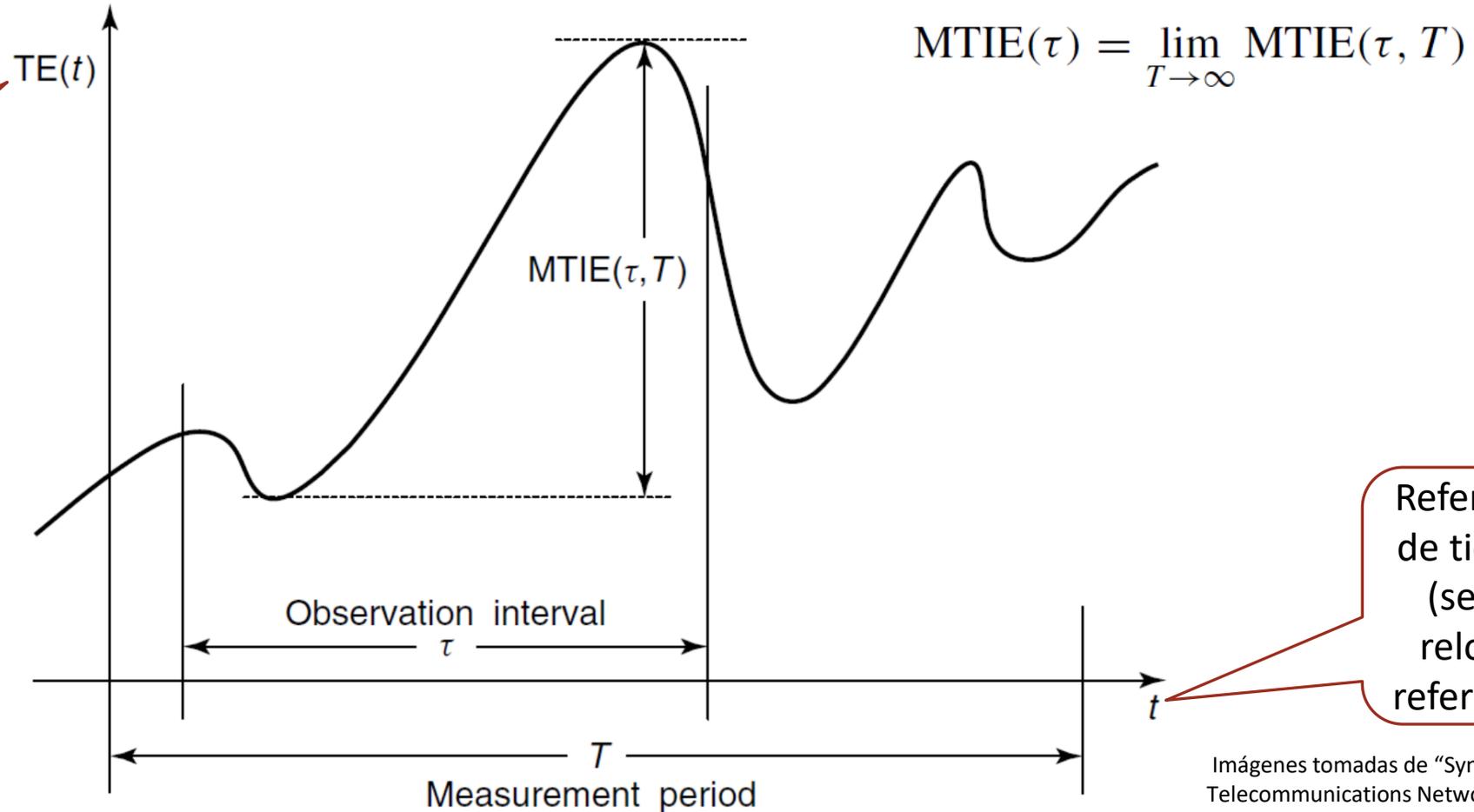
*Wander: Componentes bajas de frecuencia < 10Hz*  
*Jitter: Componentes altas de frecuencia > 10Hz*



Imágenes tomadas de "Synchronization of Digital Telecommunications Networks", Stefano Bregni

# Maximum Time Interval Error

$$\text{MTIE}(\tau, T) = \max_{0 \leq t_0 \leq T - \tau} \left\{ \max_{t_0 \leq t \leq t_0 + \tau} [\text{TE}(t)] - \min_{t_0 \leq t \leq t_0 + \tau} [\text{TE}(t)] \right\}$$



Imágenes tomadas de "Synchronization of Digital Telecommunications Networks", Stefano Bregni

# Mediciones: MTIE

---

Se utiliza la gráfica del TIE como referencia

Describe la inestabilidad de la fase a largo plazo

Estimador pesimista de la inestabilidad

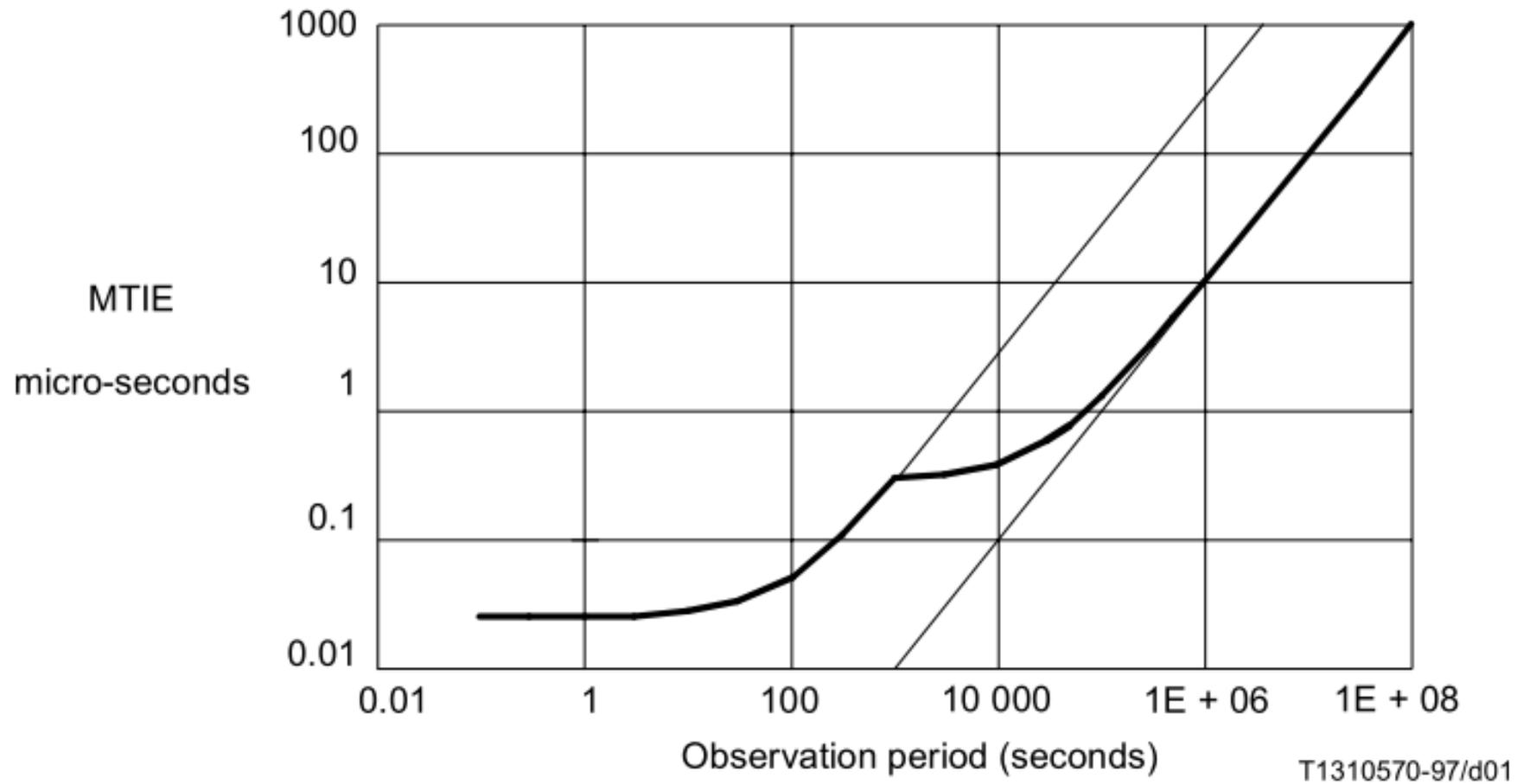
Detecta corrimientos de reloj

Se utiliza tradicionalmente para medir la estabilidad de los relojes

Es la desviación máxima en tiempo (valor pico a pico) de una señal con respecto a una referencia dentro de un intervalo de tiempo  $s$

# Mediciones: MTIE para un PRC

ITU-T G.811: Timing characteristics of primary reference clocks



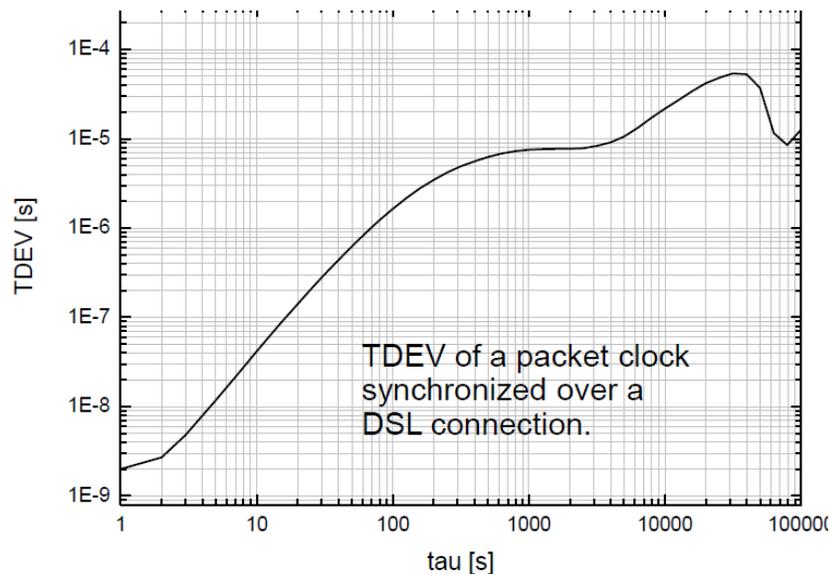
# Time Deviation (TDEV)

La desviación de tiempo (TDEV) es una medida que caracteriza el contenido espectral de la señal TIE(t)

Proporciona una medida de la energía de los componentes de frecuencia del wander

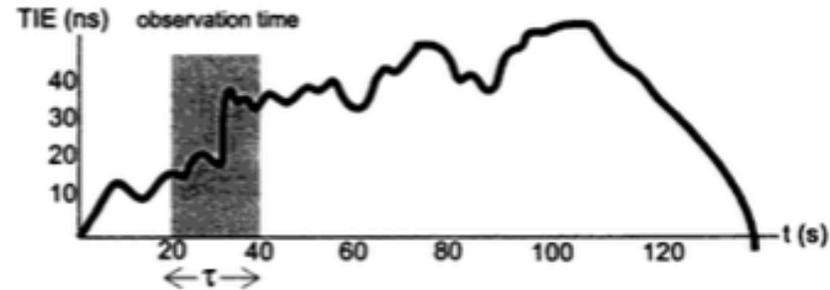
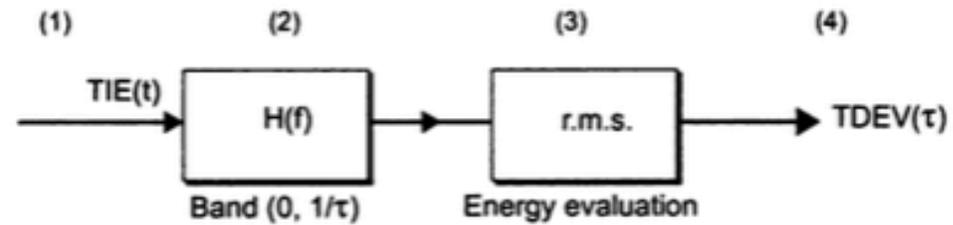
Se calcula como el valor RMS del TIE filtrado por un filtro “pasabandas”, centrado en el valor  $0.42/t$

Suprime extremos



$$\text{TDEV}(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[ \sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2}$$

# Mediciones: TDEV

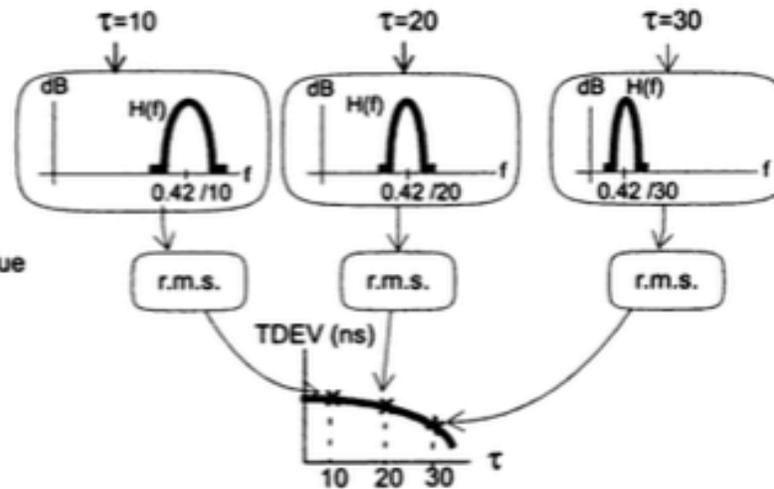


(1) for each window  $\tau$  swept by all the TIE samples

(2) low pass filter

(3) measurement of r.m.s value

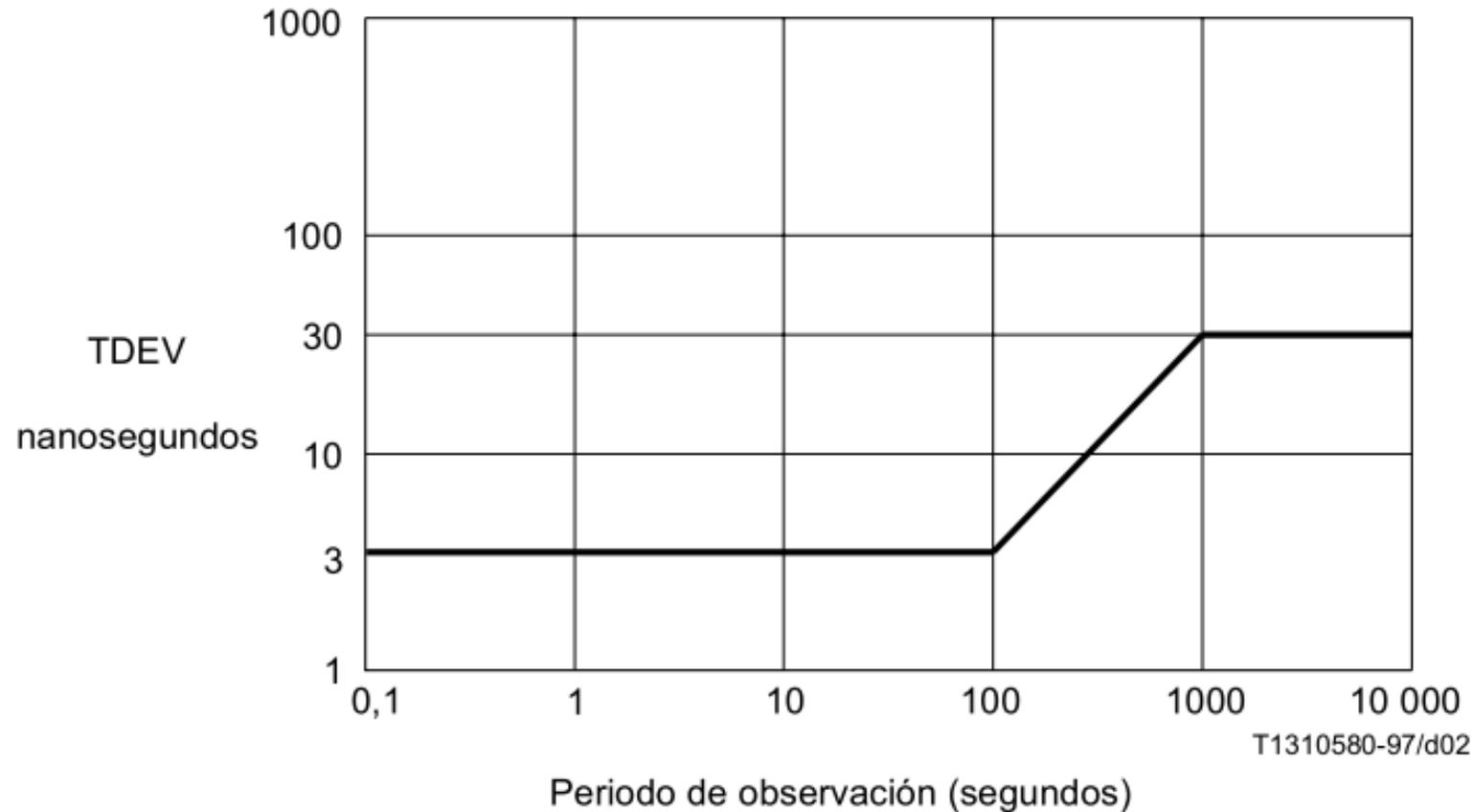
(4) TDEV



# Mediciones: TDEV para un PRC

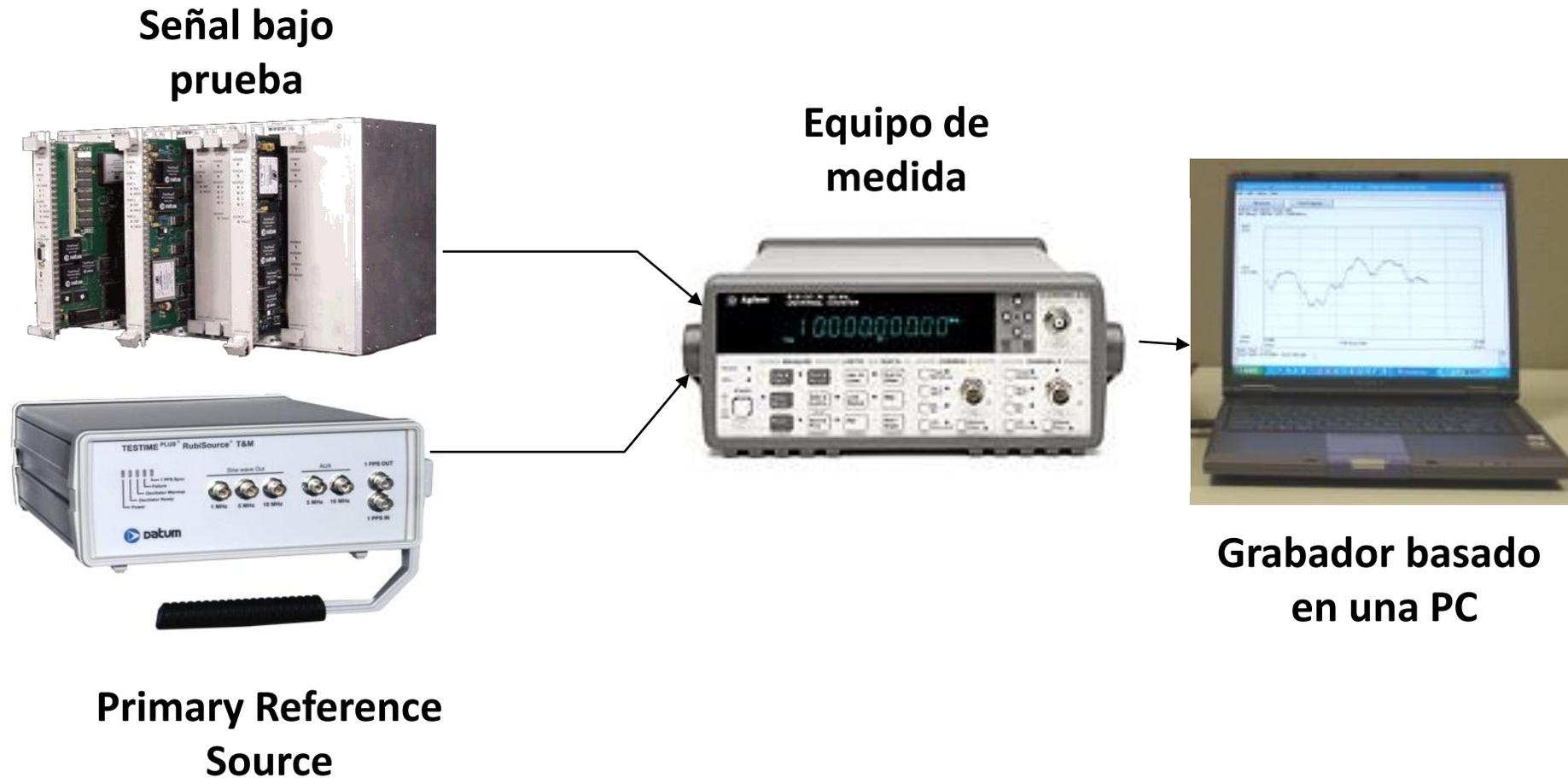
ITU-T G.811: Timing characteristics of primary reference clocks

---

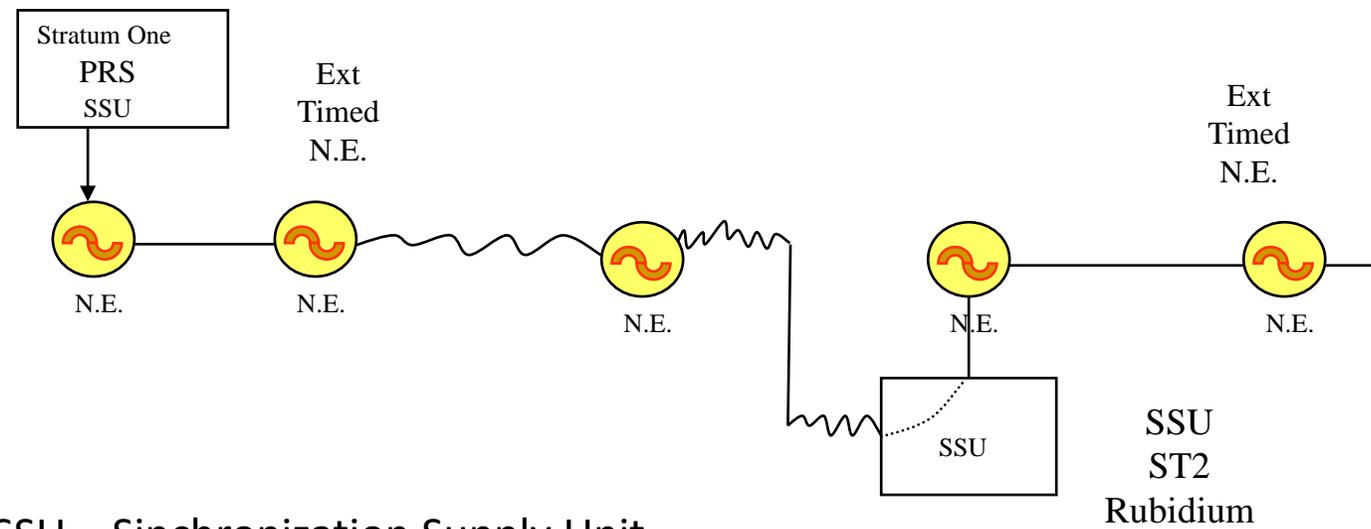
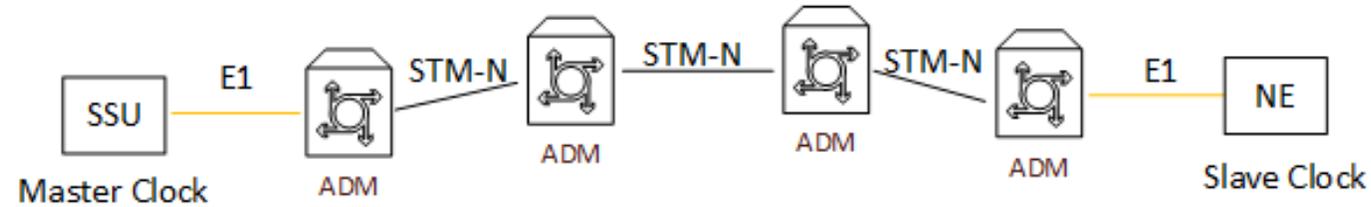


# Ejemplo de set de mediciones

---



# Despliegue Red Sincronismo: Regeneración de Reloj

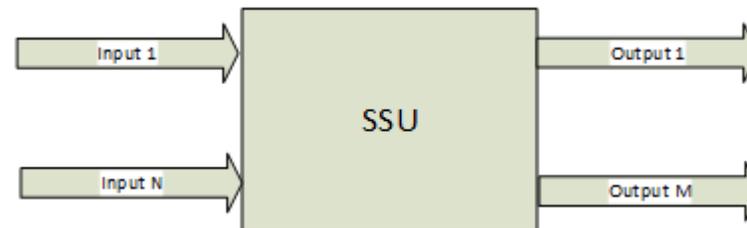


SSU – Synchronization Supply Unit  
NE – Network Element  
ADM – Add Drop Multiplexer

# SSU – Synchronization Supply Unit



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rb	COMMS – CONTROL	GPS	INPUT - E1	GPS	BP	INPUT - E1			E1 OUTPUT	E1 OUTPUT	Qz



- Los input puede ser: E1s de la red SDH, GPS, señales de un PRC, 2MHz, 5MHz, 10MHz.
- Los outputs de un SSU en general son E1s o señales de 2MHz

# Protocolos de Sincronismo

---

EN REDES DE PAQUETES

# Redes de sincronismo NG (*New Generation*)

---

Desafíos:

Las redes Ethernet / IP desplazan a las tecnologías de transporte tradicionales TDM (como SDH)

Los nuevos sistemas de telecomunicaciones tienen nuevos requerimientos de sincronismo:  
Frecuencia, **fase** y **tiempo**

Nuevas tecnologías utilizadas:

**SyncE** (Synchronous Ethernet)

*Transmisión de información de reloj para recuperar frecuencia.*

**PTP** (Precision Time Protocol)

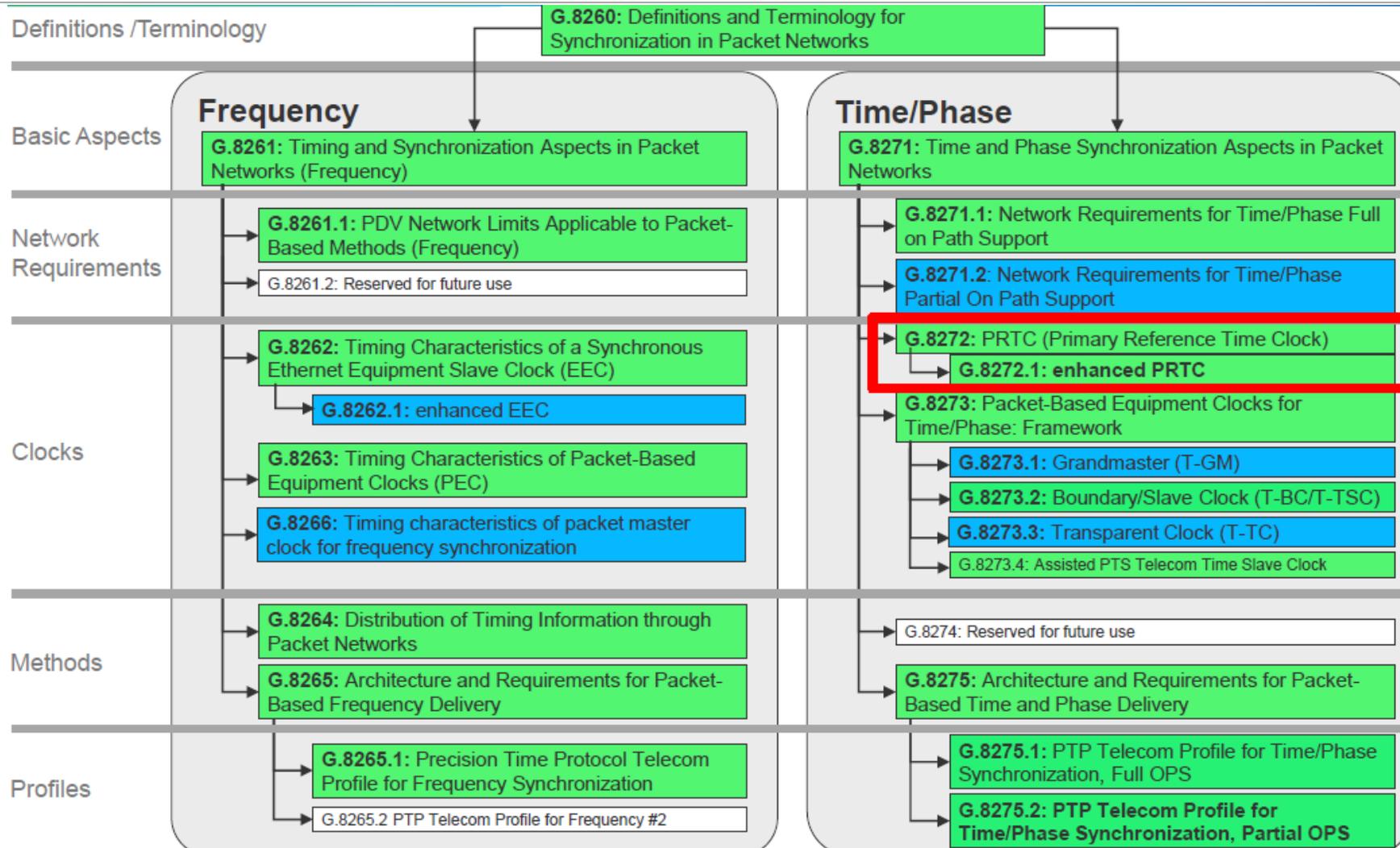
*Transmisión de estampas de tiempo, recuperación de frecuencia, tiempo y fase.*

# Sincronismo de **frecuencia** en redes de Paquetes

---

- Serie de recomendaciones ITU-T G.826x
  - G.8260: Definitions and terminology for synchronization in packet networks (Primera version 2010)
  - G.8261: Timing and synchronization aspects in packet networks
    - G.8261.1: Packet delay variation network limits applicable to packet-based methods (Frequency synchronization)
  - G.8262: Timing characteristics of a synchronous equipment slave clock
    - G.8262.1: Timing characteristics of an enhanced synchronous equipment slave clock
  - G.8263: Timing characteristics of packet-based equipment clocks
  - G.8264: Distribution of timing information through packet networks
  - G.8265: Architecture and requirements for packet-based frequency delivery
    - G.8265.1: Precision time protocol telecom profile for frequency synchronization
  - G.8266: Timing characteristics of telecom grandmaster clocks for frequency synchronization

# Sincronismo en redes de Paquetes



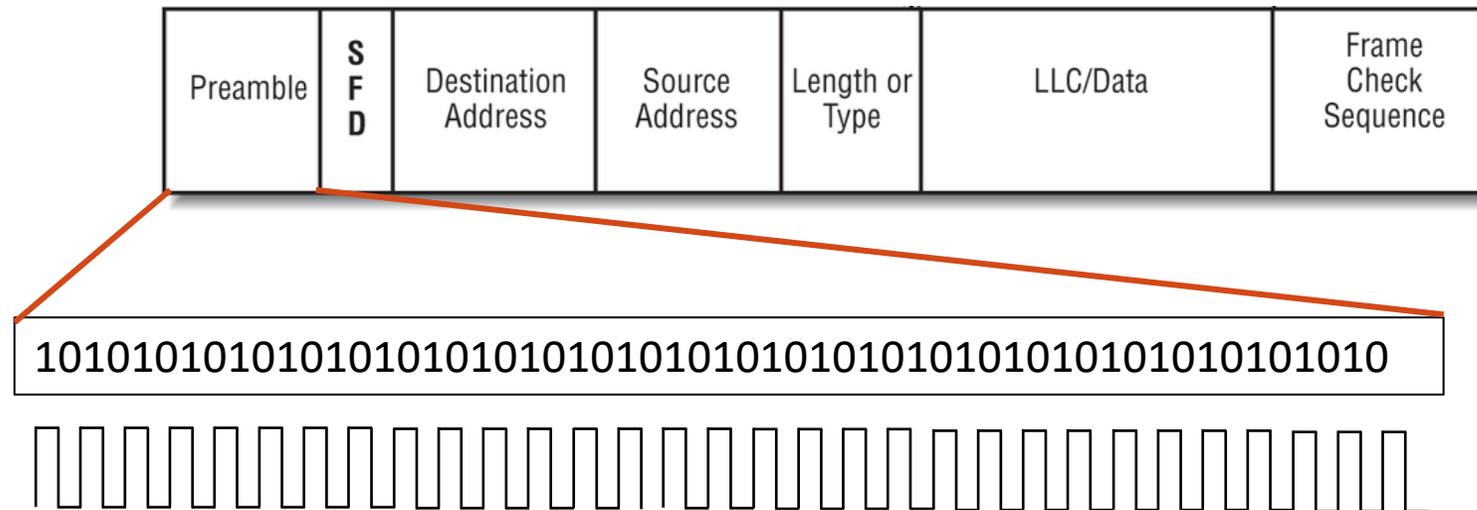
# Sincronismo de frecuencia en Ethernet

Tradicionalmente Ethernet transmite tramas en forma asíncrona.

Cada nodo ethernet (switches, etc.) tiene su propio reloj.

Con cada trama, Ethernet transmite información de reloj (Preámbulo), de manera que el nodo destino pueda recuperar la trama

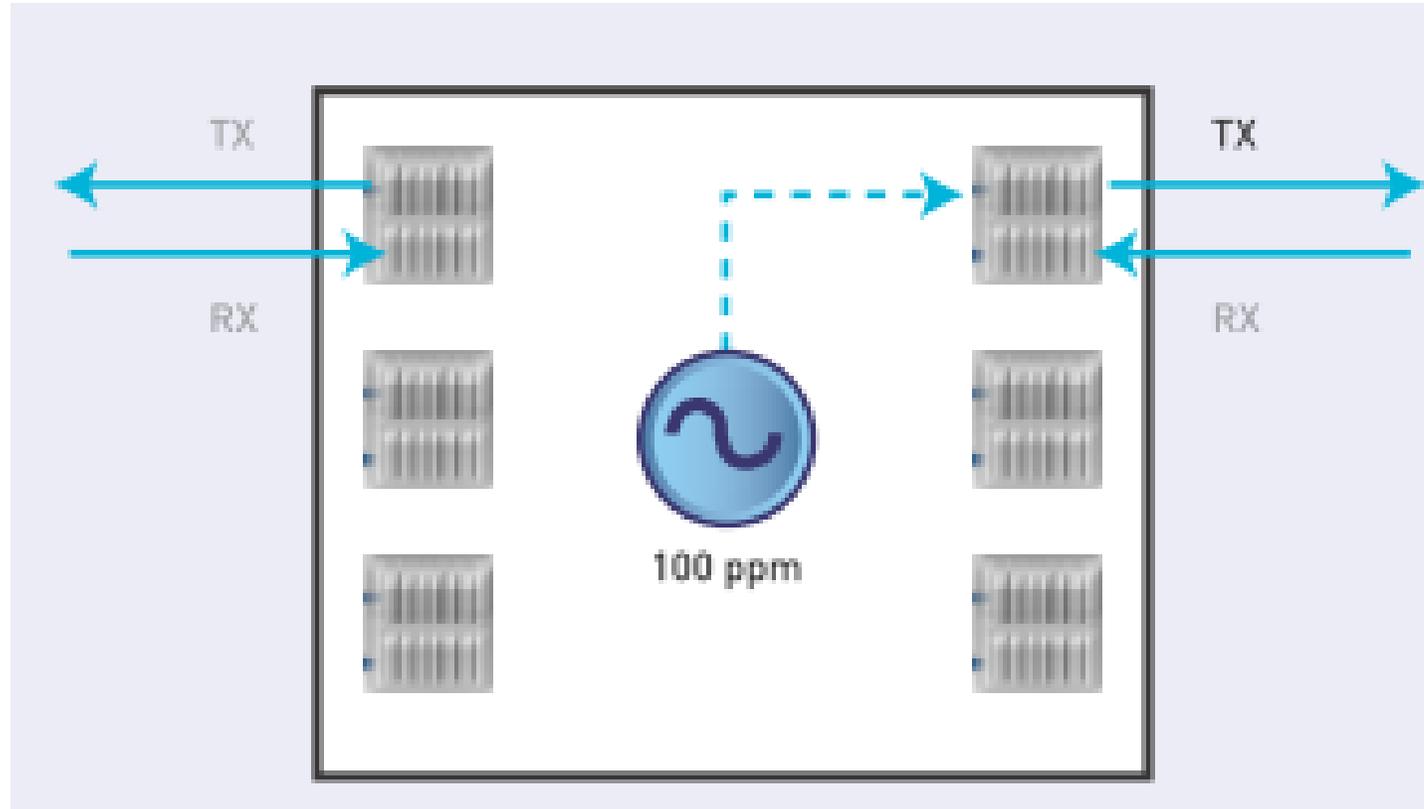
Pero... con este preámbulo no se logra la precisión necesaria.



# Sincronismo en Ethernet

---

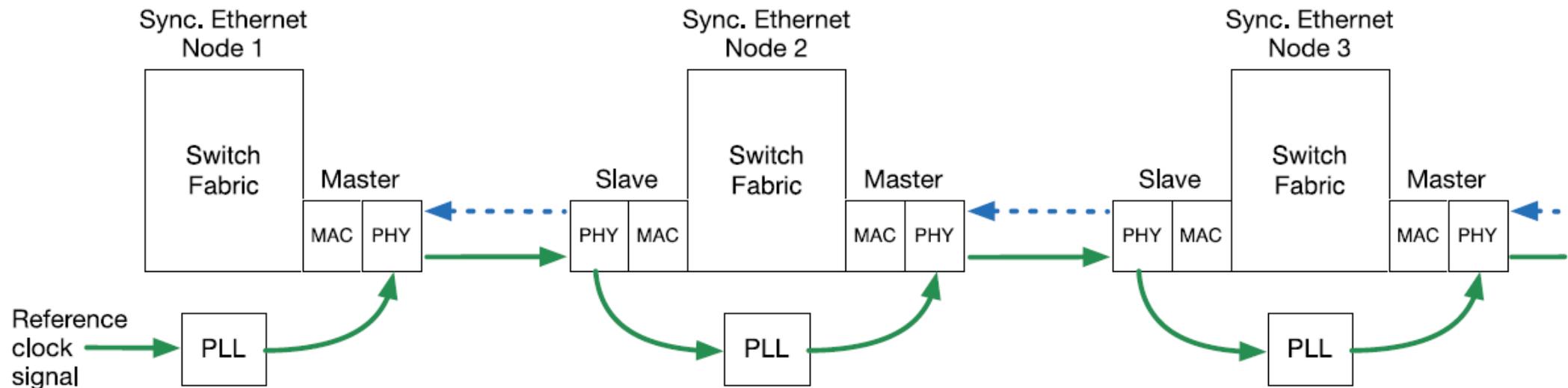
Ethernet Tradicional



# SyncE: ITU-T G.8264

## Distribution of timing information through packet networks

ITU-T G.8264 define un mecanismo de transmisión de información de reloj precisa de forma de transmitir información de frecuencia (como en SDH)

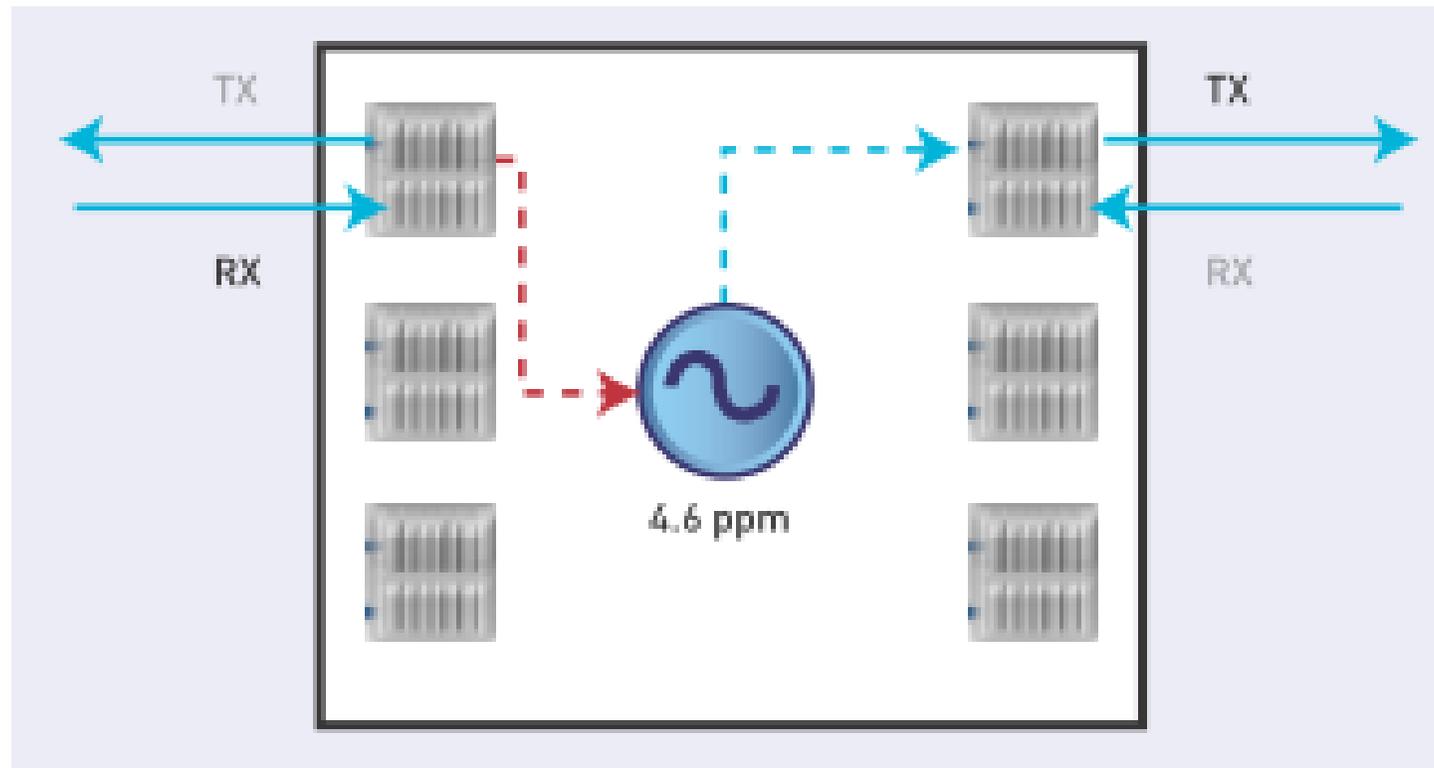


Imágenes tomadas de "A Survey of Clock Synchronization Over Packet-Switched Networks", Martin Lévesque and David Tipper, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 18, NO. 4, FOURTH QUARTER 2016

# SyncE: ITU-T G.8264

Distribution of timing information through packet networks

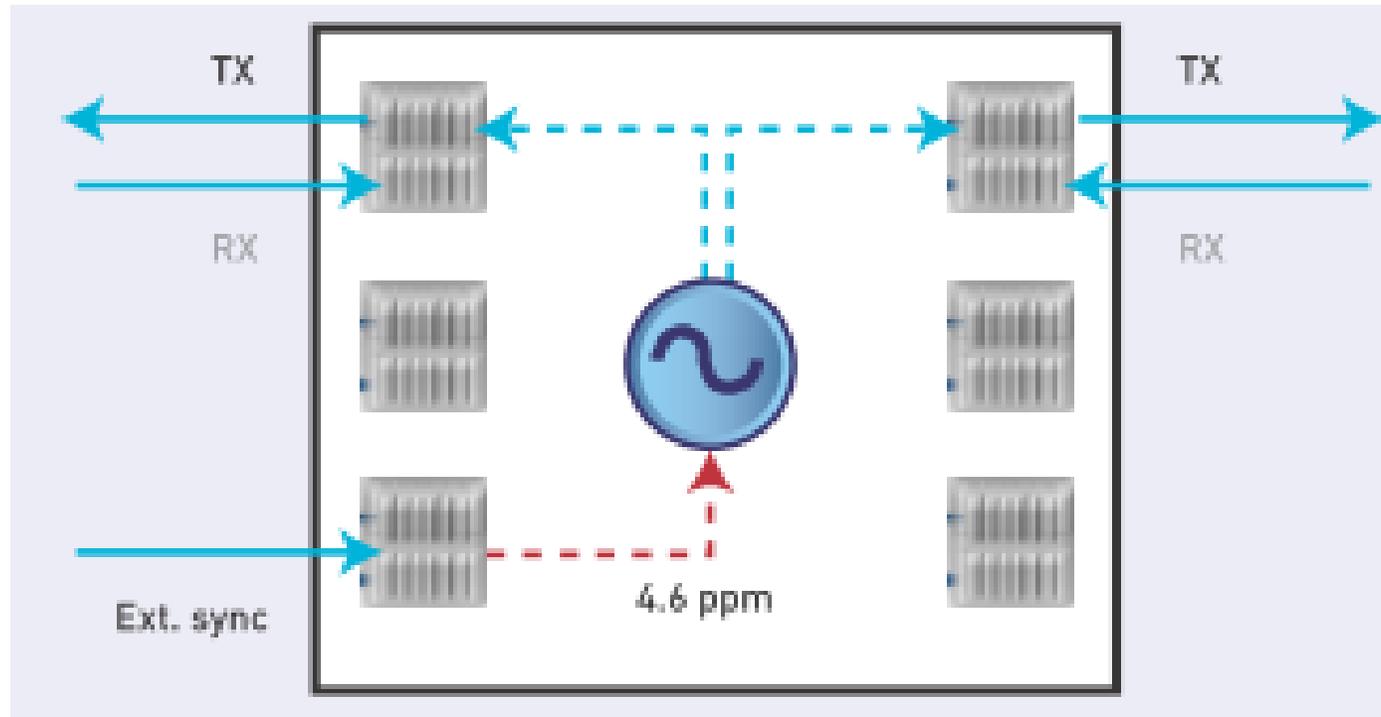
SyncE, tomando como referencia un puerto de Tx/Rx



Imágenes tomadas de "Synchronizing IP Mobile Networks", Symmetricom

# SyncE

SyncE, tomando como referencia una entrada de Sync independiente (por ejemplo, de un PRC o ePRC)



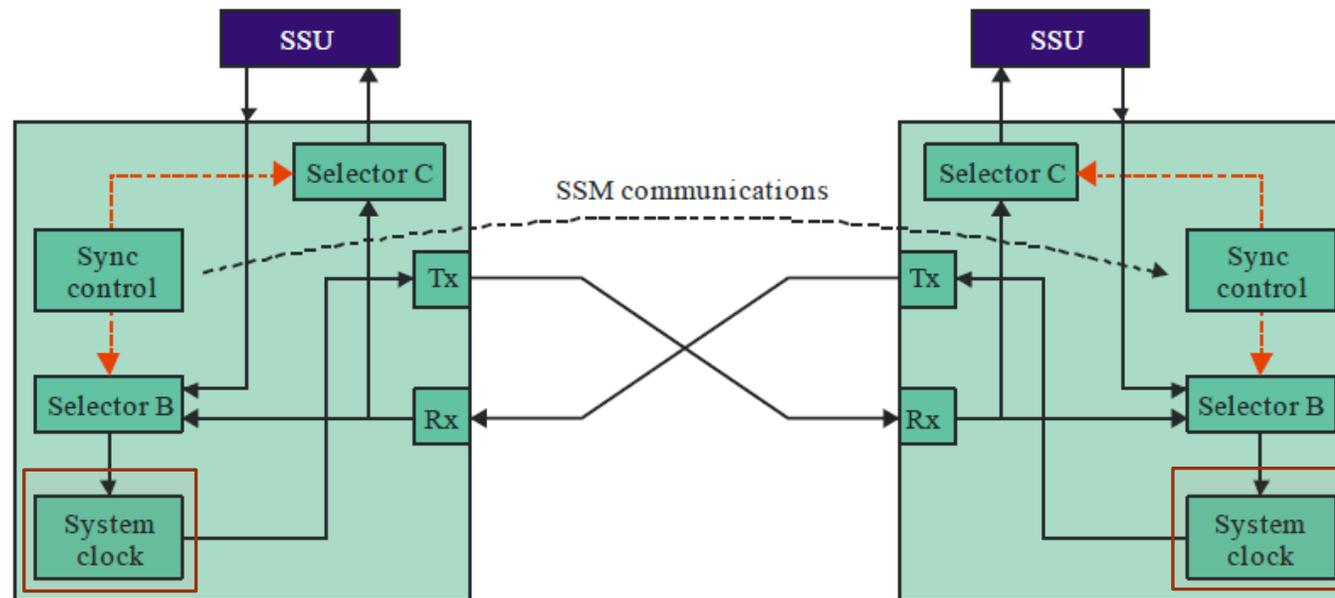
Imágenes tomadas de "Synchronizing IP Mobile Networks", Symmetricom

# SyncE

Una vez por segundo se transmite una trama Ethernet “especial”, conteniendo un Synchronization Status Message (SSM), quien porta la calidad de reloj transmitida.

Con la información de reloj, extraída directamente de la capa 1, el nodo esclavo puede recuperar frecuencia y disciplinar su oscilador.

SSM: legacy de SDH



Imágenes tomadas de “ITU-T G.8264/Y.1364”

# Sync E – Formato de Trama ESMC (Ethernet Synchronization Messaging Channel)

Este tipo de tramas no son transmitidas a otros "links" dentro del switch

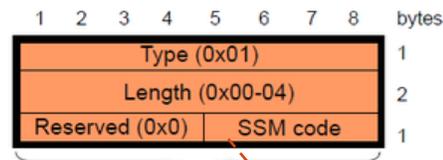
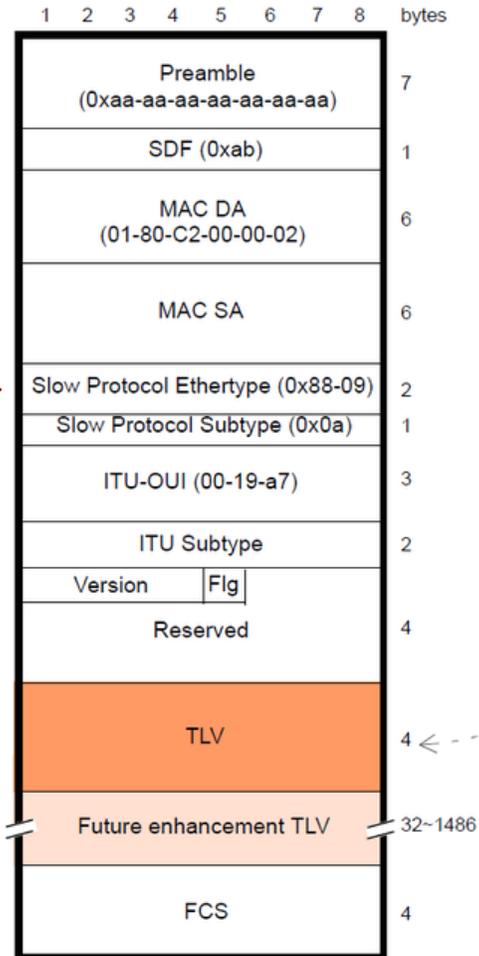


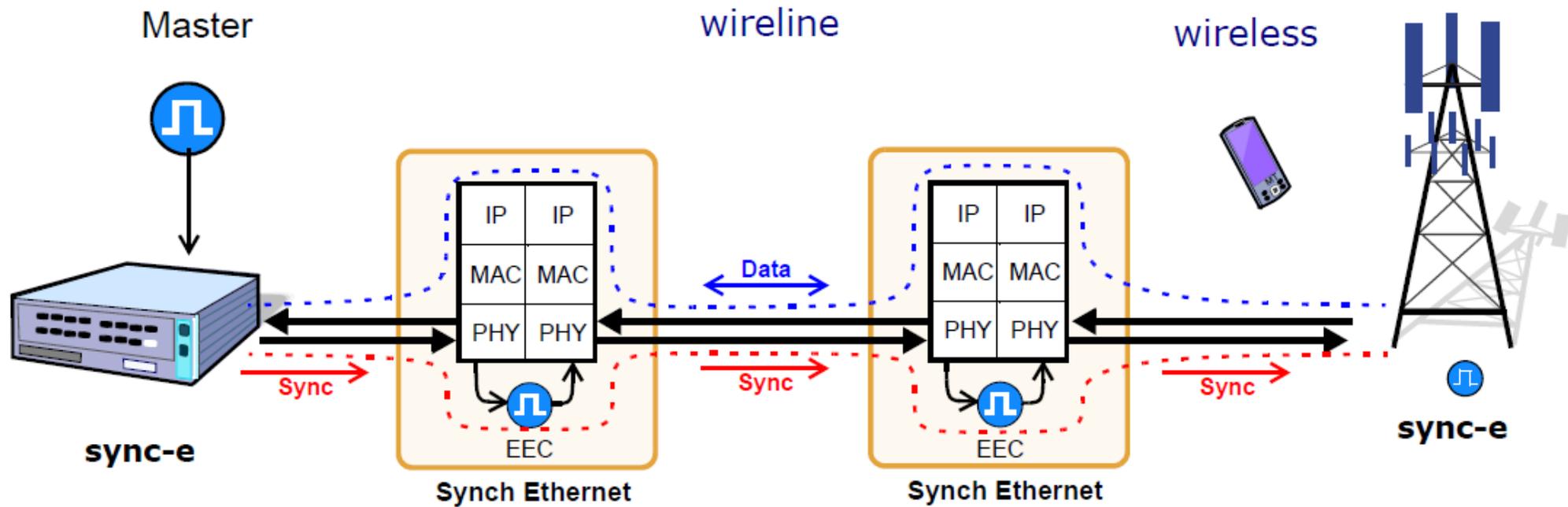
Table 11-1 – SSM messages for synchronous Ethernet

Clock	Message	SSM code
EEC1	QL-EEC1	0xB
EEC2	QL-EEC2	0xA

EEC = Ethernet Equipment Clock  
 QL = Quality Level  
 OUI = Organizationally Unique Identifier  
 TLV = Type Length Value

# Sync E

## Ejemplo en red móvil



Tomado de Jose Manuel Caballero - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23720820>

# Sincronismo de fase y tiempo en redes de Paquetes

---

- Serie de recomendaciones ITU-T G.827x
  - G.8260: Definitions and terminology for synchronization in packet networks (Primera version 2010)
  - G.8271: Time and phase synchronization aspects of telecommunication networks
    - G.8271.1: Network limits for time synchronization in packet networks with full timing support from the network
    - G.8271.2: Network limits for time synchronization in packet networks with partial timing support from the network
  - G.8272: Timing characteristics of primary reference time clocks
    - G.8272.1: Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks
  - G.8273: Framework of phase and time clocks
    - G.8273.2: Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks for use with full timing support from the network
    - G.8273.3: Timing characteristics of telecom transparent clocks for use with full timing support from the network
    - G.8273.4: Timing characteristics of telecom boundary clocks and telecom time slave clocks for use with partial timing support from the network
  - G.8275: Architecture and requirements for packet-based time and phase distribution
    - G.8275.1: Precision time protocol telecom profile for phase/time synchronization with full timing support from the network
    - G.8275.2: Precision time protocol telecom profile for time/phase synchronization with partial timing support from the network

# Niveles de exactitud de tiempo requeridos en redes de telecomunicaciones

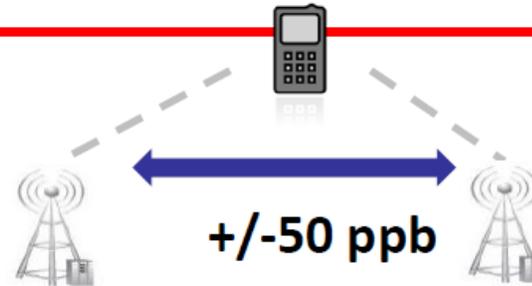
Level of accuracy	Time error requirements	Typical applications (for information)
1	500 ms	Billing, alarms
2	100 $\mu$ s	IP Delay monitoring
3	5 $\mu$ s	LTE TDD (large cell). Synchronous Dual Connectivity (for up to 7 km propagation difference between eNBs/gNBs in FR1)
4	1.5 $\mu$ s	UTRA-TDD, LTE-TDD (small cell), NR TDD, WiMAX-TDD (some configurations) Synchronous Dual Connectivity (for up to 9 km propagation difference between eNBs/gNBs in FR1). NR Intra-band non-contiguous and Inter-band carrier aggregation, with or without MIMO or transmit (TX) diversity.
5	1 $\mu$ s	WiMAX-TDD (some configurations)
6A	260 ns	LTE Intra-band non-contiguous carrier aggregation with or without MIMO or TX diversity, and inter-band carrier aggregation with or without MIMO or TX diversity
6B	130 ns	LTE Intra-band contiguous carrier aggregation, with or without MIMO or TX diversity NR (FR2) Intra-band contiguous carrier aggregation, with or without MIMO or TX diversity
6C	65 ns	LTE and NR MIMO or TX diversity transmissions, at each carrier frequency

Fuente: ITU-T G.8271/Y.1366 (03/2020)

# Niveles de exactitud de tiempo requeridos en redes de telecomunicaciones

## FDD: frequency alignment

2G:GSM, 3G:WCDMA,  
4G:LTE



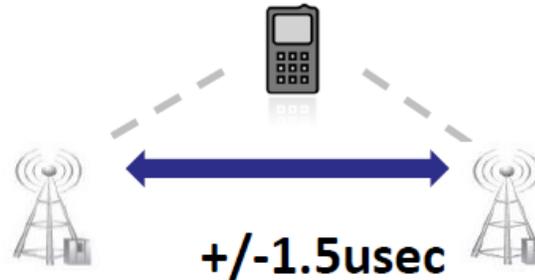
SyncE was designed for this application. RAN vendors pushing BC as SyncE not stable enough to support first 5G NR Frequency recovery

## FDD/TDD: Absolute phase alignment

4G: LTE, 4.5G LTE-A

5G NR Basic Service :

+/-1.5usec Time Error from UTC

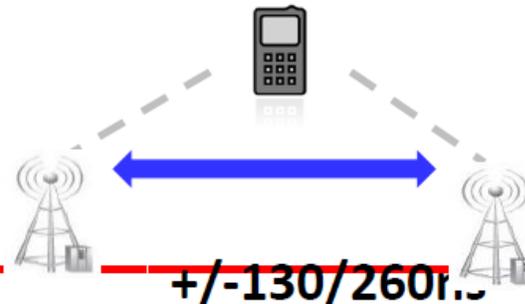


Ethernet / TDD require distributed PTP based Timing Architectures

## 5G NR Relative phase alignment

+/- range 130 to 260 nanoseconds

Radio to Radio



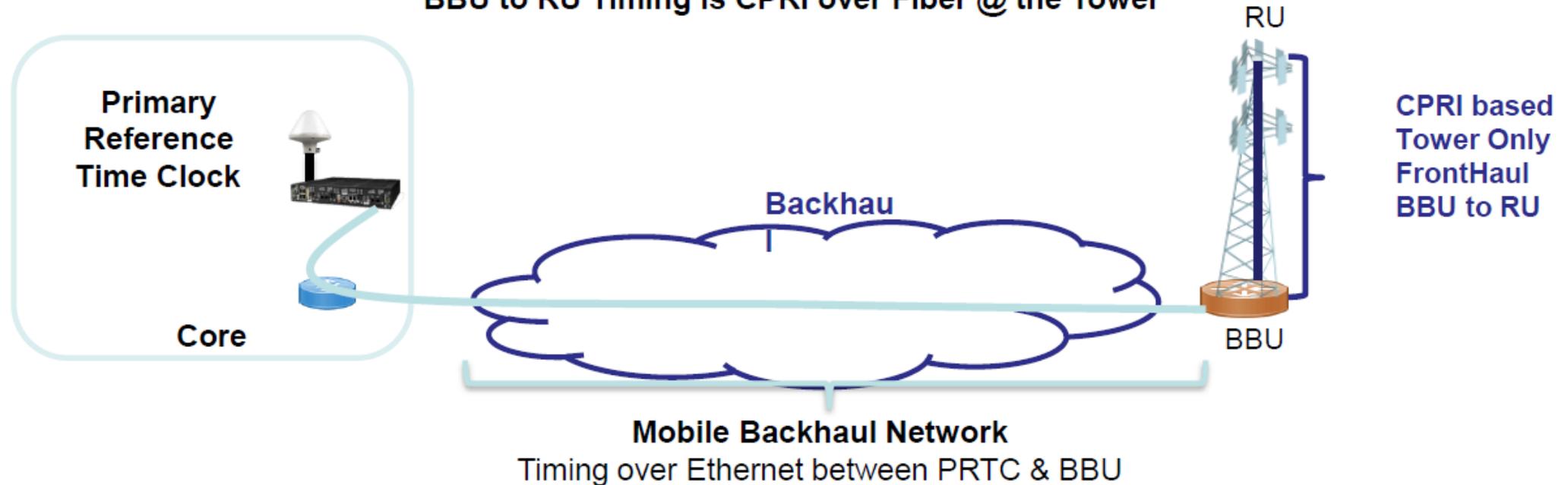
Advanced 5G services at the network edge will be mostly PTP based, especially for small 5G Radio Units

15

Fuente: "Mobile Network Frequency or Phase Requirements", Microchip

# Presupuesto de Synch en LTE-A

SyncE & PTP for timing on the Mobile Backhaul  
BBU to RU Timing is CPRI over Fiber @ the Tower

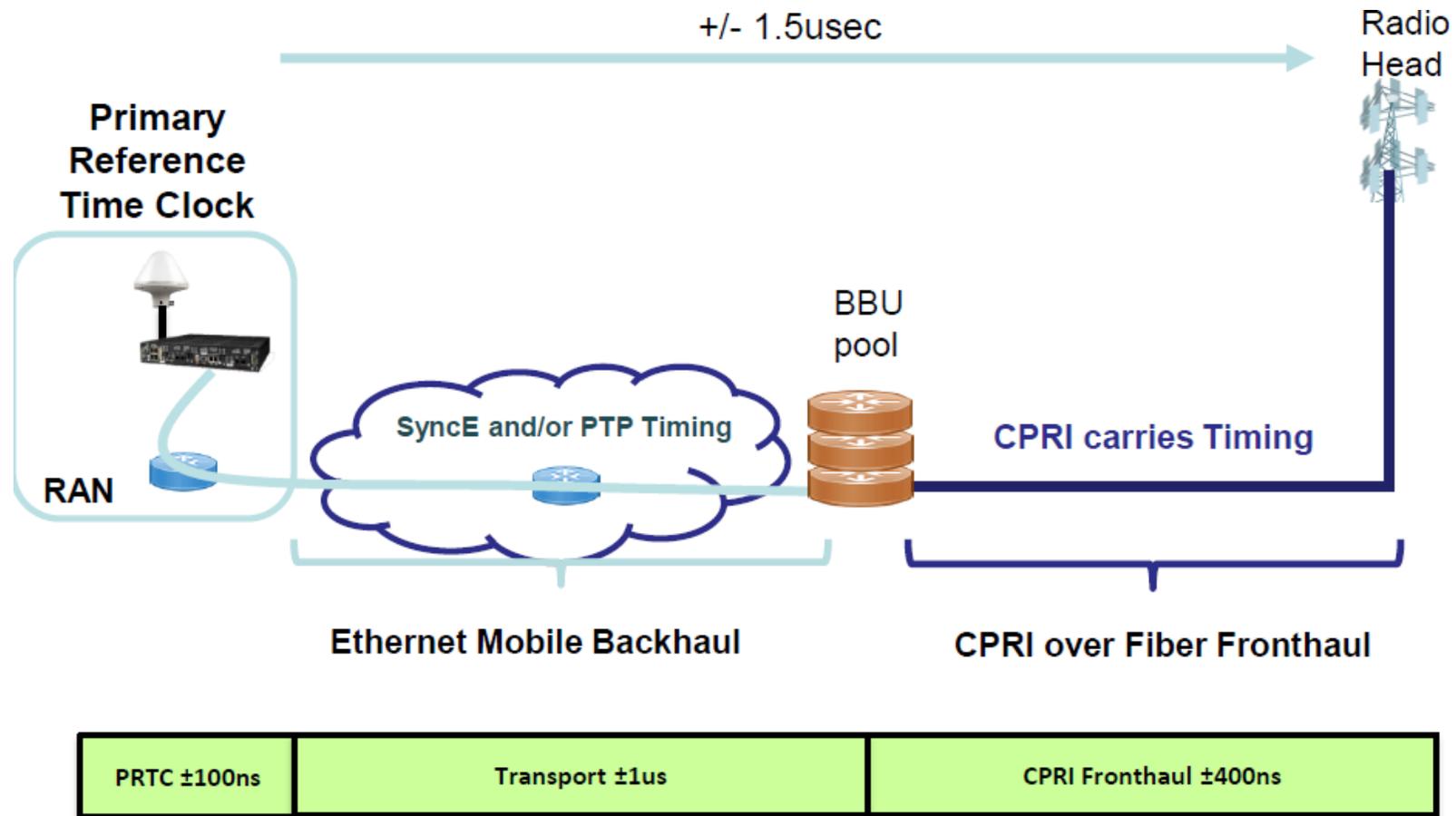


PRTC $\pm 100\text{ns}$	Transport $\pm 1\mu\text{s}$	BBU to RU $\pm 400\text{ns}$
-------------------------	------------------------------	------------------------------

End to End Time Error Budget for LTE-A / LTE-TDD =  $\pm 1.5\mu\text{sec}$

Fuente: "Mobile Network Frequency or Phase Requirements", Microchip

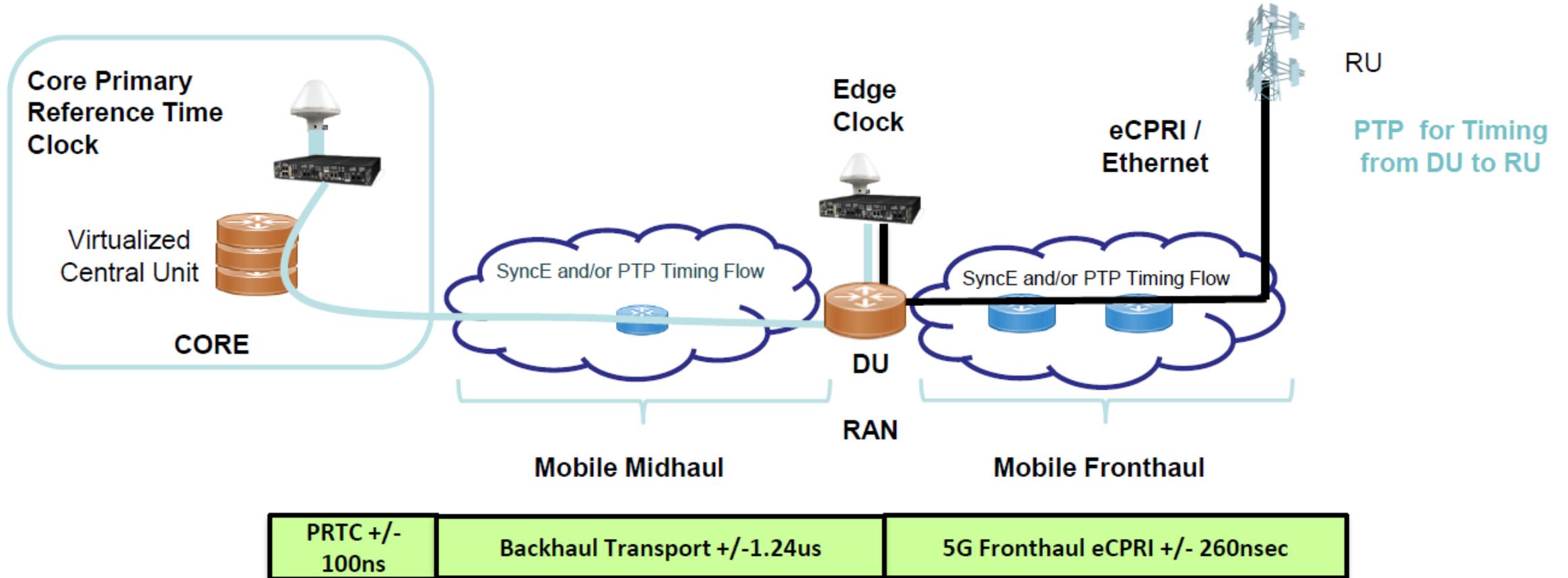
# Presupuesto de Synch en LTE-A



**End to End Time Error Budget for LTE-A / LTE-TDD = +/- 1.5usec**

Fuente: "Mobile Network Frequency or Phase Requirements", Microchip

# Presupuesto de Synch en 5G NR



**End to End Time Error Budget +/- 1.5usec**

Reducción de presupuesto de fronthaul: de 400ns a 260ns/130ns para servicios avanzados

Fuente: "Mobile Network Frequency or Phase Requirements", Microchip

# Tipos de relojes de Tiempo

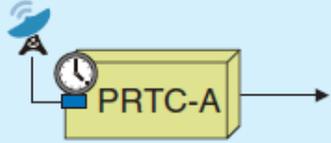
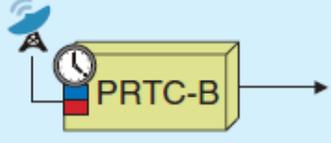
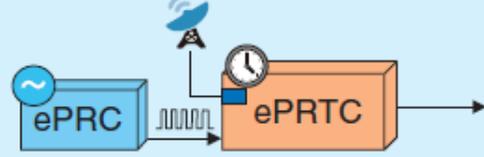
---

**PRTC: Primary Reference Time Clock.** Un generador de tiempo de referencia que proporciona una señal de tiempo de referencia rastreable a un estándar de tiempo reconocido internacionalmente, por ejemplo, hora universal coordinada (UTC).

**ePRTC: enhanced PRTC.** Agrega referencia de frecuencia al PRTC, tomando como entrada una señal de un ePRC.

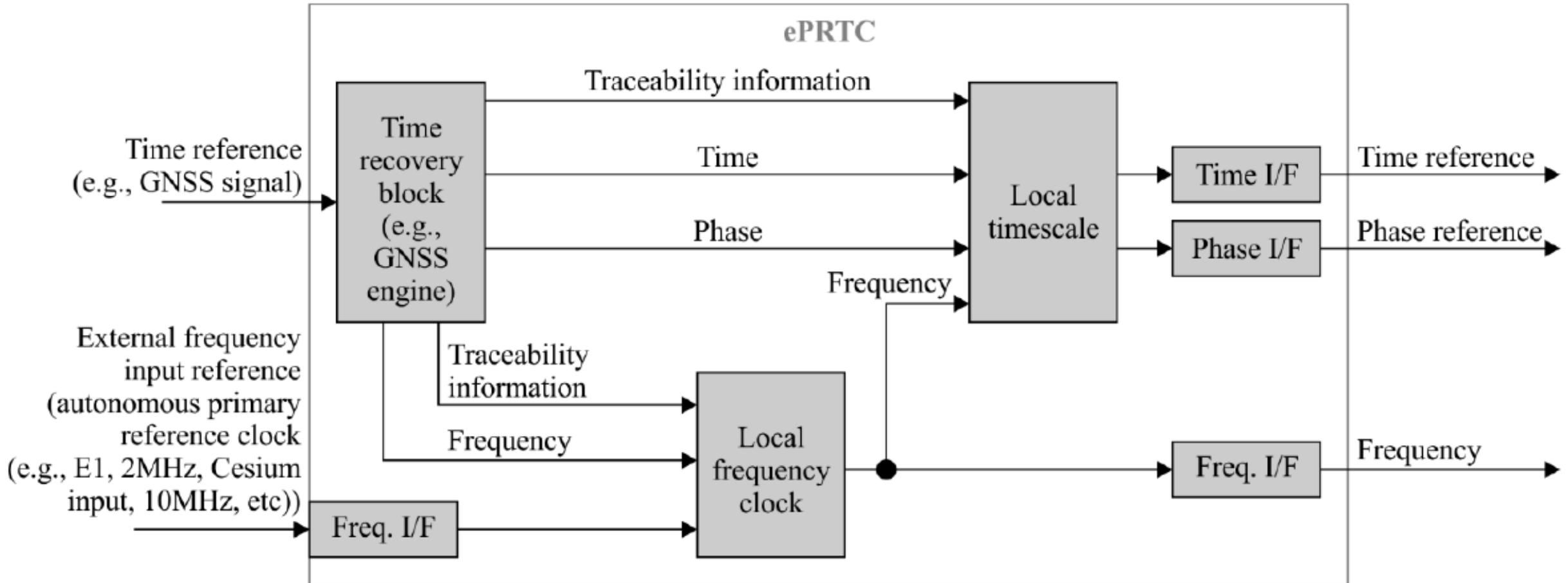
**cnPRTC: Coherent Network PRTC.** Conecta relojes de referencia primarios en el nivel más alto de la red central o regional. Esto proporciona la capacidad de mantener la precisión del tiempo de ePRTC en toda la red, incluso durante períodos de pérdida de GNSS regional o de toda la red. Las mediciones comparativas entre los relojes son un componente central del sistema cnPRTC, por lo que el sistema cnPRTC también proporciona la supervisión de los relojes.

# Clasificación de los PRTC

PRTC type	Performance	Device configuration
PRTC-A (G.8272)	Maximum time error: 100 ns	
PRTC-B (G.8272)	Maximum time error: 40 ns Error reduction of GNSS signal reception by high-precision receiver	
enhanced PRTC (ePRTC) (G.8272.1)	Maximum time error: 30 ns Time synchronization is maintained when GNSS reception is impossible by frequency-reference device (ePRC) (within 100 ns over 14 days).	
coherent network PRTC (cnPRTC) (G.8275 et al.) Under discussion	Maximum time error: ? Reliability improved by mutual monitoring and comparison through the network High precision achieved by mutual synchronization	

Fuente: Trends in Standardization of High precision Time- and Frequency synchronization Technology for Creating a 5G Mobile Network  
Kaoru Arai and Makoto Murakami, NTT Technical Review Vol. 17 No. 1 Jan. 2019

# ePRTC



Fuente: ITU-T G.8272.1

# NTP - Network Time Protocol

---

Network Time Protocol (NTP), es un protocolo para la sincronía de relojes de computadoras y equipos a una referencia de tiempo común sobre la red.

Es una aplicación del tipo “cliente - servidor”.

Definido en RFC 1305 (v3-1992), RFC 5905 (v4-2010) y RFC 7822 (2016).

Logra precisiones del orden de los milisegundos.

NTP ha sido ampliamente desplegado en el mundo informático, para realizar sincronismo entre servidores y PCs.

Permite soportar actividades operativas, como la facturación y la correlación de eventos. Pero su precisión no es adecuada para el sincronismo de la red de telecomunicaciones.

# NTP

El “cliente” requiere la hora al servidor, enviando un paquete en el instante  $T_1$  (según el reloj del cliente).

El paquete es recibido por el servidor, en el instante  $T_2$  (según el reloj del servidor) y respondido en el instante  $T_3$  (según el reloj del servidor). El paquete incluye los tiempos  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_3$

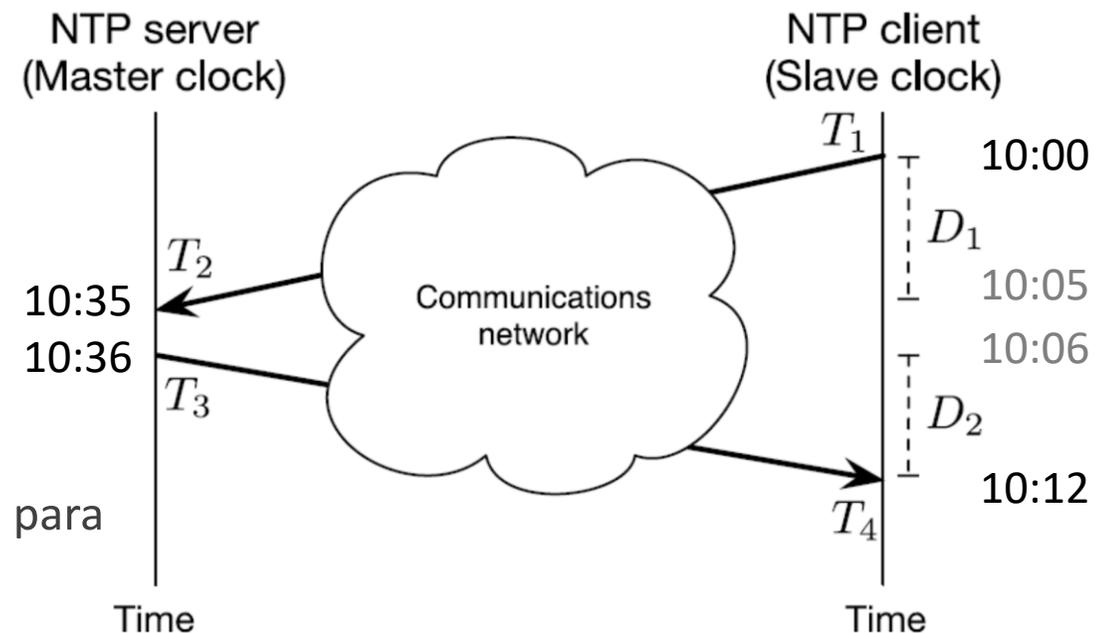
El paquete es recibido por el cliente en el instante  $T_4$  (según el reloj del cliente)

Con la información de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , y  $T_4$ , el cliente estima cuál es el tiempo de propagación entre el servidor y el cliente, y determina su offset respecto a la hora del servidor:

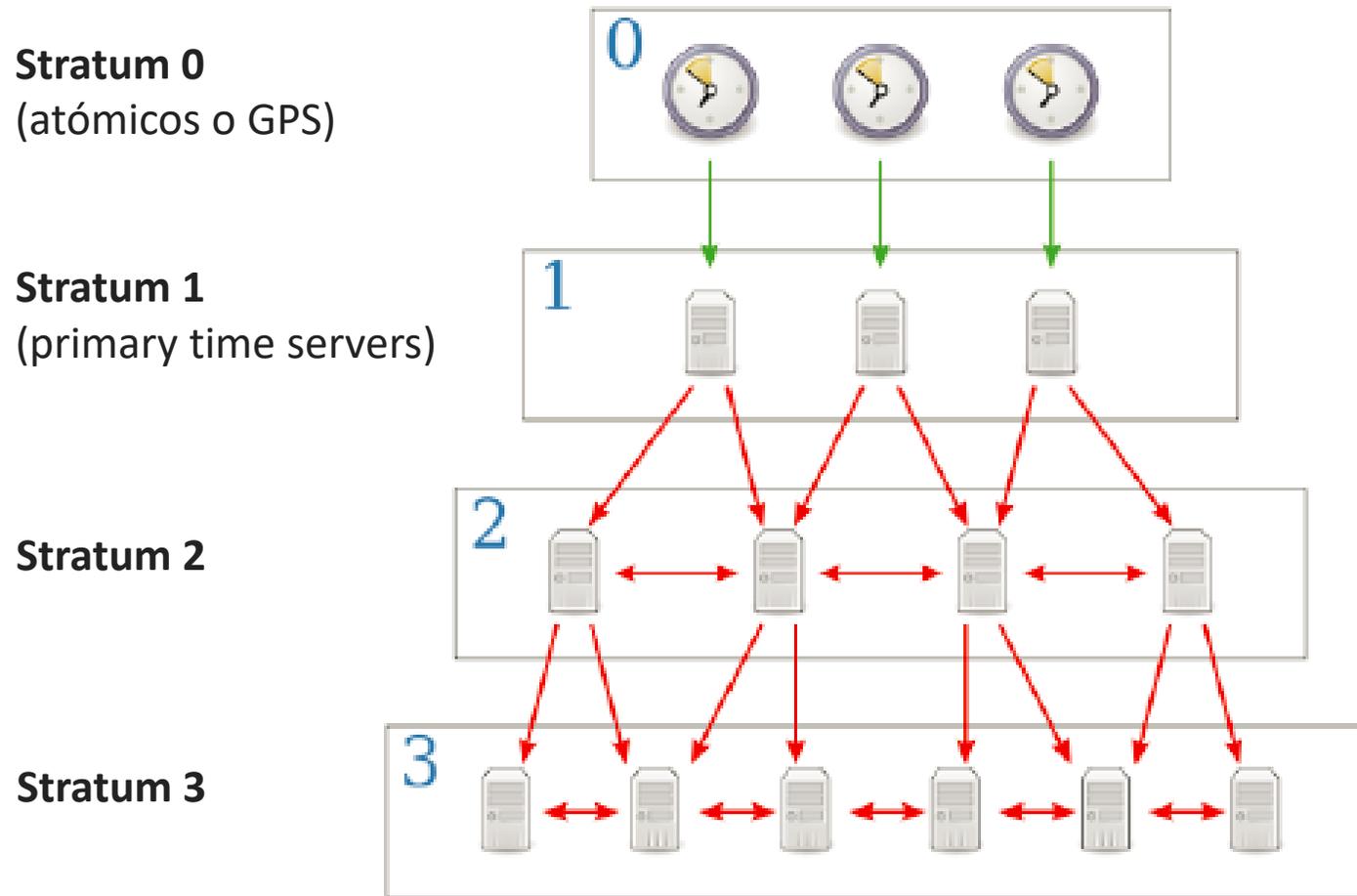
$$D_1 = T_2 - T_1 \quad D_2 = T_4 - T_3$$
$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad \text{Offset} = \frac{(T_2 - T_1) + (T_3 - T_4)}{2} = \frac{D_1 - D_2}{2}$$

Si las demoras no son simétricas, el resultado no es exacto.

Se puede hacer un estudio estadístico, entre varios NTP, para elegir el mejor offset.



# Jerarquía NTP



# Ventajas y desventajas de NTP

---

## Ventajas

- Es sumamente sencillo de implementar
- Hay gran disponibilidad de servidores NTP accesible
- Está muy estandarizado y es ampliamente utilizado

## Desventajas

- Las precisiones que logra son de decenas de milisegundos
- La precisión depende de la simetría en los tiempos de propagación, lo que no se da en muchos escenarios prácticos
- Las “marcas de tiempo” son realizadas a nivel de la capa de aplicación, y no consideran los tiempos involucrados en las capas inferiores del stack IP

# PTP - Precision Time Protocol

---

Protocolo definido en el standard IEEE 1588 (2008): “Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems”. Luego adoptado por ITU.

Permite la transmisión de frecuencia, tiempo y fase.

Surge en el ambiente industrial para sincronizar automatismos.

Logra precisiones menores a micro-segundos

Hay varios “perfiles”:

- Default, Telecom, Power.

Actualmente es ampliamente usado para sincronización de radio bases móviles, 3G-Full IP, LTE y 5G.

Es similar en varios aspectos a NTP, pero con mejoras que permiten mucho mayor precisión.

# PTP – Mejoras respecto a NTP

---

## Marcas de tiempo a nivel de MAC

- Los equipos que soportan PTP realizan las marcas de tiempo “por hardware”, a nivel de la capa MAC

## Mensaje de “Follow up”

- Permite mejorar la precisión de la marca de tiempo del mensaje “Sync”, midiendo efectivamente el momento exacto en el que el mensaje es enviado.

## Inicio del protocolo por el “Master”

- El protocolo es iniciado por el “Master” y no por el “Slave”. Esto permite que el “Master” defina cada cuanto tiempo se actualiza el reloj en la red

## Tiempo de residencia en nodos intermedios

- Es el tiempo que un paquete PTP reside en el “switch fabric” del nodo intermedio, desde que ingresa al puerto de entrada hasta que sale por el puerto de salida.
- Se puede medir en ambos sentidos (Master-Slave y Slave-Master)
- Si el nodo intermedio soporta PTP, estos tiempos los incluye en los paquetes *Sync*, *Follow\_up* y *Delay\_req*

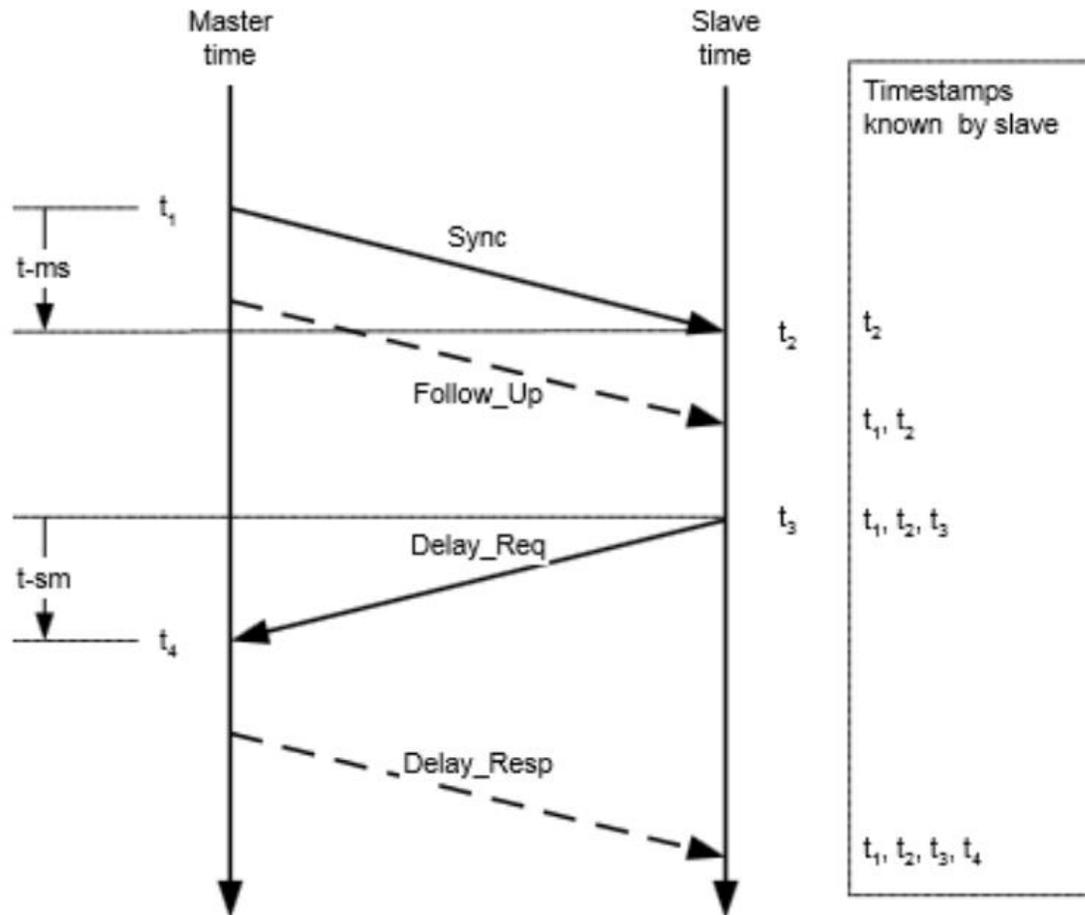
## Demora asimétrica

- Si se conocen que existen demoras asimétricas fijas, para una conexión dada, se puede usar un parámetro de demora asimétrica dentro del protocolo (*delayAsymmetry*)

$$D_{m-s} = D_{promedio} + D_{asimétrica}$$

$$D_{s-m} = D_{promedio} - D_{asimétrica}$$

# PTP – Funcionamiento (Simétrico)



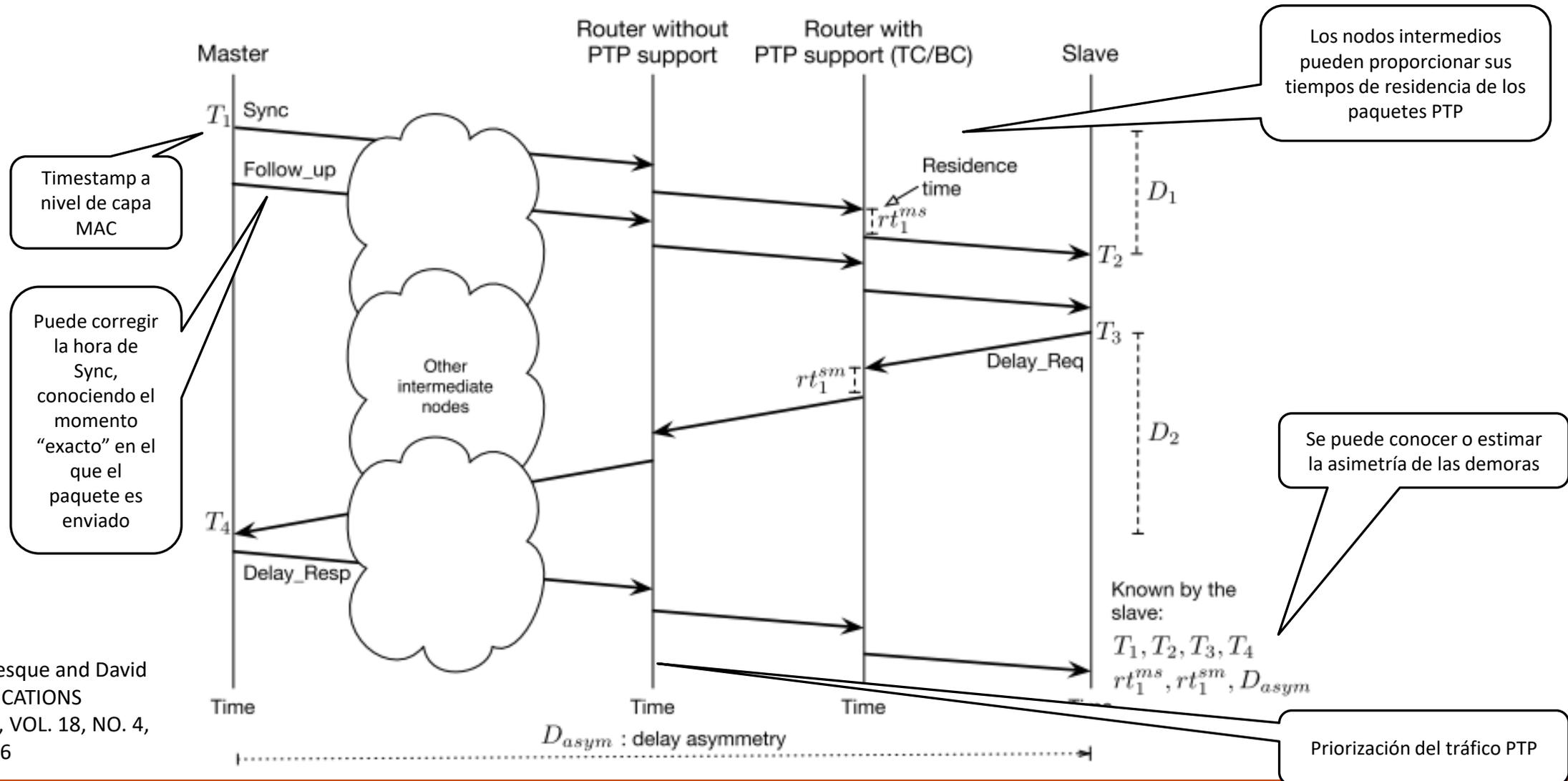
## Secuencia de mensajes:

- Master envía Sync message al esclavo, y nota tiempo  $t_1$  de envío
- Slave recibe Sync message y nota tiempo de recibo  $t_2$  (local)
- Master puede enviar  $t_1$  más preciso en un Follow\_Up
- Slave envía Delay\_Req al master y toma nota del tiempo  $t_3$  (local) al que se envía
- Master recibe Delay\_Req y nota tiempo de recibo  $t_4$
- Master envía  $t_4$  a slave en un Delay\_Resp

$$t_2 - t_1 = \tilde{o} + d$$

$$t_4 - t_3 = -\tilde{o} + d$$

# PTP – Funcionamiento (Asimétrico)

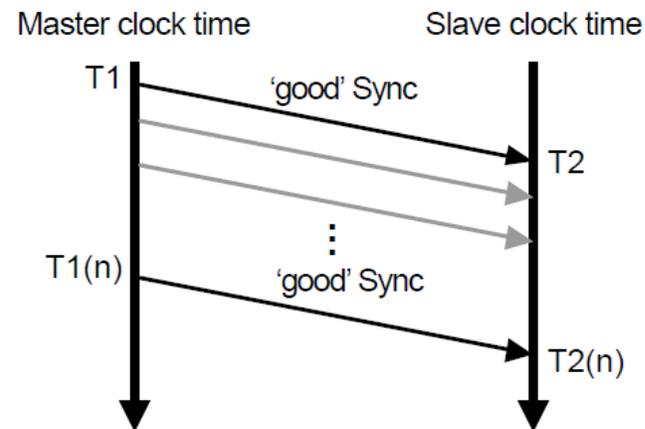


Tomado de Martin Lévesque and David Tipper, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 18, NO. 4, FOURTH QUARTER 2016

# PTP – Funcionamiento

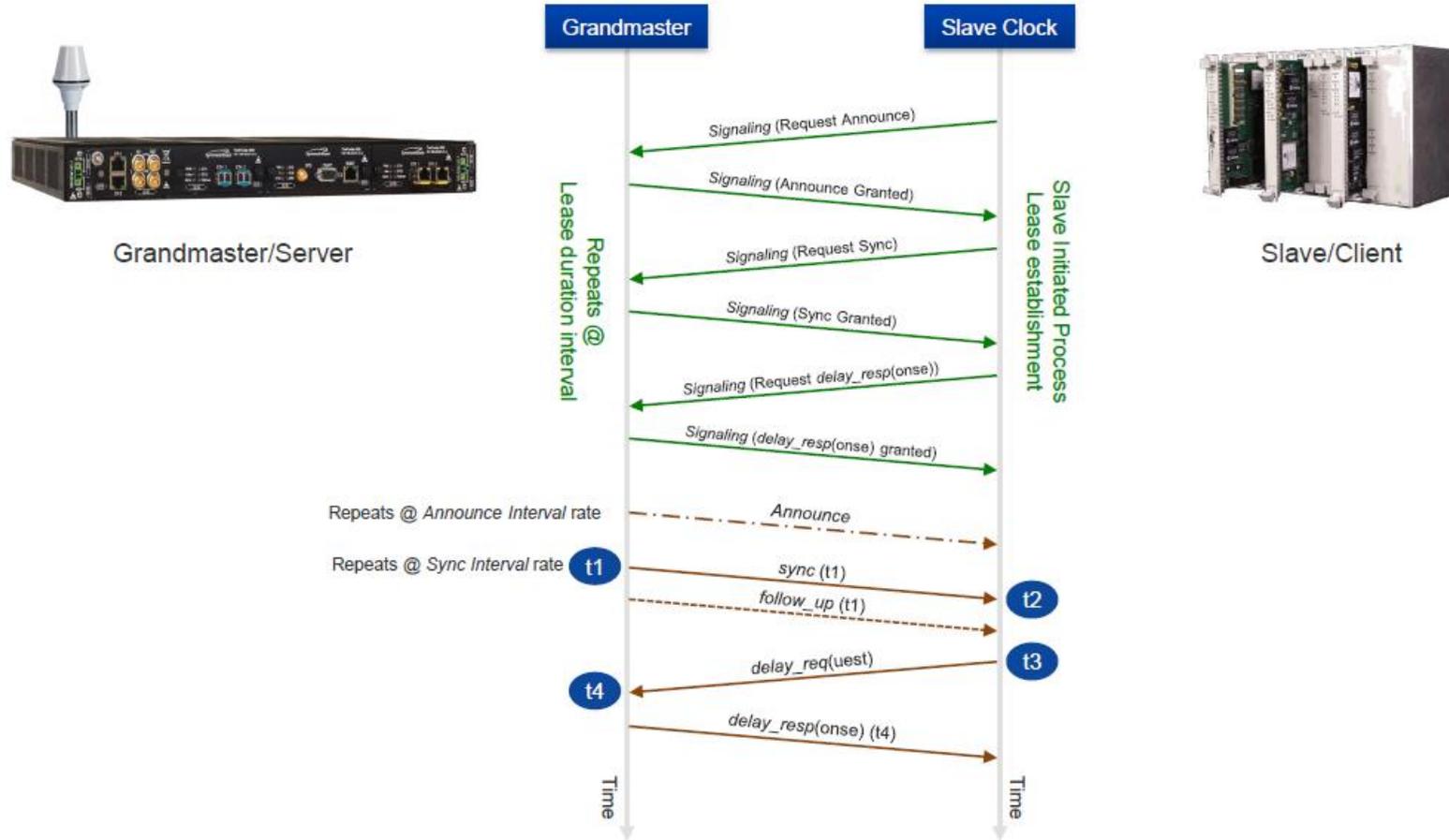
Además de corregir el “tiempo”, es necesario ajustar la frecuencia del “slave” a la frecuencia del “master”

Esto se logra enviando periódicamente mensajes de Sync, desde el Master al Slave



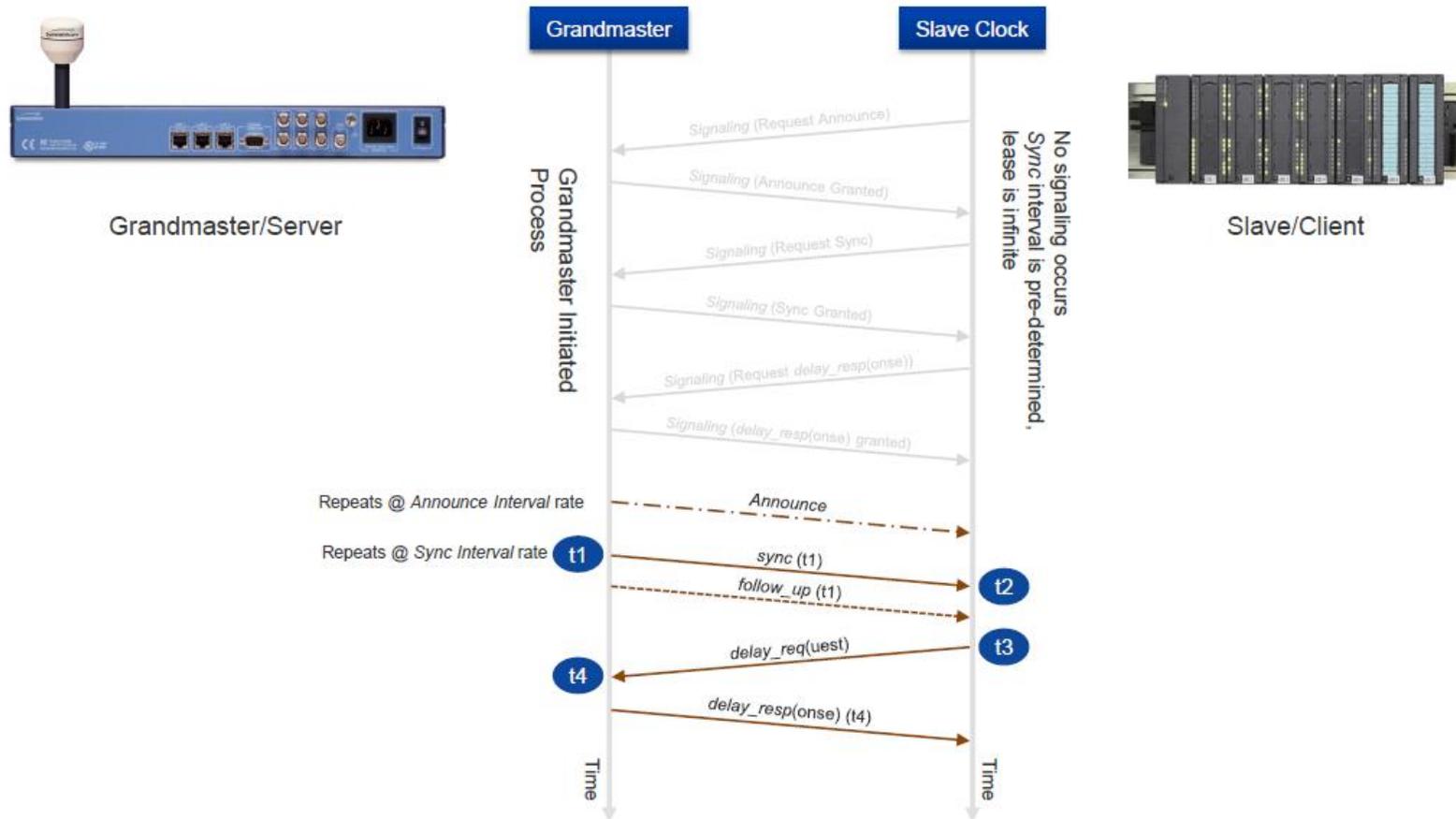
$$rate\_ratio = \frac{T2(n) - T2}{T1(n) - T1}$$

# PTP – Transferencia de Tiempo (Unicast)



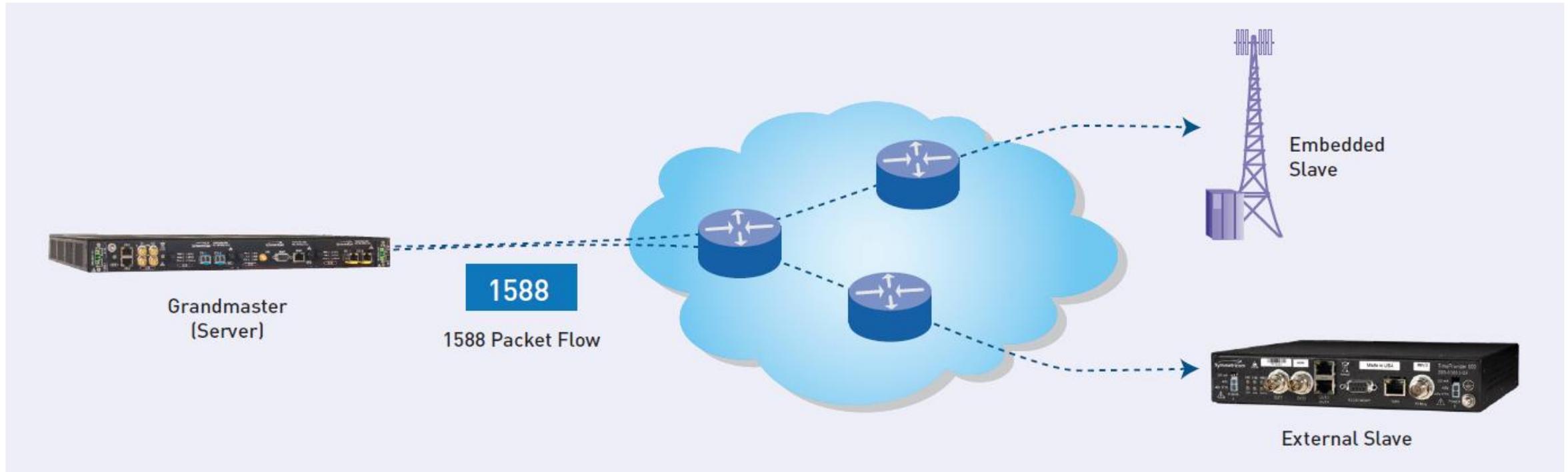
Imágenes tomadas de "Synch Introduction", Microchip

# PTP – Transferencia de Tiempo (Multicast)



Imágenes tomadas de "Synch Introduction", Microchip

# PTP – Ejemplo



Imágenes tomadas de "Synchronizing IP Mobile Networks", Symmetricom

# PTP – Impacto en el Tráfico

---

## Tamaños de paquetes:

• Signaling (request)	96 bytes (54)
• Signaling (ACK/NACK)	98 bytes (56)
• Announce message	106 bytes (64)
• Sync message	86 bytes (44)
• Follow_Upmessage	86 bytes (44)
• Delay_Resp(onse)	96 bytes (54)
• Delay_Req(uest)	86 bytes (44)

## Valores típicos:

• Announce Interval	1 per second
• Sync Interval	64per second
• Lease duration	300s econds
• Delay_Req(uest)	64per second
• Delay_Resp(onse)	64per second

## Tráfico por segundo:

$$(96 \times 3) + (98 \times 3) + 106 + 64 \times (86 + 96 + 86)$$

$$= 17840 \text{ bytes}$$

$$= \mathbf{0.017\%}$$
 of Fast Ethernet (100Mbps)

$$= \mathbf{0.00166\%}$$
 of GigE

Imágenes tomadas de "Synch Introduction", Microchip

# Comparación PTP vs SyncE

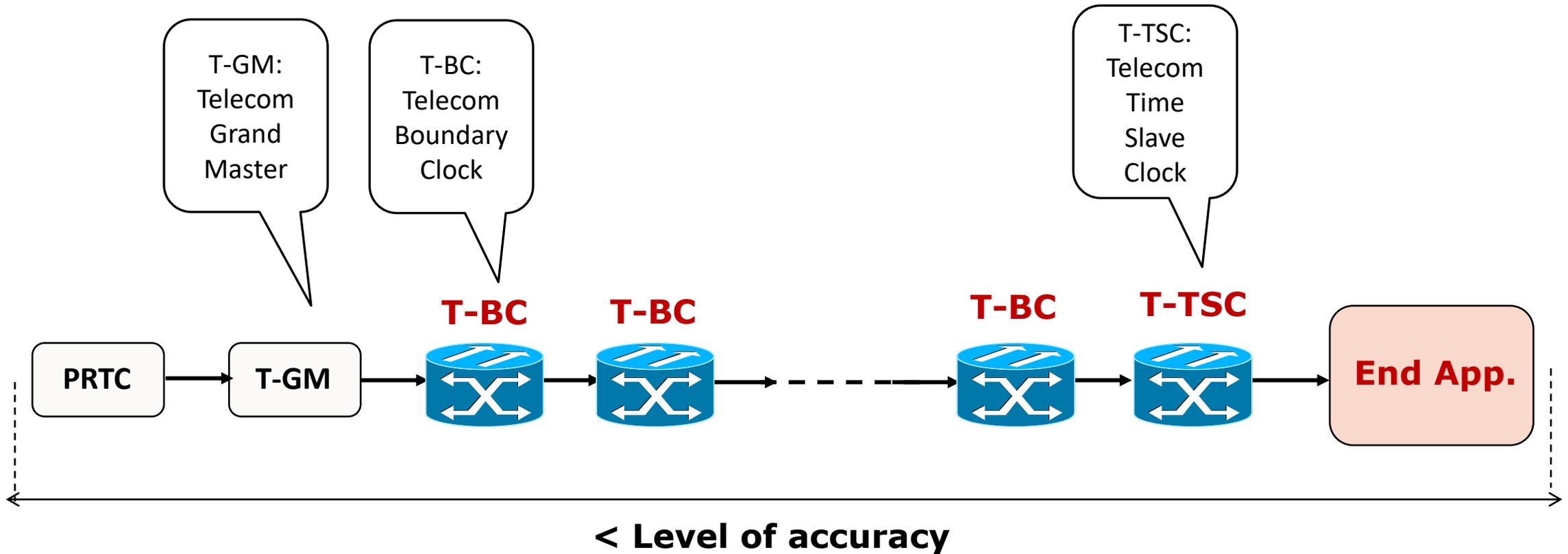
Attribute	IEEE 1588	SyncE
Capability	Frequency, Time	Frequency
Layer	Ethernet/UDP	Physical
Distribution	In-band 1588 Packets	Physical layer
Schema	End to End (unicast or multicast)	Point to point
Distribution	In-band 1588 Packets	Physical layer
Transport Media	Native Ethernet, xDSL, Microwave.	Native Ethernet
Inter-Operability	Standards based Grandmaster & slave. Independent of intermediate nodes.	Standard based SyncE switches only
Relevant Standards	IEEE 1588, ITU G.8261/3/5	ITU G.8261/2/4

Imágenes tomadas de "Synch Introduction", Microchip

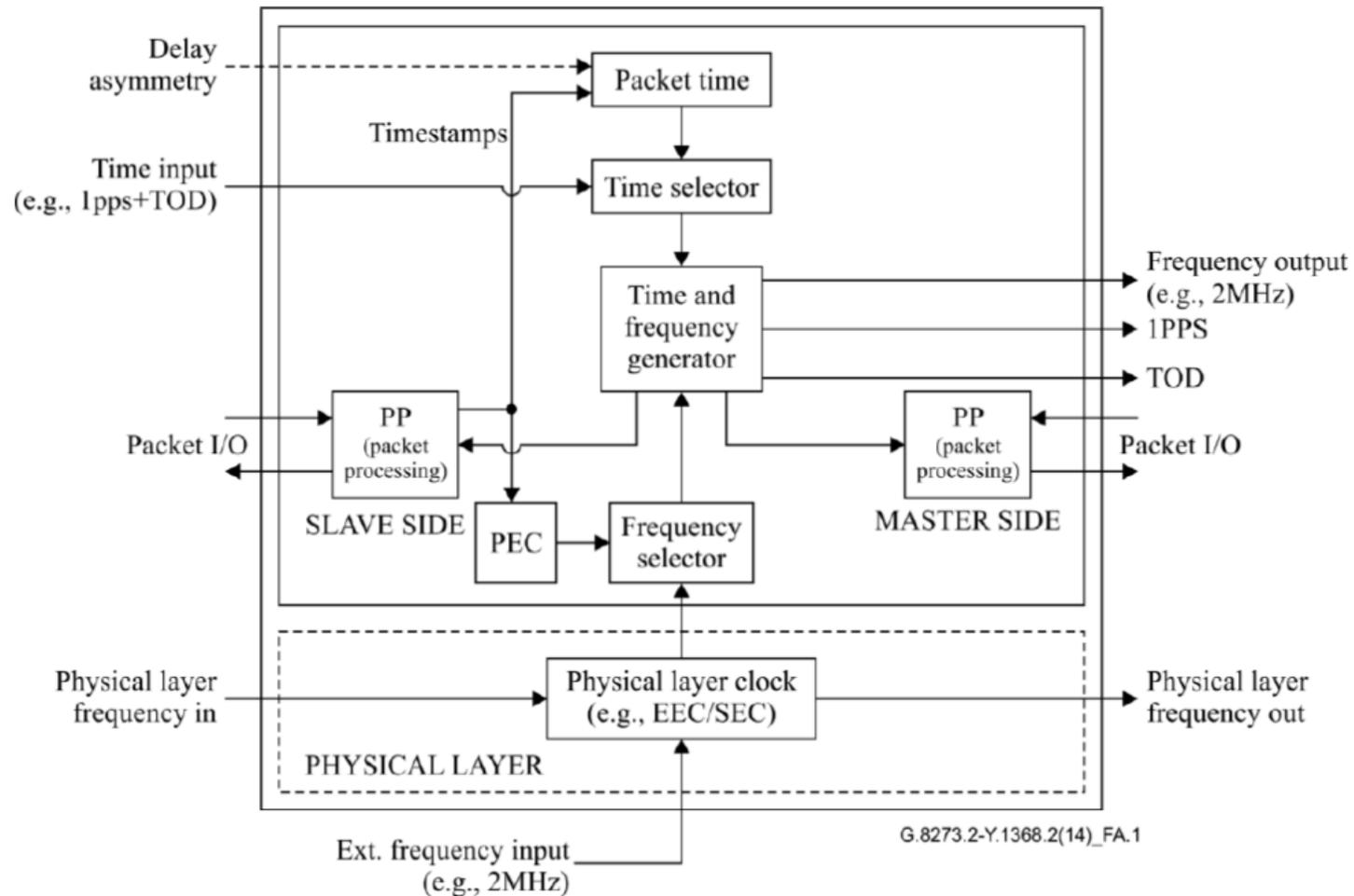
# Comparación PTP vs NTP

Feature	NTP	PTP
Peak time transfer error possible (accuracy at slave)	>0.5 milliseconds	<100 microseconds to 100's of nanoseconds
Error Source	Routers	Switches and O/S stack delay
Spatial extent	LAN/WAN	LAN/WAN
Implementation	<ul style="list-style-type: none"><li>•HW or SW Servers</li><li>•SW clients</li><li>•Clients "Pull" time from Server (client/server)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•HW Masters</li><li>•HW or SW</li><li>•Master "Pushes" time to Slave (master/slave)</li></ul>
Protocols	UDP/IP – Unicast (mainly)	UPD/IP - Multicast Unicast, Hybrid
Security	MD5 & Autokey	none
Administration	Configured	Self organized
QoS	Best effort	Highest priority

# Arquitectura de PTP (simplificado)



# T-BC: Telecom Boundary Clocks

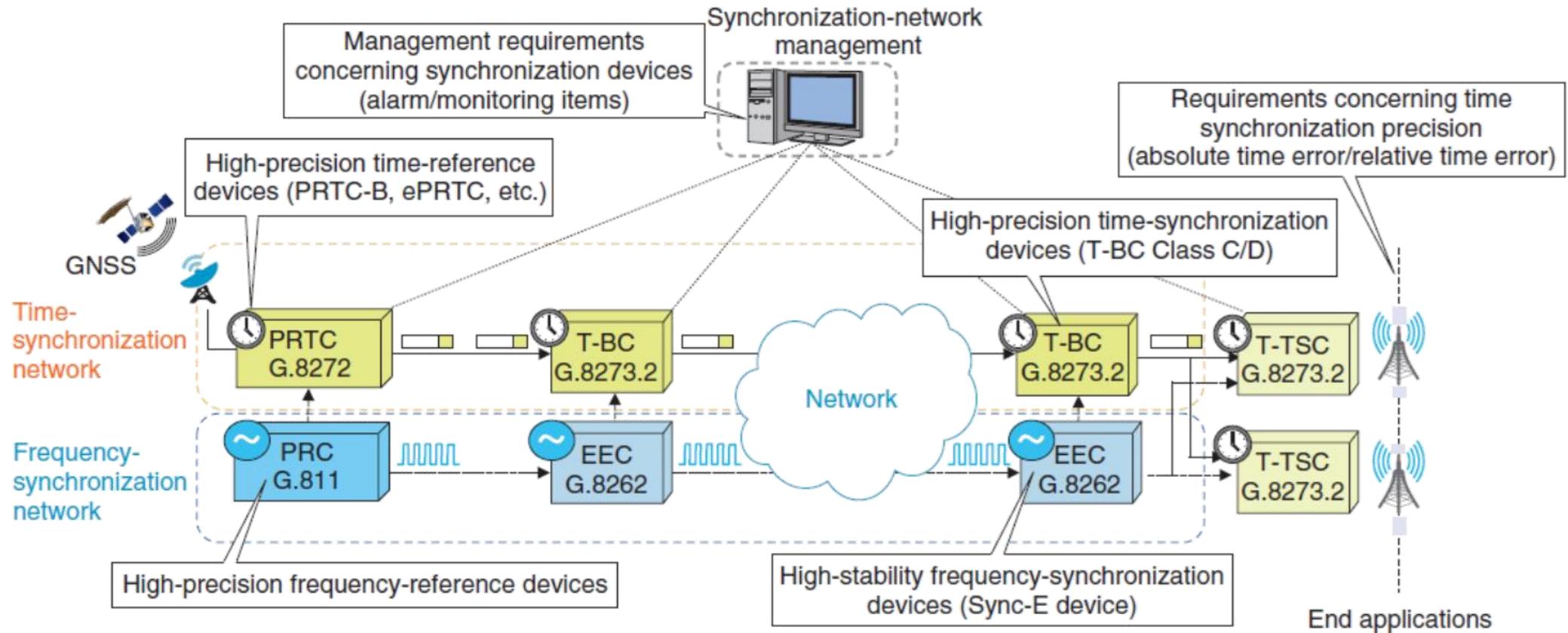


Fuente: ITU-T G.8273.2

NOTE 1 –The physical layer frequency signal may be bidirectional for SyncE.

NOTE 2 – The "Physical Layer Clock" includes a selection mechanism as there may be multiple inputs.

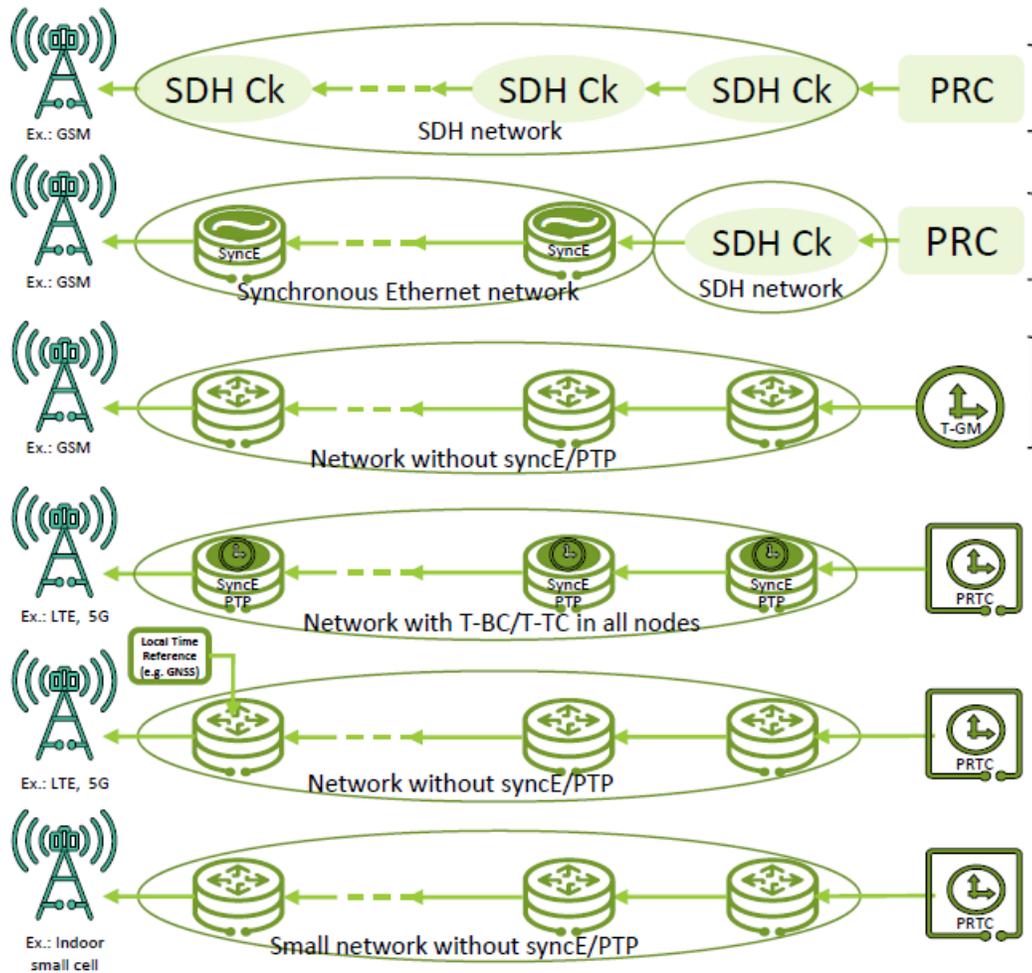
# Ejemplos de redes de sincronismo



PRTC: primary reference time clock  
 PRC: primary reference clock  
 T-BC: telecom-boundary clock  
 T-TSC: telecom-time slave clock  
 EEC: synchronous Ethernet equipment clock

Fuente: Trends in Standardization of High precision Time- and Frequency synchronization Technology for Creating a 5G Mobile Network  
 Kaoru Arai and Makoto Murakami, NTT Technical Review Vol. 17 No. 1 Jan. 2019

# Ejemplos de redes de sincronismo



ITU-T G.813, G.811, G.812 specifies clocks used in the SDH Network

ITU-T G.8262 specifies synchronous clocks, including Synchronous Ethernet (SyncE), that are compatible with SDH clocks defined in G.813 and G.812

ITU-T G.8265.1 profile was targeted for applications that need frequency synchronization suitable for earlier deployment scenarios that only needed frequency when there was no syncE and no IEEE 1588 support in the equipment. ITU-T G.8263 specifies the end clock.

ITU-T G.8275.1 profile was targeted for applications that need accurate phase/time synchronization required due to increasing need for time sync in Telecom. It was enabled by upgrades done in the network to support T-BCs and/or T-TCs in every node of the network. Enhanced synchronous clocks (e.g., eSyncE) are specified in G.8262.1 for tighter clock accuracy. ITU-T G.8273.2 specifies T-BC/T-TSC and G.8273.3 specifies T-TC.

ITU-T G.8275.2 profile was targeted for applications that need accurate phase/time synchronization, but the network is not able to provide full time support (no T-BCs/T-TCs) due to legacy equipment or in the case of leased line. ITU-T G.8273.4 specifies the clocks.

Appendix III of ITU-T G.8275 provides generic interworking function used to connect network segments that are running different profiles

Tomado de: IEEE 802 Plenary – Tutorial on Synchronization: A Key Function in Time-Sensitive Networking and Beyond, 3/2/2021

# Gracias

---