

# CONTRIBUCIONES DE AGGO A LA MATERIALIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

---

C. Brunini, S. Cimbaro, E. D'Onofrio, L. I. Fernández,  
E. E. Lauría, M. V. Mackern, S. Miranda, J. F. Moirano,  
E. Pallejá, D. Piñón, A. Richter, R. Rodríguez y C. Tocho.  
Compiladoras: M. A. Arecco y M. E. Gómez.

---







# **CONTRIBUCIONES DE AGGO A LA MATERIALIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL**

---

C. Brunini, S. Cimbaro, E. D'Onofrio, L. I. Fernández,  
E. E. Lauría, M. V. Mackern, S. Miranda, J. F. Moirano,  
E. Pallejá, D. Piñón, A. Richter, R. Rodríguez y C. Tocho.  
Compiladoras: M. A. Arecco y M. E. Gómez.

---



Contribuciones de AGGO a la materialización del sistema de referencia geodésico global / María Alejandra Arecco ... [et al.] ; compilación de María Eugenia Gómez ; María Alejandra Arecco. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Eudeba, 2023.

Libro digital, PDF - (Biblioteca de ingeniería)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-950-23-3327-4

1. Ingeniería. 2. Geodesia. I. Arecco, María Alejandra, comp. II. Gómez, María Eugenia, comp.

CDD 526.1



Eudeba

Universidad de Buenos Aires

1ª edición: enero de 2023

© 2023

Editorial Universitaria de Buenos Aires

Sociedad de Economía Mixta

Av. Rivadavia 1571/73 (1033) Ciudad de Buenos Aires

Tel.: 4383-8025

[www.eudeba.com.ar](http://www.eudeba.com.ar)

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Institucional de la Facultad de Ingeniería de la UBA

Corrección y composición general: Eudeba

Impreso en Argentina.

Hecho el depósito que establece la ley 11.723



No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su almacenamiento en un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia u otros métodos, sin el permiso previo del editor.

# ÍNDICE

Prefacio <i>Claudio Brunini</i>	7
Prólogo <i>Ezequiel Pallejá</i>	9
Capítulo 1. Sistemas de tiempo <i>Claudio Brunini</i>	13
Capítulo 2. El sistema de referencia celeste internacional y los parámetros de orientación terrestre: conceptos y aportes nacionales a su estudio <i>María Eugenia Gómez y Laura Isabel Fernández</i>	41
Capítulo 3. Sistema de referencia terrestre <i>María Virginia Mackern, Juan Francisco Moirano, Rubén Rodríguez, Claudio Brunini, Sergio Cimbaro y Diego Piñón</i>	75
Capítulo 4. Sistemas de alturas <i>Juan Francisco Moirano, Andreas Richter y Enrique D'Onofrio</i>	173
Capítulo 5. Sistema de referencia gravimétrico. Evolución histórica, situación actual y proyección futura <i>María Alejandra Arecco, Claudia Tocho, Eduardo E. Lauría y Silvia Miranda</i>	213

Apéndice	257
Recomendaciones del Primer Taller del Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO)	257
Recomendaciones relacionadas con el plan de acción	258
Recomendaciones relacionadas con la financiación de las actividades	261
Recomendaciones relacionadas con la difusión del documento	261

# PREFACIO

Esta obra tuvo su génesis en el Primer Taller Nacional del Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia. Celebrado en La Plata los días 14 y 15 de abril de 2016, produjo una serie de recomendaciones que se incluyen como apéndice de este texto.

Una de tales recomendaciones fue el establecimiento de un grupo de trabajo para identificar temas de investigación relevantes para la comunidad nacional, relacionados con la materialización de los sistemas de referencia de tiempo, espacio y gravedad y con las nuevas técnicas de observación instaladas en el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO).

En abril de 2017, el Subcomité de Geodesia del Comité Nacional de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica hizo propia esta recomendación y estableció oficialmente el Grupo de Trabajo sobre Geodesia y Geofísica de Referencia (denominado G3R en forma abreviada).

El G3R está integrado por María Alejandra Arecco, Claudio Brunini, María Eugenia Gómez, María Virginia Mackern, Juan Moirano y Ezequiel Pallejá, pero el texto que aquí ofrecemos integra aportes de otros especialistas. Tenemos con ellos una deuda de gratitud, al igual que con el Subcomité de Geodesia, por respaldar y prestigiar nuestro trabajo.

Confiamos en que la obra motive el acercamiento de nuevos investigadores a la geodesia y a la temática de los sistemas de referencia. Confiamos también en que contribuya a un mejor aprovechamiento del instrumental instalado en AGGO y en otros observatorios argentinos. Pero, sobre todo, confiamos en seguir trabajando por el crecimiento de una disciplina tan necesaria para el país.

Claudio Brunini  
Buenos Aires, julio de 2020



# PRÓLOGO

En este trabajo se analizan los principales sistemas de referencia requeridos por las ciencias geodésicas y geofísicas en la actualidad y con vistas al futuro inmediato. Este análisis incluye una descripción de su desarrollo histórico, su situación actual en el mundo y en particular su desarrollo en nuestro país.

Aunar esfuerzos individuales en aras de un mayor y mejor avance de las ciencias geodésicas es una tradición tanto a nivel internacional como local. Cuando el trabajo mancomunado de universidades e instituciones científicas y tecnológicas produce informes con recomendaciones, normas o estándares, es cuando se visualiza y aprovecha mejor el silencioso trabajo de los especialistas. Así, este trabajo multidisciplinario procura revisar el estado actual de los sistemas de referencia útiles en estas disciplinas para ponerlo a disposición de la comunidad científica, tecnológica y profesional de nuestro país, en momentos en que el tan mentado cambio de paradigmas nos sitúa en el comienzo de un exponencial desarrollo de nuevas formas de comunicación, transporte, navegación terrestre, marítima, aérea y espacial, y uso inteligente de los recursos naturales, entre otras importantes transformaciones tecnológicas.

El avance de la ciencia y las tecnologías y la generalización y globalización que acompañan actualmente su desarrollo requieren el análisis de un constante flujo de mediciones de todo tipo, las cuales no se podrían realizar sin el soporte de los sistemas de referencia en que se basan. La geodesia, como ciencia que procura la definición de la forma y dimensiones de la Tierra, su campo de gravedad y su posición y orientación en el espacio, así como sus variaciones en el tiempo, constituye un claro ejemplo de este requerimiento.

¿Cuál es el origen de nuestras mediciones de alturas? ¿Cuál es el sistema y cuál es el marco de referencia que mejor permiten el uso de los sistemas satelitales de navegación global (GNSS) con diferentes propósitos? ¿Cómo se definen hoy los patrones de tiempo y de frecuencia, necesarios para prácticamente todas las mediciones que se realizan en geodesia y en disciplinas afines? ¿En qué medida los movimientos propios de nuestro planeta en sí mismo y en el contexto del sistema solar y de nuestra galaxia influyen en la actualizada definición de los sistemas de referencia? ¿Cuál es el aporte del campo de gravedad en todos los sistemas y en el propio? Dar respuestas a este tipo de interrogantes y a otros muchos representa un desafío ineludible para todos los que se dedican a estas disciplinas, tanto en lo científico como en el ejercicio profesional.

Para alcanzar este objetivo se pondrá el foco en los sistemas de referencia más requeridos actualmente: el de tiempo, el celeste (astronómico), el sistema geodésico terrestre, los sistemas de alturas (cotas) y el gravimétrico. Lejos de ser independientes, estos sistemas se interconectan, se alimentan y se benefician compartiendo y sustentando conceptos, parámetros y procedimientos, así como compartiendo grandes cantidades de datos observacionales de campo y de laboratorio. Es por ello que resulta valiosa su inclusión en un mismo tratado, que es el que hoy se pone a disposición en estas páginas.

Los sistemas de posicionamiento global GPS-GNSS han sido probablemente el mayor detonador de este brusco cambio de expectativas en cuanto a la necesidad de actualizar y mejorar los sistemas de referencia. En particular, la compatibilización y unificación de los sistemas satelitales de navegación de distintos países, proceso actualmente en desarrollo avanzado, no podría realizarse sin la mencionada renovación.

En el nuevo panorama de desarrollo del actual milenio, los sistemas de referencia deben ser acordes con los ambiciosos objetivos a cumplir. La claridad conceptual, la exactitud y la precisión de sus componentes serán garantía de un desarrollo armónico y fructífero ulterior. Por ejemplo, el desarrollo de sistemas logísticos donde las cosas y los seres humanos controlen su posición relativa para optimizar transportes y el rendimiento de recursos (internet de las cosas), las misiones programadas para llegar y habitar la Luna, Marte y otros objetivos extraterrestres, la navegación autónoma, la tecnología 5G o el monitoreo del cambio global, no pueden sustentarse en los mismos sistemas de referencia que fundamentaron el histórico

desarrollo del pasado. Estas son solo algunas muestras del uso futuro de sistemas de referencia, más allá de otros centenares de proyectos que necesitan el mismo sustento.

Atención especial merece el capítulo gravimétrico, por ser la gravedad el más importante nexo entre la geodesia y la geofísica, justificando esta sociedad entre ambas disciplinas que perdura desde la creación de la Unión de Geodesia y Geofísica Internacional, una de las más antiguas y perdurables uniones científicas, que ha rendido abundantes frutos que seguramente se multiplicarán en el futuro.

En nuestro país, el conocimiento actualizado y profundo de estos fundamentos permitirá acrecentar el valor de nuestros propios desarrollos, continuando una rica tradición científica que debe ser volcada en beneficio de la nación.

Es por todo ello que se presenta este trabajo a la comunidad, producto de las contribuciones de los más destacados especialistas de nuestro país, cada uno de los cuales, junto con sus respectivos equipos de colaboradores altamente calificados, nos acerca no solo su propia experiencia sino la de las instituciones, empresas y proyectos en los que intervinieron, tanto en el pasado como en la actualidad.

Si la lectura de estos capítulos permite aclarar dudas, informarse del tema, mejorar la enseñanza e investigación o favorecer la creación de nuevas aplicaciones y desarrollos indispensables para nuestro país, habremos cumplido nuestro objetivo.

Ezequiel Pallejá  
Buenos Aires, julio de 2020



# CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE TIEMPO

CLAUDIO BRUNINI\*

## Resumen

La definición rigurosa y la materialización precisa del tiempo son imprescindibles para la geodesia, la astronomía y muchas otras disciplinas. Sin ello no sería posible vincular las posiciones de los astros o de los satélites artificiales con puntos de la Tierra y no existiría la navegación precisa sobre esta o en espacio, ni muchas otras tecnologías modernas.

Este capítulo comienza con una breve introducción al tema y continúa con las definiciones básicas que caracterizan a la medición del tiempo y la frecuencia. Se describen los conceptos de precisión y exactitud, que son conceptos que abarcan cualquier tipo de medición, y se profundiza en el concepto de varianza de Allan, que es particularmente útil para caracterizar a las mediciones de tiempo.

Más adelante, se reseña la forma en que evolucionaron los instrumentos para la medición del tiempo, desde los remotos relojes de sol, hasta los actuales relojes atómicos. Se describe cualitativamente el funcionamiento de los patrones de cesio y MASERES de hidrógeno, pero no se abordan los patrones cuánticos u ópticos, ni otras tecnologías que todavía se hallan en fase de experimentación y desarrollo.

Se avanza luego sobre las diferentes escalas de tiempo que se utilizaron en el pasado o se utilizan en la actualidad. Se describen

\* Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. AGGO, Conicet. El autor agradece las valiosas ideas y el material aportado por numerosos colegas de diferentes instituciones, entre ellas, el INTI, el IGN, el CITEDEF, el ONBA y el SHN.

las escalas rotacionales, basadas en la observación de la rotación de la Tierra, y la dinámica, basada en modelar la translación terrestre. Las primeras incluyen al tiempo solar, que engendra la escala de Tiempo Universal (UT) con sus variantes UT0, UT1 y UT2; la segunda incluye al Tiempo de las Efemérides (ET).

La descripción aborda luego las escalas físicas, basadas en el Segundo Internacional (SI) y el Tiempo Atómico Internacional (TAI), del que se deriva el Tiempo Universal Coordinado (UTC). Por último, se abordan los efectos relativistas en la medición del tiempo, que llevan a los conceptos de “tiempo propio” y “tiempos coordenados” y la definición de las escalas de Tiempo Coordinado Geocéntrico (TCG), Tiempo Terrestre (TT), Tiempo Coordinado Baricéntrico (TCB) y Tiempo Dinámico Baricéntrico (TDB).

La parte final del capítulo está dedicada a describir la situación argentina en la materia. Se menciona brevemente a las principales instituciones que mantienen actividades sistemáticas relacionadas a la materialización del tiempo o al desarrollo de tecnologías afines y, ya con más detalles, se describe el estado actual y la proyección futura de las principales líneas de trabajo que se están abordando en el país.

**PALABRAS CLAVES:** tiempo, medición del tiempo, relojes atómicos, escalas de tiempo, contribuciones argentinas a la materialización del tiempo.

## Siglas

AFIP	Administración Federal de Ingresos Públicos	
AGGO	Argentinean-German Geodetic Observatory	Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia
ARIU	Asociación Redes de Interconexión Universitaria	
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures	Oficina Internacional de Pesos y Medidas
CABASE	Cámara Argentina de Internet	
CITEDEF	Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa	
EAL	Échelle Atomique Libre	Escala Atómica Libre
ET	Ephemeris Time	Tiempo de las Efemérides
GAST	Greenwich Apparent Sideral Time	Tiempo Sidéreo Aparente en Greenwich
GMST	Greenwich Mean Sideral Time	Tiempo Sidéreo Medio en Greenwich
GNSS	Global Navigation Satellite System	Sistema Global de Navegación por Satélite
IAU	International Astronomical Union	Unión Astronómica Internacional
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service	Servicio Internacional de Rotación terrestre y Sistemas de Referencias
IGN	Instituto Geográfico Nacional	
INTI	Instituto Nacional de Tecnología Industrial	
LAST	Local Apparent Sideral Time	Tiempo Sidéreo Aparente Local
LMST	Local Mean Sideral Time	Tiempo Sidéreo Medio Local
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation	Amplificador de Microondas por Emisión Estimulada de Radiación
NTP	Network Time Protocol	Protocolo para Redes de Tiempo
ONBA	Observatorio Naval Buenos Aires	
PPP	Precise Point Positioning	Posicionamiento Puntual Preciso
SHN	Servicio de Hidrografía Naval	
SI	International Second	Segundo Internacional
TAI	International Atomic Time	Tiempo Atómico Internacional
TCB	Barycentric Coordinate Time	Tiempo Coordinado Baricéntrico
TCG	Geocentric Coordinate Time	Tiempo Coordinado Geocéntrico
TDB	Barycentric Dynamical Time	Tiempo Dinámico Baricéntrico
TT	Terrestrial Time	Tiempo Terrestre
UNC	Universidad Nacional de Córdoba	

## CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE TIEMPO

UNLP	Universidad Nacional de La Plata	
UT	Universal Time	Tiempo Universal (y subtipos UT0, UT1 y UT2)
UTC	Coordinated Universal Time	Tiempo Universal Coordinado
VLBI	Very Long Baseline Interferometry	Interferometría de Muy larga Línea de Base

## 1.1. La medición del tiempo en la geodesia

En la actualidad, el tiempo se puede medir con una precisión relativa de  $10^{-15}$  o mejor, lo que lo convierte en la cantidad mensurable más precisa que existe y en la base para medir, con elevadísima precisión, otras cantidades que se derivan de ella. La tecnología que lo hace posible es la de los relojes atómicos, cuyos primeros predecesores experimentales datan de los años cincuenta del siglo pasado. Poco después comenzaron a fabricarse relojes atómicos comerciales, primero para satisfacer requerimientos militares y poco tiempo después para aplicaciones civiles.

La determinación precisa del tiempo, o en muchos casos de la duración de intervalos temporales, ha jugado y sigue jugando un rol trascendente en la geodesia. El tiempo determina una de las coordenadas que definen la orientación de la Tierra en el espacio. Sin la capacidad de medirlo con exactitud no sería posible estudiar las irregularidades de la rotación terrestre. Tampoco se podrían vincular objetos naturales (la Luna, el Sol, los planetas, las estrellas de la galaxia, etc.) o artificiales (satélites) con puntos de la Tierra. Ello impediría la navegación precisa sobre o cerca de la Tierra o en el espacio profundo. No podrían vincularse las predicciones de las ecuaciones dinámicas de la mecánica celeste —que se formulan en el espacio inercial y el tiempo uniforme— con las mediciones experimentales. Tampoco serían posibles las mediciones precisas de distancias que hoy se hacen, casi sin excepción, de manera indirecta midiendo el tiempo de viaje de señales electromagnéticas. Y tampoco sería viable la técnica VLBI (Interferometría de Muy Larga Línea de Base) —la única que vincula los sistemas terrestre y celeste— que se basa en la interferometría de señales provenientes de cuásares observadas en dos o más radiotelescopios distantes uno del otro.

Muchas otras actividades humanas dependen de una determinación precisa y confiable del tiempo, por ejemplo: telecomunicaciones (sincronización e interconexión de redes, medición de parámetros que inciden en pérdida de información por deslizamientos —*jitters*—, determinación de retardos en transmisión, tarifación de servicios comerciales y control, etc.); sistemas de navegación electrónicos; producción y distribución de energía eléctrica (control del sistema de distribución en redes de energía, sistemas de detección de fallas, tarifación, etc.); seguridad y sector militar (sistemas de radar, seguimiento de misiles, teledetección, etc.); firma digital (la infraestructura de

firma digital necesita hora y fecha); emisiones de radio y televisión (emisión de señales en las frecuencias asignadas y sincronización entre las diferentes estaciones); computación (sincronización de redes); sistemas de navegación celeste (los barcos, aeronaves y astronaves necesitan de señales horarias y de frecuencia para determinar su ubicación exacta); metrología (calibración de equipos que usen bases de tiempo tales como osciloscopios, generadores, contadores, cronómetros, tacómetros, etc.); ciencia (determinación de eventos astronómicos, determinación de la velocidad de rotación de la Tierra, mediciones electrónicas de distancias y de tensión eléctrica, mediciones ópticas, tiempos de respuesta de fenómenos físico-químicos, VLBI, sincronización de estaciones sismológicas, prospección gravimétrica, movimiento glacial, climatología, etc.); industria electrónica (medición de parámetros de respuesta en tiempo de dispositivos electrónicos, desarrollo de sistemas electrónicos, determinación de intervalos de tiempo con alta exactitud, sincronización de redes de transmisión de datos, diseño de sistemas basados en osciladores, uso de sistemas de posicionamiento por satélite, calibración de equipos que utilizan referencias de tiempo y/o frecuencia, etc.); industria aeronáutica (sistemas de posicionamiento y control); industria petrolera (tareas de automatización en exploración y explotación); industria relojera (aseguramiento de la calidad en producción de relojes y cronómetros); industria musical (afinación de instrumentos musicales); medicina (calibración de equipos de prueba y monitoreo de señales fisiológicas); cronometraje deportivo (control de tiempos en deporte de alta competencia); etc.

## 1.2. Tiempo y frecuencia

Un estándar de frecuencia es un dispositivo capaz de generar una señal periódica con una frecuencia,  $f$ , conocida y estable, con una exactitud bien definida. A partir de este dispositivo se puede derivar la duración de cualquier intervalo de tiempo contando los ciclos de la señal ocurridos durante ese intervalo:

$$\Delta t = t - t_0 = \frac{\varphi - \varphi_0}{2\pi f}, \quad (1.1)$$

en la que  $\varphi$  y  $\varphi_0$  es la fase de la señal en los instantes  $t$  y  $t_0$  y  $\varphi - \varphi_0$  es la cantidad de ciclos ocurrido en el intervalo  $\Delta t = t - t_0$ . La fase es una cantidad sin dimensiones, de modo que si la frecuencia se mide en Hertz [Hz], el intervalo temporal resulta en segundos [s]. Un estándar con una precisión relativa en frecuencia  $\delta f/f$  puede determinar un intervalo  $\Delta t$  con un error  $\delta \Delta t = \Delta t \times (\delta f/f)$ . La precisión relativa de los estándares de frecuencia ha mejorado (Figs. 1.1 y 1.2) desde los relojes mecánicos de péndulo ( $f \sim 10$  Hz), pasando por los de cristal de cuarzo ( $f \sim 10^3 - 10^8$  Hz) y los atómicos de microondas ( $f \sim 10^8 - 10^{10}$  Hz), hasta los actuales ópticos de haz láser ( $f \sim 10^{15}$ ). Un estándar cuya precisión relativa es  $10^{-15}$  es capaz de garantizar el segundo en un intervalo de  $10^{15}$  segundos, lo que equivale a algo más de 30 millones de años.

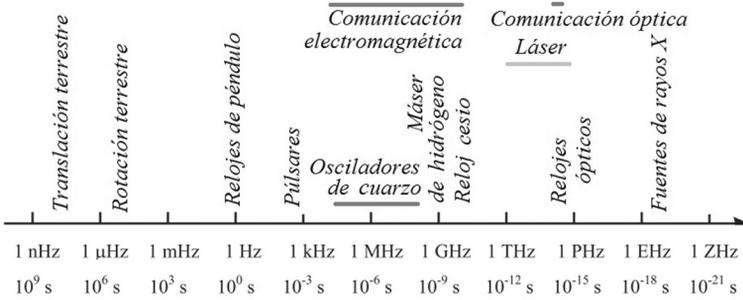


Figura 1.1. Frecuencias e intervalos temporales asociados.

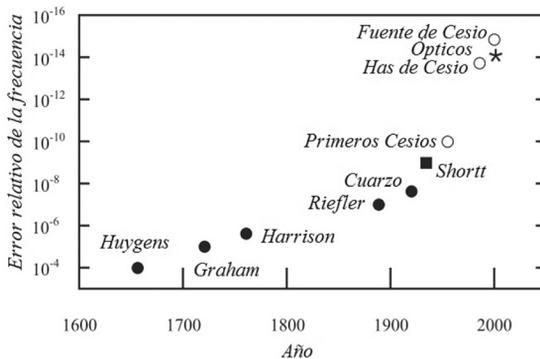


Figura 1.2. Evolución de la precisión relativa de los estándares de frecuencia (los círculos llenos representan diferentes relojes mecánicos de péndulo). Adaptado de Riehle, 2004.

La Figura 1.3 presenta una visión intuitiva de las principales propiedades estadísticas que caracterizan a un estándar de frecuencia: la exactitud, la precisión y la estabilidad temporal. La parte superior de la Figura muestra los impactos en el blanco de una sucesión de disparos realizados por cuatro tiradores diferentes; la parte inferior muestra la evolución temporal de la frecuencia de cuatros estándares diferentes; cada Figura superior está asociada con la correspondiente Figura inferior. Las propiedades que caracterizan cada caso son: a) exactitud, precisión y estabilidad altas; b) exactitud y estabilidad alta, pero precisión baja; c) precisión y estabilidad altas pero exactitud baja; y d) exactitud, precisión y estabilidad bajas.

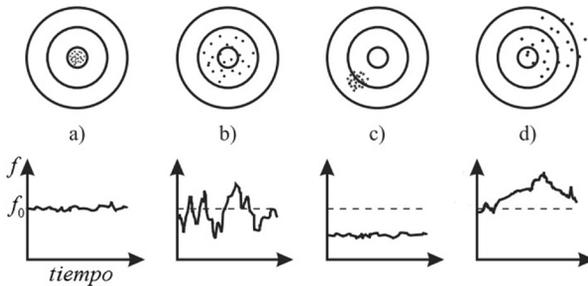


Figura 1.3. Representación intuitiva de la exactitud, precisión y estabilidad temporal de un estándar de frecuencia. Adaptado de Riehle, 2004.

En la analogía entre el blanco y el estándar de frecuencia, el centro del blanco juega el papel de la frecuencia nominal del estándar. Ese valor solo es conocido si la frecuencia de un dispositivo se compara contra la de otro cuyas propiedades estadísticas son mejores, más allá de cualquier margen de duda. Cuando no se dispone de un valor de referencia comprobado, las únicas propiedades estadísticas que pueden verificarse experimentalmente son la precisión y la estabilidad temporal. La analogía en este caso sería la de quitar las marcas que señalan el punto central del blanco: solo sería posible decir que los tiradores (a) y (c) son mejores que (b) y (d), pero no sería posible discernir que (a) es mejor que (b). Usando terminología estadística: los tiradores (a) y (c) son más precisos que los tiradores (b) y (d), aunque nada puede decirse sobre la exactitud de los diferentes tiradores.

Se entiende por precisión de una cantidad medida,  $y_i$ , ( $i = 1, \dots, N$  y  $N =$  cantidad de valores medidos) al grado de acuerdo mutuo entre

los valores medidos, cuantificado frecuentemente (aunque no necesariamente) por la varianza  $\sigma^2$ , o el desvío estándar de las mediciones,  $\sigma$ , con respecto a su valor medio,  $\mu$ :

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (1.2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu)^2. \quad (1.3)$$

Si se asume que la única causa que hace que las mediciones de la serie difieran entre sí son los errores de medición; y se supone además que dichos errores tienen un comportamiento estadístico caracterizado por la distribución de Gauss, es esperable que el 68.2 % de los valores medidos se agrupen dentro del intervalo  $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ ; el 95.4 % dentro del intervalo  $(\mu - 2 \times \sigma, \mu + 2 \times \sigma)$  y el 99.7 % dentro del intervalo  $(\mu - 3 \times \sigma, \mu + 3 \times \sigma)$ .

Frecuentemente, las diferencias entre las mediciones de una serie son engendradas por la superposición de errores de medición y errores sistemáticos. En tal caso, las medidas de la serie estarán correlacionadas entre sí, queriendo decir con ello que sus desvíos con respecto al valor medio no están regidos por el puro azar, como ocurriría si la única fuente de error fueran los de medición, sino por cierta ley desconocida o mal modelada por el marco teórico con que se analizan las mediciones. Los estándares de tiempo y frecuencia no están exentos de errores sistemáticos y para tomar en cuenta la correlación que estos introducen en las series temporales de sus mediciones, el físico estadounidense David Allan propuso el uso de la varianza que lleva su nombre. Para definirla, considérese un estándar cuya frecuencia nominal es  $f_0$ , (por ejemplo, para un estándar de cesio se tendría  $f_0 = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ ) y supóngase que se realizan  $N+1$  mediciones de la frecuencia, las que arrojan los valores  $f(t), f(t + \delta t), f(t + 2\delta t), \dots, f(t + N\delta t)$ , en donde  $t$  es el instante de la primera medición y  $\delta t$  el intervalo de muestreo. A partir de ellas se pueden calcular los errores relativos,  $\varepsilon(t + l \cdot \delta t) = (f(t + l \cdot \delta t) - f(t)) / f_0$ , con  $l = 0, \dots, N$  y, a continuación, las diferencias entre pares de errores relativos separados por diferentes intervalos temporales. Por ejemplo, para una separación temporal igual al intervalo de muestreo se obtendrá la serie de valores:

$$\begin{aligned}\Delta_1(\delta t) &= \varepsilon(t) - \varepsilon(t + \delta t), \\ \Delta_2(\delta t) &= \varepsilon(t + \delta t) - \varepsilon(t + 2\delta t), \\ &\dots, \\ \Delta_N(\delta t) &= \varepsilon(t + N\delta t) - \varepsilon(t + (N-1)\delta t)\end{aligned}$$

y en general, para una separación temporal igual a  $\tau = m \times \delta t$ , se obtendrá la serie de valores:

$$\begin{aligned}\Delta_1(\tau) &= \varepsilon(t) - \varepsilon(t + m \cdot \delta t), \\ \Delta_2(\tau) &= \varepsilon(t + \delta t) - \varepsilon(t + (m+1) \cdot \delta t), \\ &\dots, \\ \Delta_{N-m}(\tau) &= \varepsilon(t + (N-m) \cdot \delta t) - \varepsilon(t + (N-1)\delta t)\end{aligned}$$

Asumiendo que  $N - m \gg 0$ , la varianza de Allan se define:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} [\Delta_i(\tau)]^2, \text{ con } \tau = m \times \delta t \quad (1.4)$$

La Figura 1.4 muestra la dependencia de la raíz cuadrada de la varianza de Allan (desvío de Allan) con el intervalo de promedio  $\tau$  para diferentes estándares. Para facilitar su interpretación, compararemos los comportamientos del cesio (cuadrados grandes y pequeños) y del MASER (línea de trazos): puede verse que la estabilidad en frecuencia del MASER es mejor que la del cesio (hasta dos órdenes de magnitud) para intervalos temporales cortos, de entre 1 y 1000 segundos; pero que a para intervalos más largos, la estabilidad del MASER comienza a desmejorar y, aunque la figura no lo muestre, más allá de pocos días, la estabilidad del cesio supera a la del MASER. Esta es la razón por la cual patrones MASER y cesio suelen complementarse en laboratorios de tiempo: los primeros proporcionan estabilidad en intervalos cortos, mientras que los segundos lo hacen en el largo plazo.

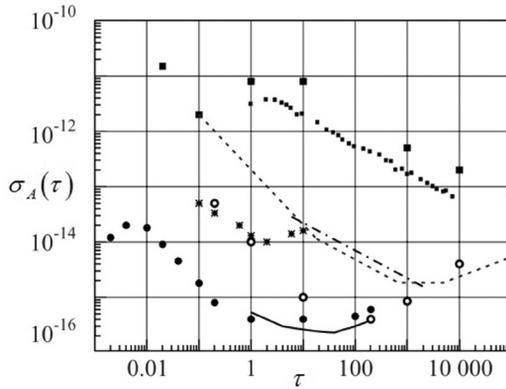


Figura 1.4. Representación de la raíz cuadrada de la varianza de Allan en función del intervalo temporal  $\tau$ , para diferentes estándares de frecuencia: cesio (cuadrados grandes y pequeños); MASER de hidrógeno (línea de trazos); fuente de cesio (línea de trazos y puntos); cavidad de microondas con oscilador de Zafiro (línea gruesa); cavidad superconductora (círculos abiertos); laser estabilizado con calcio (asteriscos); laser estabilizado con una cavidad Fabry-Pérot (círculos llenos). Adaptado de Riehle, 2004.

### 1.3. Evolución de los estándares de tiempo y frecuencia

Los primeros calendarios se basaron en la rotación de la Tierra alrededor de sí misma (día), en su traslación alrededor del Sol (año) y en la traslación de la Luna alrededor de la Tierra (mes). El establecimiento de un calendario definitivo fue relativamente complicado a causa de que ni el año ni el mes tienen una cantidad entera de días (hay 365,2422 días en un año tropical y 29,5306 en un mes sinódico). La forma actual fue introducida por el emperador romano Julio César en el año 45 D. C. Las mayores deficiencias de los estándares de frecuencia basados en movimientos siderales son las irregularidades de los movimientos de los astros que no pueden corregirse y redundan en una escala de tiempo no uniforme.

Como el día es una unidad excesivamente grande para la mayoría de las aplicaciones prácticas, se fabricaron relojes para fraccionarlo en una unidad más apropiada: el segundo. Hasta el final de la Edad Media los relojes se basaron en la sombra proyectada por el Sol o en el agua o la arena escurriéndose por un pequeño orificio. El

primer salto tecnológico lo constituyeron los relojes mecánicos basados en la oscilación regular de un péndulo. El mecanismo de esos dispositivos cumple dos funciones complementarias: por un lado, medir la frecuencia del oscilador, contar los ciclos transcurridos y visualizar el tiempo; y por otro, restaurar la energía que el sistema oscilante disipa a su entorno. Hacia comienzos del siglo XIV, las torres de muchas catedrales italianas lucían relojes en los que el mecanismo oscilante era conocido como *verge-and-foliot*, consistente en una especie de péndulo de torsión, y la energía restauradora la proporcionaba un contrapeso cargado con energía potencial del campo gravitatorio terrestre. Se cree que su exactitud rondaba el cuarto de hora diaria, lo que supone una precisión relativa en la frecuencia  $\delta f/f = 10^{-2}$ .

La fabricación de relojes de péndulo se basa en una observación atribuida al científico italiano Galileo Galilei (1564-1642), quien notó que, para una excursión pequeña, el período de oscilación de un péndulo no depende de la excursión sino de la longitud del péndulo. Ese principio fue aprovechado por el físico holandés Christian Huygens (1629-1695), a quien se atribuye la construcción del primer reloj de péndulo de alta calidad, en el año 1656. Se cree que la exactitud de los primeros relojes rondaba el minuto por día y que mejoró hasta 10 segundos por día ( $\delta f/f = 10^{-4}$ ). En 1721, el relojero británico George Graham (1673-1751) agregó un sistema que compensaba las variaciones inducidas en la longitud del péndulo por las fluctuaciones de la temperatura, lo cual llevó la exactitud a un segundo por día ( $\delta f/f = 10^{-5}$ ). Orientado principalmente por la necesidad de mejorar la determinación de la longitud en el mar, el relojero británico John Harrison (1693-1776) construyó una sucesión de relojes de exactitud creciente, que culminó en 1761 con el denominado H5. Basado en sistema de muelle y rueda alcanzó una exactitud de 2 décimos de segundo por día ( $\delta f/f = 2 \times 10^{-6}$ ), incluso a bordo de un buque en altamar.

Antes de ser reemplazados por una nueva tecnología, la exactitud de los relojes de péndulo experimentó otros dos saltos cuantitativos: a finales del siglo XIX, con los relojes fabricados por Riefler en Alemania, con una exactitud de un centésimo de segundo por día ( $\delta f/f = 10^{-7}$ ); y en 1920, con el fabricado por el relojero británico William Shortt, capaces de asegurar una exactitud mejor que un milésimo de segundo por día ( $\delta f/f = 10^{-8}$ ). Los relojes Shortt contaban con dos péndulos sincronizados: el maestro, que se movía dentro de un recinto en el que se había hecho el vacío; y el esclavo, que accionaba la relojería y se mantenía sincronizado con el maestro a través de un enlace electromagnético.

Hacia 1930, los estándares de frecuencia basados en cristales de cuarzo que oscilaban en aproximadamente 100 kHz y se utilizaban principalmente en equipos de radiofrecuencia comenzaron a competir con los relojes mecánicos. Un cristal de cuarzo tallado apropiadamente oscila mecánicamente en una frecuencia que depende de la forma de la talla y engendra, por efecto piezoeléctrico, una diferencia de potencial que fluctúa con la misma frecuencia de la oscilación mecánica. Una parte de esa diferencia de potencial se utiliza para mantener activa la oscilación mecánica. Este tipo de tecnología alcanza una exactitud de un milésimo de segundo por día ( $\delta f/f = 10^{-8}$ ).

Los relojes de péndulo Shortt habían sembrado la sospecha de que la rotación terrestre no constituía un estándar de frecuencia estable. Esa hipótesis se consolidó en 1936, cuando los astrónomos alemanes Udo Scheibe y Adolf Adelsberger, del *Physikalisch-Technische Reichsanstalt*, compararon la duración del día sideral determinada con relojes y mediante observaciones astronómicas para el periodo comprendido entre principio de 1934 y mediados de 1935 encontraron diferencias sistemáticas que solo podían explicarse por irregularidades en la velocidad angular de rotación terrestre. Ese hecho constituyó el punto de inflexión que trasladó la determinación del tiempo del ámbito de la astronomía al de la relojería.

Si se quisiera trazar una analogía entre los relojes mecánicos y los atómicos se podría decir que el rol del péndulo es asumido por un conjunto de átomos y el de la frecuencia de oscilación del péndulo por la frecuencia asociada con los cuantos que separan los diferentes estados energéticos de los átomos. La construcción del primer estándar atómico de frecuencia se sitúa en 1955 y se atribuye a los físicos británicos Louis Essen (1908-1997) y Jack Parry (1923-1995), del *National Physical Laboratory*. El primer reloj atómico comercial apareció en 1958 y en las décadas siguientes se multiplicaron los laboratorios equipados con estándares atómicos cuya precisión mejoró al ritmo de un orden de magnitud por década. Tales desarrollos condujeron a que la 13ª Conferencia General de Pesos y Medidas, celebrada en 1967, redefiniera el segundo como la duración de 9192631770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del cesio 133.

Existe actualmente una variedad de estándares atómicos de tiempo y frecuencia basados en diferentes propiedades físicas y tecnologías de implementación. En lo que sigue se describirán superficialmente los estándares de cesio y MASER de hidrógeno. Ambos

están basados en la radiación absorbida o emitida cuando se produce una transición entre dos niveles energéticos hiperfinos en los estados base de esos átomos. La pequeña diferencia de energía entre esos estados hiperfinos está asociada a cambios en el acoplamiento magnético electrón-átomo. La frecuencia de los fotones absorbidos cuando el átomo pasa del nivel de menor energía al de mayor energía, o de los fotones emitidos cuando se produce el proceso inverso, se halla en el rango de las microondas. Los niveles hiperfinos del cesio y del hidrógeno son muy estables, porque están poco perturbados por otras interacciones intra e interatómicas. La estabilidad en frecuencia, sumado al hecho de que la tecnología para manejar frecuencias en el rango de las microondas se halla muy bien desarrollada, hace que los átomos de cesio e hidrógeno sean elegidos para una gran cantidad de estándares de tiempo y frecuencia.

Los estándares atómicos pueden caracterizarse como “pasivos” o “activos”. Los del primer tipo (Figura 1.5) se basan en un dispositivo sensible a una determinada frecuencia  $f_0$ , que se usa como patrón. El dispositivo bien puede ser un sistema macroscópico, como una cavidad resonante, o uno microscópico, como un conjunto de átomos. Ese dispositivo se irradia con una señal electromagnética de frecuencia  $f$  generada por un oscilador. Si la frecuencia es suficientemente cercana a la de resonancia, el dispositivo interactúa con la señal y absorbe parte de su energía. Ello engendra una señal de absorción,  $I$ , que se convierte en una señal de realimentación,  $S$ , que se usa para mantener al oscilador sintonizado en la frecuencia de resonancia del dispositivo. Los estándares de cesio y rubidio son ejemplos de este tipo.

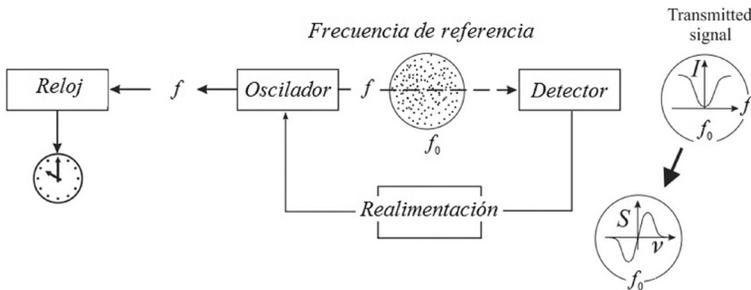


Figura 1.5. Esquema de un estándar pasivo.

Un estándar activo es aquel en el que la frecuencia patrón,  $f$ , es generada por un dispositivo determinado, por ejemplo, un conjunto de átomos excitados, cuya excitación se mantiene realimentándolos con una fracción de la radiación emitida por ellos mismos. Los MASER de hidrógeno y láser de helio-neón son ejemplos de este tipo.

Los relojes de cesio (Figura 1.6) son estándares pasivos. Calentándolo en un horno, el cesio se lleva del estado líquido al gaseoso y se permite que un haz de átomos escape con una velocidad preestablecida. El haz es conducido a través de un campo magnético, lo cual permite separar los átomos que se hallan en estado energético más alto de los que se hallan en el más bajo. Los de menor energía son irradiados con microondas de 3.26 cm generadas por un oscilador de cuarzo. Con ello se logra que una gran cantidad de átomos pasen del estado energético más bajo al más alto. Otro campo magnético permite seleccionar a los de mayor energía, que ahora son conducidos hacia un alambre caliente. El choque con el alambre provoca la ionización de los átomos que quedan cargados positivamente. Un espectrómetro de masa separa los átomos de cesio ionizado de cualquier otra impureza y los conduce hacia un detector de partículas cargadas que genera una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de partículas incidentes. Esa corriente realimenta al oscilador de cuarzo, haciendo que su frecuencia se incremente o se reduzca, manteniéndola en resonancia con la frecuencia de excitación de los niveles hiperfinos del cesio.

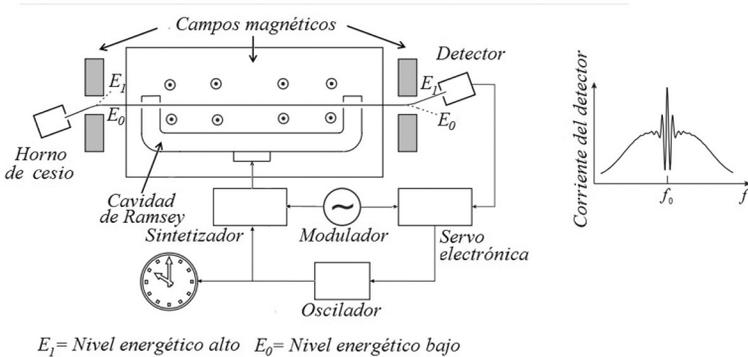


Figura 1.6. Representación esquemática de un estándar de haz de cesio.

Los relojes MASER de hidrógeno (Figura 1.7) son estándares activos. Al ser irradiados con radiofrecuencia, los átomos de hidrógeno contenidos en un receptáculo forman un haz que fluye hacia