

## La Nueva Definición para la Unidad de Tiempo del SI, el Segundo

La medición del tiempo es un parámetro muy importante que influye en diversos procesos como sistemas de telecomunicaciones, navegación, generación y distribución de energía eléctrica, física, metrología y otras actividades. Para efectos de sincronía es necesaria la generación de escalas de tiempo que sirvan como referencia común y accesible para las mediciones que permitan identificar el momento en que ocurren los eventos. La generación de escalas de tiempo representa para los países una referencia de alto valor estratégico para asegurar entre otras cosas que los niveles de sincronía nacionales son apropiados y para asegurar también que la sincronía de sus sistemas de comunicación nacionales en los enlaces internacionales son adecuados. De esta manera las escalas de tiempo representan la infraestructura fundamental que permite entre otras cosas que los sistemas de comunicación operen satisfactoriamente.

La escala de tiempo que está estrechamente relacionada con la hora del día es el llamado Tiempo Universal Coordinado (UTC). El BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) es el organismo encargado de generar el UTC. Para ello el BIPM recibe información de más de 80 laboratorios alrededor del mundo que participan en el envío de datos de sus escalas de tiempo UTC locales en donde viene participando nuestro país, Perú, desde el 2017. El número de relojes atómicos que contribuyen al UTC es reducido, menor a diez, mientras que la continuidad y la estabilidad del UTC se sustentan por la contribución de los diversos relojes atómicos que operan en los laboratorios participantes. Es importante indicar que el UTC es una escala de tiempo virtual. La escala UTC es la referencia para definir los husos horarios locales en función de la posición geográfica, por ejemplo en el caso de Perú le corresponde el tiempo UTC - 5 horas.



Fig. 1: El reloj atómico FOCS 1 de fuente de cesio frío continuo en Suiza que comenzó a funcionar en 2004 con una incertidumbre de un segundo en 30 millones de años.

La unidad de tiempo del Sistema Internacional (SI) de unidades es el segundo, el cual se define actualmente como la duración de 9 192 631 770 (nueve mil ciento noventa y dos millones seiscientos treinta y un mil setecientos setenta) periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio 133. En su reunión de 1997, el CIPM confirmó que esta definición se refiere a un átomo de cesio en reposo, a una temperatura de 0 K .

La incertidumbre correspondiente a la realización de la unidad de tiempo del SI, hecha a través de relojes primarios de Cesio, mejora a razón de un orden de magnitud por década. Actualmente la mejor realización del segundo del SI obtenida con gas ultra frío de Cesio 133 en las llamadas fuentes atómicas tiene una incertidumbre de  $1,1 \times 10^{-16}$ . Razón por lo cual la definición actual del segundo no cambiará sino que solo se rescribirá y la única diferencia radica en que las condiciones en las que se realizan las mediciones se hacen más rigurosas.

La definición propuesta para entrar en vigencia a partir del año 2018 es la siguiente:

El segundo, símbolo s, es la unidad de tiempo del SI. Se define asignando el valor numérico fijo de 9 192 631 770 cuando se expresa en Hertz (que es igual a  $s^{-1}$ ) a la frecuencia del cesio  $\Delta\nu_{Cs}$ , correspondiente a la frecuencia de transición hiperfina en el estado fundamental no perturbado del átomo de Cesio 133 .

El efecto de esta definición es que el segundo es igual a la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de  $^{133}Cs$ .

Según el "Draft of the Ninth SI Brochure" del 11 de Diciembre del 2015:

- a) La referencia a un átomo no perturbado pretende aclarar que la definición del segundo del SI se basa en un átomo de cesio no perturbado por ningún campo externo, como la radiación ambiente de cuerpo negro.
- b) El segundo así definido es la unidad del tiempo propio en el sentido de la teoría general de la relatividad. Para la provisión de una escala de tiempo coordinada, se combinan las señales de diferentes relojes primarios en diferentes ubicaciones, que deben corregirse por los corrimientos relativistas de frecuencia del cesio.
- c) El CIPM ha adoptado varias representaciones secundarias del segundo, basadas en un número seleccionado de líneas espectrales de átomos, iones o moléculas. Las frecuencias no perturbadas de estas líneas pueden determinarse con una incertidumbre relativa no inferior a la de la definición del segundo basado en la transición hiperfina del  $^{133}Cs$ , pero algunos pueden reproducirse con una estabilidad superior.

Por otro lado si bien las necesidades industriales están satisfechas con la actual definición de la unidad de tiempo, aparecen diferentes aplicaciones que demandan reformular la definición del segundo. Entre éstas se encuentran las necesidades asociadas al desarrollo de nuevas tecnologías como la geodesia relativista y comunicaciones ultra rápidas, la metrología primaria que tiene la necesidad intrínseca de sustentar la definición de las unidades de base precisamente en la frontera de la ciencia y la tecnología. Por otro lado, los patrones de frecuencia óptica han evolucionado con mayor rapidez, a saber, a razón de 2 órdenes de magnitud por década. Actualmente la estimación de incertidumbre relativa en relojes atómicos ópticos de Estroncio 87 es de  $2,1 \times 10^{-18}$ . A la fecha alrededor de una docena de mediciones de diferentes transiciones ópticas han sido reportadas y adoptadas por el Comité Internacional de Pesos y Medias (CIPM) como representaciones

secundarias de la unidad de tiempo. Las incertidumbres relativas en dichas mediciones van desde  $2,1 \times 10^{-18}$  hasta  $4,2 \times 10^{-15}$ .

Entre los beneficios de una nueva definición de la unidad de tiempo se encuentra la generación de escalas de tiempo, particularmente la escala UTC, cuya estabilidad se verá mejorada por la participación de un número creciente de patrones primarios de frecuencia ópticos de mayor estabilidad y mejor exactitud. Sin embargo, la adopción de una nueva definición para el segundo del SI debe darse bajo ciertas condiciones mínimas en cuanto al desarrollo, madurez y número de relojes atómicos ópticos operados en los Institutos Nacionales de Metrología (NMIs).

De acuerdo a lo indicado hay ventajas significativas en un amplio rango de aplicaciones como consecuencia de adoptar en el año 2018 una nueva definición del segundo en el SI. En particular en la exactitud y la estabilidad de la escala de tiempo UTC.

Los relojes atómicos ópticos son la próxima generación de relojes atómicos. Actualmente, todavía están en la etapa de desarrollo. En el caso de los relojes atómicos de hoy en día, la frecuencia del reloj se encuentra en el rango de las microondas, y los átomos de cesio se utilizan generalmente como referencia. En el caso de los relojes ópticos, la frecuencia del reloj es más de 10 000 veces mayor (100 THz a 1000 THz) y se encuentra, por lo tanto, en el rango espectral óptico. Debido a este hecho, su exactitud, que puede lograrse luego de promedios claramente más cortos, es de aproximadamente 100 veces mejor. Existen diferentes variantes, con diferentes átomos de referencia o iones de referencia, para los que se han utilizado diferentes tecnologías y que, por lo tanto, también tienen diferentes ventajas y desventajas. Sin embargo, ningún tipo especial se ha establecido hasta ahora. Pero la carrera para encontrar el mejor reloj del futuro ya comenzó.

## **REFERENCIAS**

[1 ] Hacia una nueva definición de la unidad del tiempo del SI. J.M. Lopez, E. de Carlos, C.A. Ortiz y R. Gutierrez (CENAM y CINVESTAK). Memorias del simposio de metrología 2016 – CENAM.

[2] Draft of the Ninth SI Brochure” del 11 de Diciembre del 2015