

LA UNIDAD DE TIEMPO Y EL SI

J. Mauricio López-Romero
Centro Nacional de Metrología, División de Tiempo y Frecuencia
km 4.5 Carretera a los Cués, El Marqués, Qro., México, C.P. 76241
jlopez@cenam.mx

Resumen

El segundo es la unidad del SI que se realiza con la menor incertidumbre, actualmente del orden de partes en 10^{16} , esto hace que exista una cierta tendencia para utilizar esta unidad como soporte en mediciones de muy alta exactitud en diversos campos de la metrología. Un claro ejemplo de esta tendencia se encuentra en la definición de la unidad de longitud, la cual está en términos de la velocidad de la luz y de medición de tiempo. La reproducción de algunas unidades derivadas del SI, que dicho sea de paso, tienen un fuerte impacto en la actividad industrial, es también sustentada, de alguna forma, en la unidad de tiempo, éste es el caso de las unidades de tensión eléctrica e intensidad de flujo magnético, entre otras. El reciente desarrollo de los peines de frecuencia hacen más cercana la posibilidad de que en el futuro próximo la unidad de tiempo, definida en términos de una transición óptica, se realice con una incertidumbre del orden de partes en 10^{18} .

1. INTRODUCCIÓN

La medición de tiempo es tan antigua como la propia existencia de la humanidad. Las observaciones astronómicas han sido la forma clásica de medir el paso del tiempo, siendo utilizado este método desde las civilizaciones más antiguas hasta la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, fue hasta 1967 que la unidad de tiempo fue definida en términos, ya no astronómicos, sino más bien, atómicos. La unidad de tiempo, el segundo, fue definida en términos de una de las líneas de absorción del átomo de Cesio-133 [1]. De esta manera una larga tradición de medición de tiempo sustentada en observaciones astronómicas daba paso a una definición enmarcada en una joven y exitosa rama de la física, la Mecánica Cuántica. Con la nueva definición se pusieron las bases para que la unidad de tiempo tuviera una mejora inmediata en su realización en dos órdenes de magnitud. La definición en términos astronómicos brindaba la oportunidad de realizar la unidad con una incertidumbre de partes en 10^{10} , mientras que la definición en términos del Cs-133 lo hacía en partes en 10^{12} . A partir de entonces la mejora en la realización de la unidad avanza, muy cercanamente, un orden de magnitud cada diez años. Durante la década de los años 70s el estado del arte permitía que la unidad de tiempo fuera realizada con incertidumbres del orden de partes en 10^{13} [2], en los 80s en partes en 10^{14} [3], para la década de los 90s la realización de la unidad de tiempo había avanzado al nivel de partes en 10^{15} [4]. Con el advenimiento de las técnicas de manipulación de

átomos con luz [5], el estado del arte ha evolucionado a una posición en la que, en la primer década del siglo XXI, la realización de la unidad de tiempo empieza ya alcanzar la región de partes en 10^{16} [6]. De continuar esta tendencia, en 20 años la realización de la unidad estará al nivel de partes en 10^{18} . Esta capacidad de medición requerirá de la consideración de efectos que por ahora son despreciados debido a que su contribución es menor que las incertidumbres de medición. Ejemplo de esto son los efectos relativistas inducidos por diferencias de alturas en la vecindad de la superficie terrestre, donde la dilatación del tiempo es de 1 parte en 10^{18} por cada centímetro en la dirección vertical. Con esa capacidad de medición será posible establecer cotas más estrechas a posibles variaciones en el tiempo de algunas constantes fundamentales [7], como la constante de estructura fina [8]. En los próximos 20 años razonablemente se puede esperar una eventual redefinición de la unidad de tiempo, la cual, muy probablemente, estará en términos de una transición atómica mucho más energética, en la región visible del espectro electromagnético, con anchos de línea del orden de los Hertz. De esta forma el factor de calidad Q de las transiciones involucradas en la definición podría pasar del orden de 10^{10} a 10^{15} .

La rapidez con la que evoluciona la capacidad de medición de tiempo no es observada en ninguna otra magnitud. Actualmente las aplicaciones de la medición de tiempo son numerosas, desde la investigación básica hasta las aplicaciones que impactan las actividades cotidianas. En general, la

sociedad en su conjunto es cada vez más dependiente de la medición del tiempo. Es interesante notar que la medición de tiempo es hasta ahora la mejor medición realizada por la humanidad, así, un intervalo de tiempo puede ser medido con dieciséis dígitos significativos después del punto decimal. No se espera que en el futuro cercano alguna otra unidad sea medida con este nivel de incertidumbre.

El alto nivel de exactitud en la medición de tiempo introduce un factor de motivación para que mediciones en diversos campos de la metrología sean apoyadas en la unidad de tiempo. De hecho, el Sistema Internacional de unidades (SI) ha evolucionado a un punto en el que la mayoría las unidades base y derivadas son de alguna manera dependientes, ya sea en su definición o en su realización, de la unidad de tiempo.

2. LA UNIDAD DE TIEMPO DEL SI

La resolución número 1 de la 13ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) celebrada en octubre de 1967, establece que:

Un segundo es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación asociada a la transición hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133.

A los artefactos que realizan experimentalmente esta definición se les suele llamar relojes atómicos. La definición del segundo está enmarcada en la teoría más exitosa de la física, la Mecánica Cuántica. De acuerdo con la Mecánica Cuántica un mismo objeto puede presentar un comportamiento ondulatorio o corpuscular dependiendo del tipo de experimento que se realice con él. El comportamiento corpuscular de los objetos en la Mecánica Cuántica se describe de manera apropiada en términos de energía E , mientras que el comportamiento ondulatorio se describe por medio de frecuencia ν . La energía y la frecuencia asociadas a estas dos manifestaciones están relacionadas por la ecuación de Planck, a saber, $E = h\nu$, donde $h = 6.626\ 0693(11) \times 10^{-34}$ J s es la constante de Planck.

En el modelo atómico de Bohr el átomo se entiende como formado por un núcleo con carga eléctrica positiva que concentra la mayor parte de la masa y electrones ligados por efecto de la fuerza eléctrica que ocupan órbitas de energía bien definida. Por el

principio de la conservación de la energía, un electrón pasa de una órbita a otra cediendo o recibiendo la cantidad de energía necesaria, según sea el caso. Dicha energía puede ser suministrada en forma de radiación electromagnética. Sin embargo, el tratamiento enteramente cuántico (y no semiclásico como en el modelo de Bohr), para el átomo y para el campo electromagnético, requiere de la consideración de la partícula asociada al campo electromagnético, el fotón, concepto que por cierto fue introducido en 1905 por primera vez por Albert Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico, ésta tiene asociados números cuánticos con leyes de conservación para la carga eléctrica (que es nula), momento angular $s=1$, momento lineal $\mathbf{p}=\hbar\mathbf{k}$ (\mathbf{k} es el vector de onda de su comportamiento ondulatorio) y energía $E=h\nu$. Para el átomo, cuya dinámica está descrita por la ecuación de Schrödinger, el tratamiento cuántico revela que las transiciones atómicas permitidas tienen una pequeña dispersión de energías, ΔE , que obedece al principio de incertidumbre de Heisenberg. Este principio puede ser representado matemáticamente, para el caso de tiempo y energía, como: $\Delta E\Delta t \geq \hbar/2$, donde Δt es el tiempo de vida del estado excitado y \hbar es la constante de Planck dividida por 2π . El principio de incertidumbre de Heisenberg tiene profundas repercusiones en la realización de la unidad de tiempo. Por un lado, en el caso en el que $\Delta t \rightarrow \infty$, la relación de incertidumbre de Heisenberg implica que la dispersión en energía debe tender a cero, esto es $\Delta E \rightarrow 0$, de tal forma que el producto $\Delta E\Delta t$ se mantenga no menor a $\hbar/2$. En 1950, Norman F. Ramsey introdujo la técnica de espectroscopia molecular con campos oscilantes separados la cual permite trabajar en el límite de la igualdad del principio de incertidumbre de Heisenberg, contribución que en 1987 le valió el Premio Nobel de Física [9]. Por otro lado, debido a que los sistemas físicos tienden a estar en su estado de mínima energía (o estado base), los estados excitados tienen tiempos de vida finitos, los cuales pueden ser tan cortos como unos cuantos nanosegundos, o tan largos como 32 mil años, esto último es el caso del nivel hiperfino alto del estado base del átomo de Cesio-133. Por regla general, el tiempo de vida del estado excitado decrece a medida que la energía del estado excitado aumenta. En experimentos de espectroscopia, la dispersión de energías en la relación de incertidumbre de Heisenberg está determinada por el menor de los siguientes tiempos: el tiempo de vida del estado excitado o el tiempo de interacción del átomo con la

radiación electromagnética. Para el caso de la realización de la unidad de tiempo del SI, la limitante es el tiempo de interacción del átomo con las microondas.

En el contexto del principio de incertidumbre de Heisenberg, las dispersiones de energía que intervienen en la realización de la unidad de tiempo del SI pueden ser minimizadas siguiendo dos alternativas. Mencionaremos éstas en el orden histórico de aparición. La primera consiste en el diseño de relojes atómicos con dimensiones espacialmente grandes con el objeto de que el tiempo de interacción Δt entre los átomos (que forman un haz) y las microondas fuera lo más grande posible [10], obteniendo tiempos de interacción del orden de decenas de milisegundos. Esta técnica permite obtener anchos de línea, en el mejor de los casos, cercanos a 70 Hz. La segunda alternativa es utilizar átomos de Cesio en condiciones de movimiento muy próximas al reposo absoluto [11]. Este último caso ofrece mayores ventajas en la realización de la unidad. La idea importante en esta aproximación es muy sencilla: utilizar átomos cuya velocidad térmica sea muy baja (del orden de 10^{-3} m/s). El tiempo de interacción de los átomos con las microondas se incrementa proporcionalmente cuando la velocidad de los átomos disminuye, reduciendo así la dispersión de la energía, y por lo tanto reduciendo también la incertidumbre en la reproducción de la unidad de tiempo. Esta idea fue introducida por primera vez por J. Zacharias en 1953, quién diseñó un experimento siguiendo estos principios, sin embargo no obtuvo los resultados esperados ya que no contaba con la tecnología adecuada para producir átomos suficientemente lentos (o fríos).

Existe una relación entre la energía cinética promedio de las partículas de un cuerpo y la temperatura termodinámica del mismo: el principio de equipartición de la energía. Este principio relaciona la energía cinética E promedio de cada partícula con la temperatura T a través de una constante k ($k = 1.380\ 6505(24) \times 10^{-23}$ JK⁻¹, constante de Boltzmann), de manera que, por cada grado de libertad espacial, se tiene $E = kT/2$. En este contexto, una de las predicciones de la Mecánica Cuántica se relaciona con la imposibilidad de que un cuerpo alcance el cero absoluto. En el supuesto de que un cuerpo se encuentre a cero Kelvin los átomos que lo componen, de acuerdo al principio de equipartición de la energía, estarían en reposo absoluto. Esta condición, en términos de la

relación de incertidumbre de Heisenberg para las variables conjugadas de posición x y momento p , $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, implicaría que $\Delta x=0$ por lo que necesariamente $\Delta p \rightarrow \infty$, lo que deja de tener sentido físicamente. Sin embargo, el formalismo de la Mecánica Cuántica sí permite la aproximación asintótica al cero absoluto. En condiciones normales de temperatura, los átomos (o moléculas) en un gas se mueven a velocidades del orden de varios cientos de metros por segundo. Pero a temperaturas tan bajas como 1 millonésima de Kelvin sobre el cero absoluto se mueven a velocidades del orden de los milímetros por segundo. Es interesante notar que la temperatura promedio del universo es de 3 K (justamente relacionada con la radiación de fondo, un remanente del Big Bang), por lo que, en el universo hasta ahora conocido, no existen las condiciones naturales para producir temperaturas de 1 μ K, o menores. Técnicas recientemente desarrolladas de manipulación de átomos con luz han abierto la posibilidad de obtener temperaturas de 1 μ K, o menores. Los principios físicos que están detrás de estos experimentos se relacionan con la transferencia de momento lineal de fotones a átomos acompañados por efecto Doppler y con procesos de bombeo óptico en presencia de efecto Stark el cual aparece por la presencia de gradientes de polarización en ondas estacionarias producidas con láseres estabilizados [12]. Bajo tales condiciones extremas de temperatura es posible llevar a cabo experimentos en donde la radiación electromagnética, en resonancia con la transición hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133, interactúe con los átomos durante un tiempo del orden de un segundo con lo que se obtienen dispersiones en frecuencia, de acuerdo al principio de Heisenberg, del orden de 1 Hz [13]. Estos experimentos, realizados con éxito por primera vez a inicios de la década de los 90s [14], llevaron al terreno práctico las ideas primeramente propuestas por J. Zacharias 40 años antes. De esta manera, el factor de calidad Q de la transición en la cual se realiza la unidad de tiempo alcanza valores del orden de 10^{10} . Experimentalmente, la determinación del máximo en el pico de resonancias puede hacerse con una incertidumbre del orden de una parte en 10^{15} .

En la definición de la unidad de tiempo del SI intervienen, en principio, condiciones experimentales ideales: un átomo de Cesio-133 en reposo, libre de interacciones con el resto el universo el cual está sujeto a observación por un tiempo infinito. Sin embargo, en el laboratorio, estas

condiciones ideales no existen, sino que se dispone de un conjunto de muchos átomos de Cesio, los cuales interactúan entre ellos (por colisiones por ejemplo) y con sus entornos (con campos eléctricos, campos magnéticos, gravedad, etc.), y que pueden ser medidos por tiempos finitos. Con el objeto de que las condiciones experimentales reales en el laboratorio se aproximen tanto como sea posible a las condiciones de la definición, los experimentos que realizan la unidad de tiempo deben ser cuidadosamente planeados y ejecutados. De cualquier forma, es de suma importancia cuantificar los efectos sistemáticos en el corrimiento de los niveles de energía ocasionados por las interacciones remanentes que alejan al experimento de las condiciones ideales de la definición y llevar a cabo las correcciones al mejor nivel de incertidumbre.

3. EL SI Y LA UNIDAD DE TIEMPO

Es interesante notar que la resolución 1 de la 1ª Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), celebrada en septiembre de 1889, hace mención del kilogramo y del metro, pero no a la unidad de tiempo. De alguna manera se supuso que cualquiera sabía que el segundo era la fracción $1/86\,400$ del día solar medio, dejando la definición del término *día solar medio* a los astrónomos. No fue sino hasta 1954, en la 10ª CGPM (resolución 5), en donde se reconoce la necesidad y la urgencia de definir de manera oficial la unidad de tiempo, recomendando al Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) que adopte una posición al respecto. En 1960, durante la 11ª CGPM (resolución 9), por primera vez se adopta oficialmente una definición para la unidad de tiempo. La transcripción literal de esta definición establece que: *"The second is the fraction 1/31 556 925.9747 of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time"*. Sin embargo, en la resolución 10 de esa misma reunión se reconoce la urgencia de adoptar un patrón de referencia atómico o molecular para la unidad de tiempo. 4 años más tarde, durante la 12 CGPM, en 1964 (resolución 5), se recomienda a los laboratorios nacionales de metrología continuar con sus investigaciones para adoptar una nueva definición para la unidad de tiempo. Para aquel entonces el National Physical Laboratory del Reino Unido había desarrollado un reloj atómico de Cesio-133 cuyo desempeño fue comparado con observaciones astronómicas para determinar el grado de equivalencia entre el segundo atómico y el segundo astronómico. Fue así que en octubre de

1967, durante la 13ª CGPM (resolución 1), se adopta la definición que actualmente está vigente para la unidad de tiempo, la cual se sustenta en la transición hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133. En 1971, con la resolución 1 de la 14ª CGPM, se le pide al CIPM que establezca una definición para el Tiempo Atómico Internacional (TAI). Fue de esta manera que en 1975, durante la 15ª CGPM (resolución 4), se emitió una recomendación tanto a organismos nacionales como internacionales para continuar los esfuerzos tendientes al mejoramiento de la escala de tiempo TAI. En la resolución 5 de la misma reunión se emite una recomendación para que la escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC) sea usada como referencia para el establecimiento de los husos horarios a nivel internacional.

En 1983, en la resolución 1 de la 17ª CGPM, se establece una nueva definición para la unidad de longitud la cual está sustentada plenamente en la unidad de tiempo, estableciendo que el metro es la distancia que recorre la luz en el vacío durante el intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ segundos. Para establecer esta definición fue necesario asignar un valor constante (sin incertidumbre) a la velocidad de la luz en el vacío, a saber: $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$. Así la definición anterior para la unidad de longitud, dada en 1960 en términos de la longitud de onda de la transición $2p_{10} \rightarrow 5d_5$ del Criptón 86, quedaba abrogada. La resolución 2 de la misma reunión hacía una invitación al CIPM para establecer métodos y formas en la realización de la unidad. La definición de la unidad de longitud se realiza experimentalmente de manera indirecta, asumiendo como válida la relación entre la longitud de onda λ , la frecuencia ν y la velocidad de propagación c de una onda electromagnética en el vacío, a saber: $c = \lambda \nu$. Puesto que c es una constante cuyo valor numérico es conocido, en el caso de conocer ν , la longitud de onda queda determinada por la relación $\lambda = c/\nu$. De esta manera, la unidad de longitud se realiza por medio de la longitud de onda λ e interferometría. Para usar esta aproximación es necesario que la fuente de luz sea altamente monocromática y que tenga además una alta estabilidad en frecuencia, se requiere adicionalmente que la fuente sea calibrada en frecuencia utilizando la realización de la unidad de tiempo. La calibración de frecuencias ópticas requirió del escalamiento coherente de frecuencias, desde las microondas hasta el infrarrojo y el visible. Éste fue un trabajo que requirió un gran esfuerzo

para la comunidad internacional. La calibración en frecuencia de algunas líneas espectrales fue realizada utilizando estos métodos de escalamiento de frecuencia cubriendo 5 órdenes de magnitud, éstas serían utilizadas como referencias en la estabilización de láseres. De esta manera la frecuencia de emisión de los láseres estabilizados es conocida. Entre las radiaciones más utilizadas se encuentra la emisión roja de láseres de gas de He-Ne estabilizados a una de las transiciones del Yodo (633 nm) utilizando espectroscopia de saturación [15].

Fue durante la 18ª CGPM en 1987, en su resolución 3, donde se establece que la responsabilidad de la generación del Tiempo Atómico Internacional sería del BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) dejando esta labor la Oficina Internacional de la Hora que venía funcionando en el Observatorio de París. En esta misma reunión se emitió la resolución 5 en donde se recomendaba a los laboratorios nacionales realizar las investigaciones necesarias que condujeran a un mejor entendimiento de los efectos sistemáticos en la realización de la unidad de tiempo.

En la resolución 6 de la 18ª CGPM celebrada en 1987, se reconoce el hecho de que distintos laboratorios utilizaban el efecto Josephson y el efecto Hall Cuántico para mantener realizaciones del Volt y del Ohm, respectivamente. Además reconocía también la importancia de estas acciones en el aseguramiento de la uniformidad de las mediciones a nivel internacional y el mantenimiento de la estabilidad a largo plazo de ambas unidades. Por esta razón se recomendó a los laboratorios nacionales de metrología realizar estudios que condujeran a la determinación de las constantes que establecen la relación voltaje/frecuencia en el efecto Josephson y la relación voltaje/corriente en el efecto Hall Cuántico. La resolución 2 de la 19ª CGPM, en 1991, recomendaba que los laboratorios nacionales de metrología continuaran en sus esfuerzos para reducir la incertidumbre en el valor de los cocientes de las constantes de Von Klitzing (R_K) y de Josephson (R_J) así como avanzar en el entendimiento de la teoría de estos dos efectos cuánticos. Actualmente los valores internacionalmente aceptados para la constante de Josephson y Von Klitzing son: $483\,597.879(41) \times 10^9 \text{ Hz V}^{-1}$ y $25\,812.807\,449(86) \, \Omega$, respectivamente. En ambos efectos, la participación de la unidad de tiempo es clave. El efecto Josephson se presenta a temperaturas criogénicas cercanas a los 4.2 K (helio

líquido). Cuando un aislante eléctrico muy delgado es colocado entre dos superconductores expuesto a una radiación electromagnética de frecuencia f aparece en los extremos de la unión una tensión directa V_J la cual obedece a la relación $V_J = n\hbar/K_J$, donde n es un número entero y K_J es la constante de Josephson. En esta relación la constante n , que es un número cuántico, define el escalón de tensión constante. Es evidente en esta relación que una incertidumbre en la frecuencia f se hereda en una incertidumbre en la tensión V_J , inestabilidades en f inducen inestabilidades en V_J . Debido al elevado valor de la constante de Josephson (cercano a $5 \times 10^{14} \text{ Hz/V}$) se requieren frecuencias en la región de las microondas del orden de los 80 GHz para producir niveles de tensión del orden de los milivolts. Para producir niveles de tensión de 1 Volt o 10 Volt arreglos en serie de varios miles de uniones Josephson son fabricadas. La constante Josephson se relaciona con la constante de Planck y la carga del electrón e de acuerdo con la igualdad $K_J = \hbar/2e$. Por otro lado, en el efecto Hall clásico una diferencia de tensión constante aparece en los extremos de un conductor eléctrico que transporta una corriente eléctrica sujeto a un campo magnético cuya dirección es perpendicular a la dirección de la corriente eléctrica. La tensión en los extremos de la muestra es originada por la fuerza de Lorentz que aparece en las cargas eléctricas en movimiento debido a la presencia del campo magnético. El equilibrio se alcanza cuando la fuerza electrostática compensa la fuerza de Lorentz, en tal caso el campo eléctrico E_y que origina la diferencia de tensión se relaciona con la velocidad de las cargas eléctricas v_z y el campo magnético B_z de la siguiente manera: $E_y = v_z B_z$. El coeficiente Hall R_H se define como $R_H = E_y/B_z J_x$, donde J_x es la densidad de corriente eléctrica. Puesto que $J_x = v_x N e$, donde N es el número de portadores que circulan por unidad de tiempo y por unidad de área y e es la carga del electrón, el coeficiente Hall también puede ser escrito como $R_H = 1/Ne$. Usualmente la diferencia de tensión transversal es medida en función de la corriente eléctrica que circula por el conductor, definiendo así la resistencia Hall. Resulta claro que la resistencia Hall tiene una dependencia lineal con el campo magnético. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias la resistencia Hall queda cuantizada en función de B_z , dando lugar al efecto Hall cuántico. La cuantización del efecto Hall aparece cuando un gas de electrones (electrones libres) de dos dimensiones, en presencia de un pozo cuántico, es mantenido a temperaturas criogénicas en presencia de un campo magnético intenso (del orden de 10 Teslas). La resistencia Hall en este

caso resulta ser el cociente de h/ne^2 , donde n es un número entero positivo. A temperaturas del orden de los mK el primer escalón ($n=1$) se mantiene para campos magnéticos por arriba de 10 T, el segundo escalón aparece en el intervalo de 6 T a 9 T aproximadamente. En la medida que el número cuántico crece el tamaño de los escalones decrece, de manera que para $n \geq 10$ la resistencia Hall recupera su dependencia lineal con el campo magnético. Este comportamiento para números cuánticos grandes es típico de los sistemas cuánticos, en donde el caso continuo (o clásico) es recuperado en el límite en el que los números cuánticos tienden a infinito. En 1985 Klaus Von Klitzing recibió el premio Nobel de Física por el descubrimiento del efecto Hall cuántico. El efecto Hall cuántico es utilizado en la metrología para establecer patrones de resistencia eléctrica de muy alta exactitud. La unidad de tiempo interviene de manera indirecta en la medición de la tensión en los extremos del dispositivo Hall. En estos dos ejemplos, y en la definición de la unidad de longitud, se ilustra la forma en que la unidad de tiempo interviene en la realización o definición de otras unidades. De hecho, a la interdependencia que existe entre las realizaciones del Volt por medio del efecto Josephson, del Ohm por medio del efecto Hall cuántico y la unidad de tiempo, se le suele referir como *el triángulo cuántico de la metrología*.

En la resolución 7 de la 21ª CGPM, en 1999, se emite una recomendación a los laboratorios nacionales de metrología para realizar un esfuerzo tendiente a establecer una relación entre la masa y constantes fundamentales con la finalidad de establecer una eventual nueva definición para la unidad de masa. Entre los experimentos más prometedores se encuentra la Balanza del Watt [16], en donde se establece una equivalencia de alta exactitud, entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica. Con esta equivalencia es posible generar eléctricamente una fuerza que reemplace a la fuerza, que por efecto de gravedad, genera el prototipo internacional de la unidad de masa. La unidad de tiempo participa en este experimento de manera indirecta a través de las unidades de tensión y resistencia eléctrica, por medio de los efectos Josephson y Hall Cuántico.

Por otro lado, en la 21ª CGPM (1999), resolución 5, se reconoce la necesidad de la industria que demanda mejoras en la realización de la unidad de longitud, y recomienda a los laboratorios nacionales de metrología que realicen investigaciones teóricas y experimentales, tanto en frecuencias ópticas como

en patrones de frecuencia en la región de las microondas, para realizar comparaciones entre ellos tendientes a mejorar la base experimental del Sistema Internacional de unidades. Cabe resaltar la importante participación de la unidad de tiempo en el SI en la realización de tales mejoras.

Recientemente, en la resolución 8 de la 22ª CGPM (2003), se reconoce que las nuevas tecnologías basadas en trampas de iones y átomos neutros [17] han abierto una nueva posibilidad para el establecimiento de relojes ópticos y patrones de frecuencia de muy alta exactitud y estabilidad. Se reconoce también que estos experimentos se presentan como una posibilidad muy interesante para establecer en el futuro una nueva definición del segundo. Además se menciona que la aparición de los peines de frecuencia basados en láseres de femtosegundo han facilitando considerablemente las mediciones absolutas de frecuencia en la región visible del espectro electromagnético, incluyendo aquellas fuentes utilizadas en la realización del metro. Esta resolución invita a la comunidad internacional tanto de metrología dimensional como de metrología de tiempo y frecuencia para realizar colaboraciones entre ellas tendientes a mejorar las técnicas de comparación entre las frecuencias ópticas y las frecuencias de radio. Recomienda a los laboratorios nacionales continuar con sus esfuerzos para desarrollar técnicas confiables para la generación y comparación de frecuencias ópticas y frecuencias de radio de alta exactitud y estabilidad.

4. PEINES DE FRECUENCIA

La medición con muy alta exactitud de frecuencias en la región visible del espectro electromagnético es parte fundamental para el establecimiento de patrones primarios de longitud. Las primeras mediciones de frecuencia del espectro visible utilizando como referencia la transición hiperfina del Cesio-133 fueron realizadas en la década de los 80s. Estos esfuerzos fueron realizados principalmente en el National Physical Laboratory (NPL) del Reino Unido, el National Research Council (NRC) de Canadá, el Physikalische Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania, el LPTF de Francia y en Rusia. Estas mediciones utilizaban escalamientos de frecuencia coherentes cubriendo un intervalo de cinco órdenes de magnitud, desde la región de las microondas (10 GHz) hasta la región visible (cientos de Terahertz). El escalamiento era realizado con las llamadas cadenas de frecuencia (*frequency chains*) [18]. La

operación de las cadenas de frecuencia era sumamente compleja y costosa, por lo que su operación se llevaba a cabo esporádicamente. A manera de ejemplo, se puede mencionar que la cadena de frecuencias del NRC requería la operación simultánea de 5 láseres de CO₂, 2 láseres de estado sólido, 2 osciladores de microondas y ocho sistemas de control de fase (*phase locked servo loop systems*). Con este tipo de montajes se realizó la medición de frecuencia de algunas líneas de emisión, entre ellas las del yodo en el color rojo (≈ 633 nm). Las líneas de emisión del yodo siguen siendo ampliamente utilizadas para el establecimiento de patrones primarios de longitud, ya que se usan como referencia en la estabilización de láseres de He-Ne utilizando la técnica de espectroscopia de saturación. Láseres de He-Ne estabilizados al metano (88 THz) han sido también una pieza clave para las mediciones de muy alta exactitud en frecuencias láser. La medición de una nueva línea de emisión con tales cadenas de frecuencia representaba un enorme reto para la comunidad internacional. Este hecho limitaba el número de líneas de referencia disponibles para la realización de patrones primarios de longitud. Hacia finales de la década de los 90s aparecen los primeros reportes de láseres de pulsos ultracortos operados en el modo de peines de frecuencia (*frequency combs*) [19]. Estos desarrollos fueron impulsados principalmente en Estados Unidos por John Hall en el JILA y en Alemania por Theodore Hansch en el MPQ-Garching. Esta técnica utiliza láseres de femtosegundo estabilizados a referencias en frecuencias de radio de muy alta exactitud, típicamente relojes atómicos de Cesio o máseres de hidrógeno. El espectro de emisión de estos sistemas en el dominio de la frecuencia semeja un peine, de ahí el nombre, en donde la diferencia de frecuencia entre dos modos (dientes del peine) adjuntos es exactamente igual a la frecuencia de repetición del láser. Si el peine de frecuencia se extiende más allá de una octava (el término octava se utiliza aquí en el sentido musical, esto es, que la frecuencia del extremo de alta frecuencia del peine es el doble que la frecuencia del otro extremo) es posible medir la frecuencia absoluta de cada uno de los modos. La generación de espectros que cubren más de una octava se logra haciendo incidir la frecuencia de un láser de Ti-Safiro, con lente tipo Kerr, a través de una fibra óptica de microestructura especial de unos 20 cm de longitud. De esta manera el peine puede ser usado para medir la frecuencia de cualquier láser de manera directa utilizando técnicas de interferometría. Los peines de frecuencia son generados con sistemas compactos

cuya operación es relativamente sencilla. Actualmente es posible encontrar comercialmente estos sistemas. La facilidad de medición y la alta exactitud que ofrecen los peines de frecuencia han cambiado de manera radical la metrología de frecuencias ópticas.

Derivado de la dramática simplificación que ofrece la operación de los peines de frecuencia, comparada con las viejas cadenas de frecuencia, decenas de laboratorios alrededor del mundo operan en la actualidad estos sistemas teniendo por interés mediciones de alta exactitud de frecuencia e intervalos de tiempo. La combinación de peines de frecuencia, confinamiento y enfriamiento de átomos por medios ópticos hace que los patrones de frecuencia en la región óptica, llamados también relojes ópticos [20], adquieran especial interés debido a que constituyen ahora referencias completamente viables y con alto potencial en diversas aplicaciones.

5. RELOJES ÓPTICOS

Para la comunidad internacional ha sido claro que en la definición de la unidad de tiempo, las altas frecuencias ofrecen ventajas significativas sobre las bajas frecuencias. Las altas frecuencias dividen el tiempo en unidades más pequeñas, dando como resultado mayor exactitud y mayor capacidad de transferencia de información. Desafortunadamente algunas dificultades tecnológicas impedían en su momento el uso de frecuencias en la región infrarroja o visible del espectro para el establecimiento de relojes ópticos, a saber: i) fuentes de frecuencia no suficientemente estables, ii) movimiento térmico de los átomos responsable de ensanchamiento de líneas por efecto Doppler dando como resultado la aparición de errores significativos, y iii) ausencia de una forma conveniente de escalar coherentemente la frecuencia óptica a la región de microondas o de radio. Estas tres limitaciones fueron superadas respectivamente con: i) la aparición de técnicas de estabilización de láseres a cavidades resonantes y líneas moleculares o atómicas, ii) la aparición de las técnicas de enfriamiento de átomos por métodos ópticos, y iii) la aparición de los peines de frecuencia. Este panorama ha renovado el interés en la comunidad internacional para realizar investigaciones tendientes al establecimiento de patrones de frecuencia en la región visible del espectro electromagnético. Entre los sistemas más estudiados hasta ahora se encuentran: Yterbio

($^{171}\text{Yb}^+$: PTB, NPL), Mercurio ($^{199}\text{Hg}^+$: NIST), Calcio (^{40}Ca : NIST, PTB), Estroncio ($^{88}\text{Sr}^+$: NPL, NRC, ^{88}Sr : JILA, BNM-SYRTE, PTB) e Indio ($^{115}\text{I}^+$: MPQ). Las potencialidades que presentan estos sistemas son muy atractivas, en general se puede pensar en incertidumbres del orden de una parte en 10^{18} para iones atrapados e inestabilidades en frecuencia menores que $1 \times 10^{-16} \tau^{-1/2}$, con τ tiempo de promediación, para átomos neutros.

Por ahora, más investigación es requerida en el desarrollo y evaluación de desempeño de relojes ópticos antes de considerar como inminente una nueva definición de la unidad de tiempo en términos de estas frecuencias ópticas. Probablemente sea hasta la segunda década del siglo XXI en que se reúnan las condiciones necesarias para establecer una nueva definición para el segundo.

REFERENCIAS

- [1] 13ª Conferencia Internacional de Pesas y Medidas, Resolución 1, octubre, 1967
- [2] NBS Monograph 140, "Time and frequency: theory and fundamentals", Chapter 4-Part B, US Department of Commerce, 1974.
- [3] Ver, por ejemplo, Proc. of the Fourth Symposium Frequency Standards and Metrology, Ancona, Italy, 1988. Contiene información muy interesante sobre el estado del arte en la metrología de tiempo y frecuencia en la década de los 80s.
- [4] Ver por ejemplo: Proc. of the Fifth Symposium Frequency Standards and Metrology, Hoods Hole, Massachusetts, EUA, 1995. Contiene información muy interesante sobre el estado del arte en la metrología de tiempo y frecuencia en la década de los 90s
- [5] Cohen-Tannoudji and W. D. Phillips, "New Mechanisms for Laser Cooling", by C. N. Physics Today, October 1990, p. 33
- [6] 2003 Annual Report of the BIPM Time Section
El trabajo de evaluación de desempeño de patrones primarios de frecuencia queda bien ilustrado en el artículo: S.R. Jefferts *et al*, "Accuracy evaluation of NIST-F1", Metrologia, Vol. 39, 2002, pp. 321-336.
- [7] Ver por ejemplo: William J. Marciano, "Time Variation of the Fundamental "Constants" and Kaluza-Klein Theories", Phys. Rev. Lett. 52 (1984), 489.
- [8] J. D. Prestage *et al*, "Atomic Clocks and Variations of the Fine Structure Constant", Phys. Rev. Lett., Vol. 74, No. 18 (1995), pp 3511-3514.
- [9] Norman F. Ramsey, "A Molecular Beam Resonance Method with Separated Oscillating Fields", Phys. Rev., Vol. 78, No. 6, 1950, pp. 695-699.
- [10] A.G. Mungall *et al*, "The New NRC 2.1 Metre Primary Cesium Beam Frequency Standard, CsV", Metrologia, Vol. 9, No. 3, 1973, pp. 113-127.
- [11] Un excelente artículo de revisión de las técnicas de átomos lentos y su aplicación en la medición de tiempo de alta exactitud es: K. Gibble and S. Chu, "Future Slow-atom Frequency Standards", Metrologia, Vol. 29 (1992), pp. 201-212.
- [12] A. Clarion *et al*, "Ramsey Resonance in a Zacharias Fountain", Europhys. Lett., Vol 16, No. 2 (1991), pp. 165-170.
- [13] Ver por ejemplo: S. Waters *et al*, "Uncertainty Evaluation of the Atomic Cesium Fountain CsF1 of the PTB".
- [14] S. N. Lea *et al*, "Laser Cooling and Trapping of Atoms: New Tools for Ultra-Stable Clocks", Physica Scripta, Vol. T00 (1994).
- [15] S.N. Lea *et al*, "Absolute Frequency Measurements of 633 nm Iodine-Stabilized helium-Neon Lasers", Metrologia Vol. 40 (2003), pp 84-88.
- [16] Ver por ejemplo: B.P. Kibble *et al* "A Realization of the SI Watt by the NPL Moving-coil Balance", Metrologia, Vol. 27 (1990), p. 173.
- [17] D.J. Wineland, "Trapped Ions, Laser Cooling, and Better Clocks", Science, October 1984, Vol. 226, No. 4673, pp. 395-400.
- [18] Ver, por ejemplo, Proc. of the Fourth Symposium Frequency Standards and Metrology, Ancona, Italy, 1988.
- [19] David J. Jones *et al*, "Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked lasers and Direct optical Frequency Synthesis", Science, Vol. 288, April 2000, pp. 635-639
- [20] J. L. Hall *et al*, "Optical frequency standards: Some improvements, some measurements, and some dreams", Proc. of the Fifth Symposium Frequency Standards and Metrology, Hoods Hole, Massachusetts, EUA, 1995.