

Desarrollo de patrones de tiempo y frecuencia en Uruguay

Development of time and frequency standards in Uruguay

Desenvolvimento de padrões de tempo e frequência no Uruguai

Leonardo Trigo¹, Agustín García², Daniel Slomovitz³

Recibido: 05/06/2023

Aceptado: 13/07/2023

Resumen. - En este trabajo se presentan los desarrollos que se han realizado en instituciones de Uruguay, relativos a patrones de las magnitudes de tiempo y frecuencia. El período analizado cubre unos 80 años. Por tanto, las tecnologías fueron muy diversas, desde osciladores basado en cristales de cuarzo y electrónicas de válvulas de vacío, hasta modernos relojes de cesio, basados en la transición de sus niveles electrónicos. Las estabildades relativas, por consiguiente, cubren varios órdenes de magnitud, desde 10⁻⁷ hasta 10⁻¹³, lo que demuestra el gran avance que ha tenido el desarrollo de esta magnitud física en Uruguay.

El estado actual del patrón Nacional del Uruguay, basado en relojes de cesio, ha permitido llegar a incertidumbres suficientemente bajas para ser admitido como parte del sistema internacional que define la hora UTC (Tiempo Universal Coordinado).

Palabras clave: Frecuencia, tiempo, hora, patrón, UTC.

Summary. - *This paper presents the developments that have been carried out in Uruguayan institutions regarding standards of the quantities of time and frequency. The period analyzed covers about 80 years. Therefore, the technologies were very diverse, from oscillators based on quartz crystals and vacuum tube electronics, to modern cesium clocks, based on the transition of their electronic levels. The relative stabilities, then, cover several orders of magnitude, from 10⁻⁷ to 10⁻¹³, which demonstrates the great progress that the development of this physical quantity has had in Uruguay.*

The current state of the National Standard of Uruguay, based on cesium clocks, has reached uncertainties that are low enough to be admitted as part of the international system that defines the time, UTC (Coordinated Universal Time).

Keywords: Frequency, time, hour, standard, UTC.

¹ Ingeniero Tecnológico, UTE Laboratorio, ltrigo@ute.com.uy,
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0002-7953-6563>

² Ingeniero, UTE Laboratorio, agarciaf@ute.com.uy,
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-6205-8664>

³ Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República UDELAR, dslomo@gmail.com,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0909-6443>

Resumo. - *Este trabalho apresenta os desenvolvimentos que vêm sendo realizados nas instituições do Uruguai, relacionados aos padrões de magnitudes temporais e de frequência. O período analisado abrange cerca de 80 anos. Portanto, as tecnologias eram muito diversas, desde osciladores baseados em cristais de quartzo e eletrônica de tubos de vácuo, até modernos relógios de césio, baseados na transição de seus níveis eletrônicos. As estabilidades relativas, portanto, cobrem várias ordens de grandeza, de 10^{-7} a 10^{-13} , o que demonstra o grande progresso que o desenvolvimento desta magnitude física teve no Uruguai.*

O estado atual do Padrão Nacional do Uruguai, baseado em relógios de césio, permitiu-nos atingir incertezas suficientemente baixas para sermos admitidos como parte do sistema internacional que define o horário UTC (Tempo Universal Coordenado).

Palavras-chave: *Frequência, hora, hora, padrão, UTC.*

1. Introducción. – Múltiples sistemas dependen de la exactitud de la medida del tiempo y de la frecuencia. Estos van, desde la calibración de cronómetros [1], sincronismo en redes de comunicación [2], estampa de tiempo de eventos transitorios en las redes de potencia [3-4], hasta sistemas de alto requisito de exactitud como los son los sistemas satelitales de localización.

Los primeros relojes patrones en Uruguay estuvieron basados en la oscilación de péndulos, merced al descubrimiento de Galileo Galilei. Él observó que, fundamentalmente, el período de oscilación de un péndulo no depende de la amplitud ni de su masa; tan solo de su longitud. A partir del siglo XVII se popularizaron estos relojes, convirtiéndose en los mejores patrones hasta mediados del siglo XX. Hasta la década de los 70, uno de estos relojes mantenía la hora en el Laboratorio de UTE (Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas del Uruguay). Fueron fabricados por la empresa alemana Clemens Riefler entre 1890 y 1965. En particular, el reloj de UTE se fabricó en 1957, con el número 750. Si bien el factor principal que determina la frecuencia es la longitud del péndulo, existen varios otros que influyen en menor medida. Uno de estos es la amortiguación del movimiento, principalmente generada por la fricción con el aire. Este modelo de reloj permitía ajustar la densidad del aire dentro de su campana de vidrio, reduciendo su incidencia y constituyendo un método de ajuste muy fino de la frecuencia. Según las especificaciones del fabricante, tenían una estabilidad básica del orden de 30 ms por día, pero podían llegar a alcanzar 10 ms por día, equivalente a una variación de frecuencia relativa, $\Delta f/f$, de 10⁻⁷ Hz/Hz; uno de los relojes de péndulo más precisos fabricados en su época. La Figura 1 muestra este reloj, actualmente en exhibición en la entrada del Laboratorio de UTE (LABUTE).



Figura 1. Reloj patrón de péndulo Clemens Riefler N° 750, usado hasta la década de los 70 en el Laboratorio de UTE.

Por la década de los 50 del siglo pasado, la electrónica logró perfeccionar relojes basados en la estabilidad de las oscilaciones mecánicas del cuarzo. El desarrollo de este tipo de patrones, destinados a calibraciones, comienzan en Uruguay en la década de los 60, alcanzando estabilidades del orden de 1 parte en 10⁷, en períodos de una semana. Llegar a exactitudes mejores implicó desarrollar relojes basados en la frecuencia de transición de estados atómicos.

Desde hace más de 15 años, LABUTE viene desarrollando patrones de tiempo y frecuencia basados en relojes atómicos que permiten realizar calibraciones de los diversos instrumentos que dependen de estas magnitudes. Existen varios tipos de estos relojes atómicos que se diferencian

fundamentalmente por el elemento químico que usan como referencia de frecuencia. Los más económicos están basado en rubidio y le siguen los de cesio, pero existen intentos de uso de otros elementos. Los relojes de rubidio no se consideran patrones primarios debido a la deriva que presentan. Su frecuencia cambia con el tiempo por factores internos y externos. A pesar de estas limitaciones, dado que los relojes atómicos de rubidio son significativamente más económicos que los relojes de cesio son ampliamente utilizados.

El estado actual de desarrollo en Uruguay está basado en relojes de cesio, con lo cual se ha llegado a exactitudes en frecuencia de 1 parte en 10¹³ y exactitud en tiempo de 50 ns. Esto ha permitido a LABUTE formar parte del sistema UTC (Tiempo Universal Coordinado). En las siguientes secciones se describe en detalle todos estos desarrollos.

2. Relojes de cuarzo. - Por la década de 1980, el patrón de tiempo y frecuencia de LABUTE estaba basado en un oscilador comercial de cuarzo con cámara de estabilización térmica. Este tipo de dispositivo basa su estabilidad en la frecuencia mecánica de oscilación de una lámina de cristal de cuarzo. Este material es muy estable en sus características mecánicas, aunque sí depende de la temperatura. Por este motivo, se coloca dentro de un pequeño horno a temperatura constante reduciendo este factor de incertidumbre. En esa época, la calibración se realizaba mediante señales transmitidas por radio en onda corta, siendo el laboratorio más cercano el ubicado en la ciudad de La Plata en Argentina. De esa forma, LABUTE referenciaba su tiempo a dicho laboratorio.

Existieron desarrollos nacionales de este tipo de relojes anteriores. En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UDELAR), en la década de los 60 del siglo pasado, se desarrolló un oscilador de alta estabilidad [5]. La Figura II muestra la variación relativa de la frecuencia en un período de 12 días.

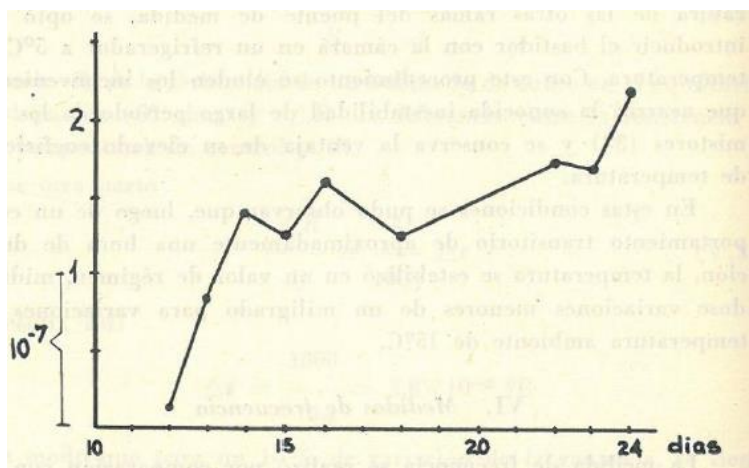


Figura II. Medición de la variación relativa de la frecuencia, correspondiente a un reloj de cuarzo [5].

La deriva media era de 1.6×10^{-8} (Hz/Hz)/día. De continuar con la misma deriva, esto equivale a un error de 0.5 segundos por año. El circuito del oscilador se muestra en la Figura III. Estaba basado en un oscilador de Meacham [6], con estabilización de amplitud, usando como elemento no lineal una lámpara incandescente.

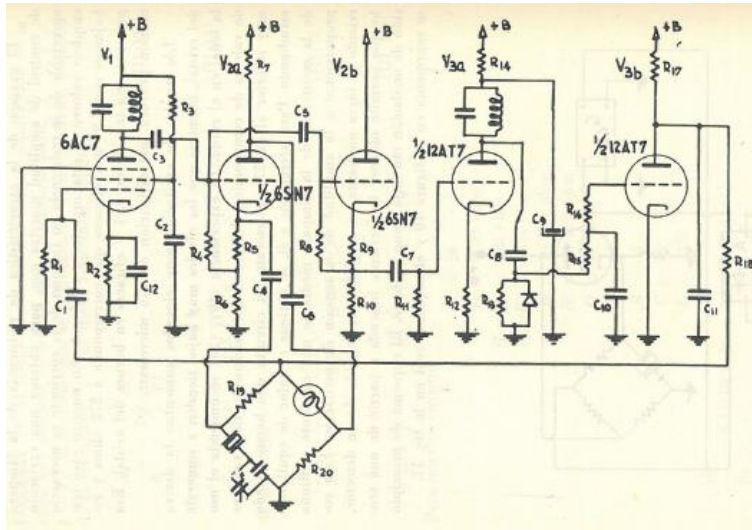


Figura III.-Circuito de oscilador a cristal desarrollado en los años 60 por la Facultad Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay [5].

La figura IV muestra un esquema y el circuito de su cámara térmica. Mantenía la temperatura constante dentro de 1 mK, frente a variaciones de 15 K en la temperatura ambiente. Esto es un gran logro para la época en que fue desarrollado, en que solo se contaba con válvulas, como elementos electrónicos activos.

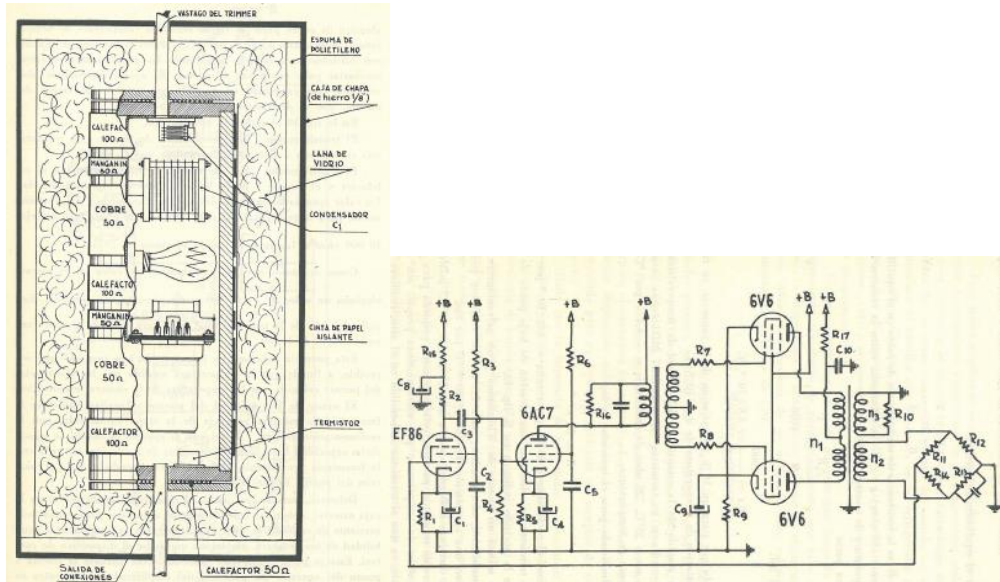


Figura IV.- Horno estabilizador de temperatura de oscilador patrón desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay, en los años 60 [5].

3. Relojes de rubidio.- Los relojes basados en rubidio también presentan derivas, aunque mucho menores que los de cuarzo. La Figura V muestra la deriva de un reloj de rubidio de LABUTE, del orden de 1.5×10^{-12} por día, cuatro órdenes mejor que la de los relojes de cuarzo. La principal causa del cambio del valor de la frecuencia con el tiempo, en estos dispositivos, se debe a la variación de la relación entre el gas de rubidio y el gas buffer. Este último gas se usa para reducir la velocidad de los átomos de rubidio, disminuyendo la dispersión en la frecuencia. Ambos gases son absorbidos o liberados lentamente a través de las paredes del recipiente que los contiene, lo que altera la composición y afecta el valor de la frecuencia.

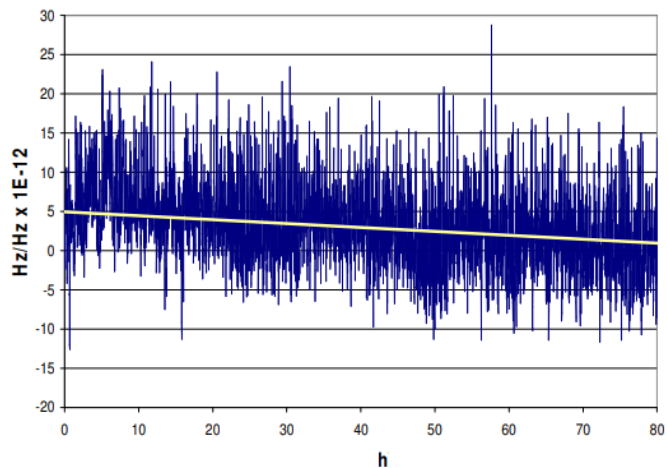


Figura V. Deriva de la frecuencia relativa en un reloj de rubidio.

4. Relojes de rubidio con deriva compensada.- Además de derivas causadas por composición de gases, factores externos como las perturbaciones electromagnéticas también pueden influir en el valor de la frecuencia. Aunque estos dispositivos están protegidos con blindajes, existen campos propios que también varían y, por otro lado, no son completamente inmunes a otras influencias externas. Para eliminar la deriva a largo plazo, existe otro tipo de reloj llamado GPSDO (oscilador disciplinado por GPS) que utiliza una conexión GPS para controlar la frecuencia de su oscilador. El sistema GPS, además de proporcionar servicios de posicionamiento global, también emite frecuencias estándar de 1 Hz, 5 MHz y 10 MHz. Otros sistemas ofrecen otras frecuencias de telecomunicaciones de 1.544 MHz y 2.048 MHz. Es esta facilidad la que se usa para disciplinar el reloj. Los GPSDO no tienen deriva a largo plazo porque el sistema GPS no lo tiene. Este es supervisado por relojes atómicos primarios (cesio) ubicados en estaciones terrestres, lo que permite realizar correcciones periódicas a los satélites del sistema. Sin embargo, los sistemas GPS tienen altos niveles de ruido en mediciones a corto plazo. Por otro lado, los relojes de rubidio exhiben un bajo nivel de ruido interno a corto plazo. Combinando ambos sistemas, se logran patrones de muy alta estabilidad y bajo ruido.

En LABUTE se desarrollaron varios patrones con esta combinación [7-11]. Están compuestos por un sistema formado por un receptor GPS con salida de frecuencia (Spectratime GPSDO modelo GPSource), un reloj atómico de rubidio (Spectratime RMO), un circuito electrónico de control y un contador universal (HP, modelo 53132A). Un computador controla todo el sistema. El esquema de bloques se ve en la Figura VI, y una foto del sistema, en la Figura VII.

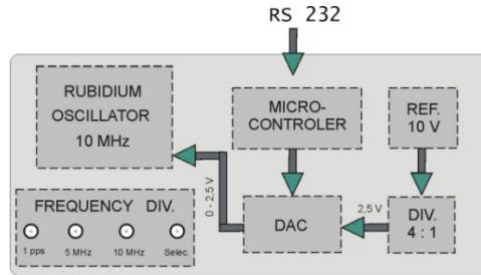


Figura VI.- Esquema de bloques del reloj de rubidio controlado de LABUTE.



Figura VII.- Equipamiento en LABUTE del sistema de oscilador de rubidio controlado por GPS.

El reloj de rubidio permite variar ligeramente su frecuencia de salida (10 MHz) en función de una tensión de control. Dicha tensión puede variar de 0 V a 5 V, siendo el cambio de frecuencia aproximadamente 5×10^{-10} Hz/V. La referencia del circuito de control está formada por un zener de 10 V asociado a un divisor resistivo de alta estabilidad, de relación 4:1 que entrega un voltaje de 2.5 V. Dicha tensión se aplica a un convertor digital analógico de 16 bits que permite obtener pasos de aproximadamente $38 \mu\text{V}$ al cambiar el bit menos significativo. Esto permite controlar la frecuencia en pasos de 1×10^{-14} Hz/Hz. Con esto se controla la frecuencia del reloj de rubidio. Su salida se compara contra la señal del GPS mediante el receptor GPSDO durante varios días. Este tiempo es necesario para obtener una proyección de la deriva y en función de esta, evaluar el valor de corrección.

El contador universal es utilizado para medir la diferencia de frecuencia entre el GPSDO y el reloj de rubidio. Posteriormente, el computador ejecuta un software, el cual se encarga de procesar los valores de diferencia de frecuencia medidos por el contador. El software calcula la deriva del rubidio utilizando los valores registrados, y calcula la corrección necesaria para mantener la variación de frecuencia en el entorno de 10-13 Hz/Hz. De esta manera, se asegura que la exactitud del reloj de rubidio se mantenga dentro del rango previsto. Mediante divisores de frecuencia, se obtienen las salidas de 1 Hz y 5 MHz.

En cuanto a los niveles de ruido a corto plazo, la Figura VIII muestra el nivel del sistema GPS. El valor pico a pico es de 3×10^{-10} Hz/Hz, aproximadamente. En cambio, el ruido a corto plazo del reloj de rubidio es de unos 2.5×10^{-11} Hz/Hz, unas 10 veces menor al correspondiente al sistema

GPS (ver Figura IX). Promediando varios días, es posible llegar a incertidumbres del orden de algunas unidades por 10-14 Hz/Hz El costo del sistema así formado es unas diez veces menor que el costo de relojes primarios de cesio, pero no es un sistema independiente, dado que se basa en la estabilidad del GPS.

Se utilizó una facilidad del SIM (Sistema Interamericano de Metrología), la cual se detalla en la sección siguiente, para calcular la diferencia entre este patrón y los correspondientes a los Institutos Metroológicos Nacionales: NIST (Estados Unidos), CENAM (México) y NRC (Canadá). Esta comparación se realizó entre setiembre de 2009 y junio de 2011. En la Figura X se muestran los resultados.

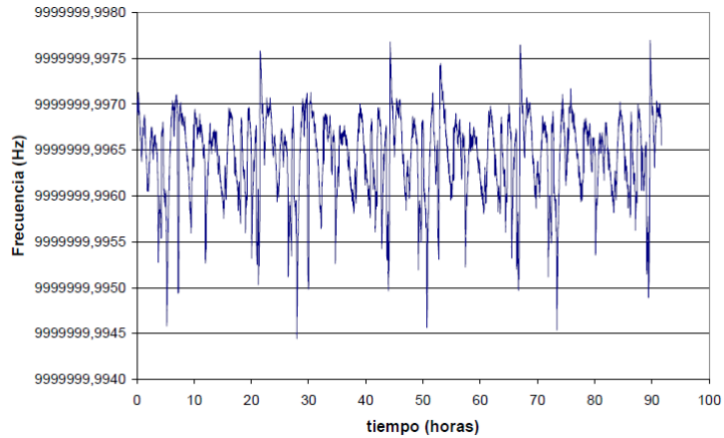


Figura VIII.- Ruido de corto plazo de sistema GPS (escala vertical: 5×10^{-11} Hz/Hz).

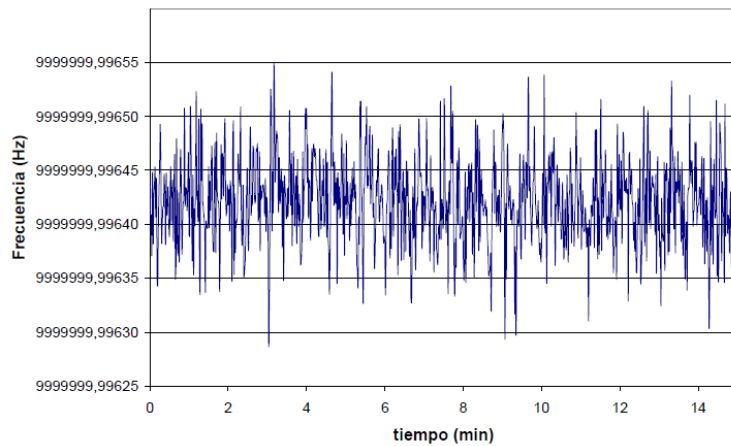


Figura IX. Ruido de corto plazo de reloj de rubidio (Escala vertical: 5×10^{-12} Hz/Hz).

Las diferencias de fase entre LABUTE y NIST, y LABUTE y CENAM estuvieron por debajo de ± 30 ns la mayor parte del período; mientras que la diferencia de fase entre LABUTE y NRC varió dentro de ± 100 ns. Esto muestra que NRC tuvo una mayor dispersión que LABUTE durante este intervalo de tiempo.

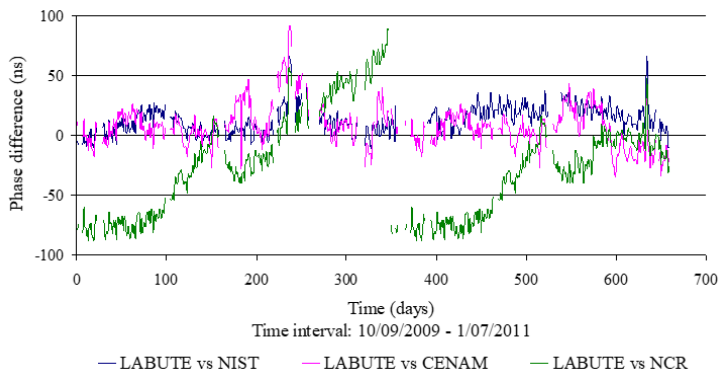


Figura X. Diferencia de tiempo entre LABUTE-NIST, LABUTE-NRC y LABUTE-CENAM.

5. Relojes de cesio. - Los osciladores atómicos de cesio son patrones primarios, pues reproducen la definición de la unidad de tiempo del Sistema Internacional (SI) [12]. Su frecuencia no se altera con el tiempo ni tampoco por la influencia de condiciones ambientales o campos electromagnéticos. Todos los equipos utilizan el único isótopo estable que existe para el cesio, el Cs133, cuya frecuencia de transición hiperfina, por definición de la unidad, es 9.192 631 770 GHz (ver Figura XI). Hay 16 estados magnéticos, pero solo uno es útil para un patrón primario de frecuencia, ya que esa transición es básicamente insensible a los campos magnéticos. Esta transición hiperfina es la que se usa para definir el segundo del SI.

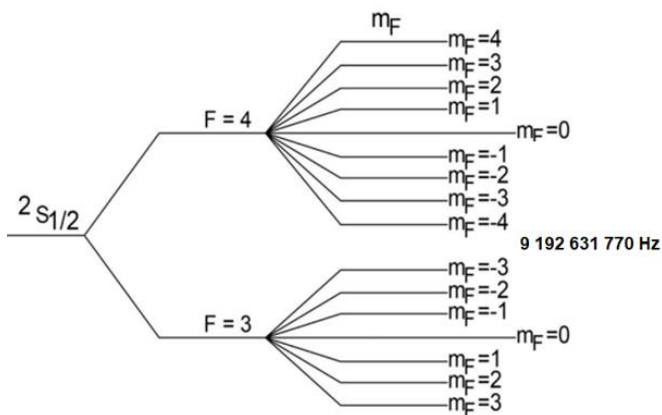


Figura XI. Transiciones de la estructura hiperfina del Cesio ¹³³.

Un esquema de bloques de este tipo de reloj se ve en la Figura XII [13]. Del lado izquierdo, un horno calienta los átomos de cesio hasta alcanzar el estado gaseoso. Un haz de átomos emerge del horno a una temperatura cercana a los 100 °C y atraviesa un campo magnético (imán A), donde se divide en dos haces de átomos con diferentes estados magnéticos. Uno de los haces es absorbido y no es de interés, pero el otro haz es desviado hacia la cavidad de interrogación de microondas, conocida como cavidad de Ramsey. Dentro de ella, el haz de cesio es expuesto a una frecuencia de microondas generada por un sintetizador de frecuencia basado en un oscilador de cuarzo. Si esta frecuencia se ajusta precisamente a la frecuencia de resonancia del cesio (9 192 631 770 Hz),

algunos de los átomos cambiarán de estado. Después de salir de la cavidad de Ramsey, los átomos atraviesan un segundo campo magnético (imán B). Este imán dirige solo a los átomos que cambiaron de estado hacia el detector. En esencia, los imanes ubicados en ambos lados de la cavidad de Ramsey funcionan como una puerta que solo permite el paso al detector de los átomos que experimentan la transición energética deseada.

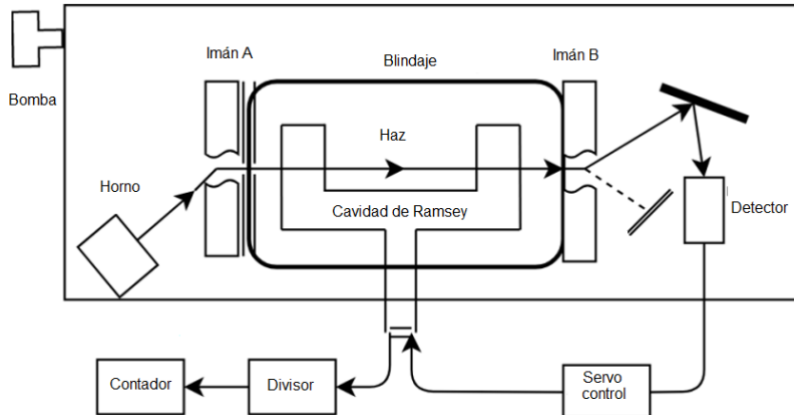


Figura XII.- Esquema de bloques del reloj de Cesio.

El detector envía una señal de retroalimentación a un circuito de servomecanismo que ajusta continuamente el oscilador de cuarzo para que el máximo número de átomos llegue al detector. De esta forma, el oscilador de cuarzo genera una frecuencia igual a la resonancia del cesio. Mediante divisores de frecuencia, se obtienen las salidas típicas de 1 Hz, 5 MHz y 10 MHz utilizadas por los Laboratorios Nacionales. Algunos modelos pueden tener otras salidas, usadas en telecomunicaciones, de 1.544 MHz o 2.048 MHz.

Una foto del equipo que actualmente posee LABUTE se muestra en la Figura XIII [13]. Actualmente, los relojes de cesio son capaces de generar frecuencias con una estabilidad del orden de 5×10^{-13} Hz/Hz, lo que corresponde a un segundo en 64 000 años. La vida útil de relojes comerciales está alrededor de diez años en los equipos comunes y de cinco años en los de alta performance. Mediante el seguimiento de algunos parámetros internos se puede conocer cuándo está llegando al límite de su vida útil. En tal caso, es necesario reemplazar la ampolla donde reside el cesio y parte del sistema de funcionamiento.



Figura XIII. Equipo patrón de Cesio de LABUTE [13].

Algunos laboratorios (NIST, PTB, NPL, entre otros) han desarrollado sistemas de mayor precisión, llamados Fuentes Atómicas de Cesio [14]. Estos utilizan un sistema diferente. Los átomos de cesio se enfrían con láser hasta temperaturas muy cercanas al cero absoluto, disminuyendo sus velocidades y por tanto la dispersión en la frecuencia. Estos haces de cesio son lanzados hacia arriba, como si fuera una fuente de agua y atraviesan una cavidad de Ramsey dos veces, una al subir y otra al bajar. Las mejoras realizadas en los últimos relojes permiten una precisión de 1.5×10^{-16} Hz/Hz, equivalente a un error de tan solo un segundo en unos 200 millones de años.

Nuevos trabajos sobre relojes ópticos, en desarrollo, usan frecuencias de funcionamiento más altas, entre decenas y centenas de terahertz. Los resultados primarios muestran precisiones del orden de 10^{-18} Hz/Hz, y probablemente se logrará bajar aún más estos valores. Se prevé que en la década del 30 de este siglo se redefina la unidad del segundo en función de estos nuevos patrones primarios.

6. Comparación de relojes atómicos. –

Comparar relojes patrones entre sí, en ambiente de laboratorio, es relativamente simple. En [15] se muestra uno de tales sistemas. El problema se torna más complejo cuando la comparación debe realizarse entre lugares físicamente distantes. Esto es necesario para distribuir señales de tiempo, calibrar patrones en forma remota y validar Patrones Nacionales de distintos países. A diferencia de otras magnitudes, en frecuencia es posible dicha comparación remota. En las Américas se desarrolló un sistema de intercomparación remota entre Laboratorios Nacionales, del cual participa LABUTE. Fue desarrollado por el SIM y permite el seguimiento on-line de los patrones en dicha magnitud. Este sistema (SIM Common View Time and Frequency Measurement System) [16] permite comparar relojes de los Institutos Nacionales de Metrología (NMI) de los países americanos. Está basado en la vista en común de satélites del sistema GPS. Desde cada laboratorio se mide la diferencia de tiempo entre su patrón y el reloj del satélite. Esas diferencias se comunican y se restan, de forma de eliminar la variable reloj-satélite. El proceso tiene ciertas correcciones por efectos atmosféricos y otras variables, y da como resultado la diferencia en tiempo entre los dos laboratorios, independientemente del error del reloj del satélite. Esto se realiza para todos los satélites que tengan vista común entre ese par de laboratorios.

Cada 10 minutos se publican los valores de las diferencias de tiempo entre todos los países incluidos en este sistema (a la fecha de este informe, 26 países). En el sitio web del SIM se muestra una matriz con estas diferencias y sus valores históricos (ver Tabla I). Adicionalmente, muestra gráficos de estos valores, valores promedio y desviaciones de Allan. El sistema calcula una escala de tiempo llamada SIMT (SIM Time Scale) [17] a partir de los datos de todos los países que tienen relojes de cesio, promediados según el peso de la incertidumbre de cada uno. A modo de ejemplo, en la Figura XIV se observa la comparación entre los relojes de UTE y NIST. En la página web del sistema SIMT se puede seleccionar los países a comparar y el período. En este caso, la información mostrada corresponde a las fechas entre febrero y abril de 2023. El gráfico muestra el comportamiento entre ambos relojes, así como el promedio de la diferencia de tiempo (17 ns) y de frecuencia (-2.45×10^{-15} Hz/Hz).

SIM Time Network

(real-time measurement results for the 10-minute period ending on 05-09-2023 at 1220 UTC)

SIM		NIST	CENAM	NRC	CONAMP	ONRJ	ICE	INM	INTI	CNME	BSJ	UTE
United States SIMT(NIST)		Mexico SIMT(CNAM)	Canada SIMT(NRC)	Panama SIMT(CONAMP)	Brazil SIMT(ONRJ)	Costa Rica SIMT(ICE)	Colombia SIMT(INM)	Argentina SIMT(INTI)	Guatemala SIMT(CNME)	Jamaica SIMT(BSJ)	Uruguay SIMT(UTE)	
United States SIMT(NIST)		-2.0	-8.1	-3.0	9.0	-18.5	-86.2	-213.9	58.9	-153.7	-39.0	
Mexico SIMT(CNAM)	2.0		-4.8	0.7	15.9	-15.6	-85.4	-208.6	57.3	-154.7	-30.1	
Canada SIMT(NRC)	8.1	6.8		4.5	17.9	-11.0	-78.7	-200.4	69.7	-145.1	-25.5	
Panama SIMT(CONAMP)	3.0	-0.7	-4.5		10.2	-16.9	-87.8	-213.2	60.3	-155.7	-34.2	
Brazil SIMT(ONRJ)	-9.0	-15.9	-17.9	-10.2		-27.9	-102.5	-224.1	46.1	-169.4	-45.7	
Costa Rica SIMT(ICE)	18.5	15.6	11.0	16.9	27.9		-71.0	-195.1	75.7	-138.2	-16.1	
Colombia SIMT(INM)	86.2	85.4	78.7	87.8	102.5	71.0		-118.8	146.6	-70.1	58.8	
Argentina SIMT(INTI)	213.9	208.6	200.4	213.2	224.1	195.1	118.8		263.6	51.9	175.3	
Guatemala SIMT(CNME)	-58.9	-57.3	-49.7	-60.3	-46.1	-75.7	-146.6	-263.6		-214.8	-85.2	
Jamaica SIMT(BSJ)	153.7	154.7	145.1	155.7	169.4	138.2	70.1	-51.9	214.8		127.6	
Uruguay SIMT(UTE)	39.0	30.1	25.5	34.2	45.7	16.1	-58.8	-175.3	85.2	-127.6		

Tabla I. Comparación entre relojes patrones de países de América en nanosegundos (parcial) [16].

Mean Time Offset (ns)	Range (ns)	Frequency Offset
16.73	215.91	-2.45 x 10 ⁻¹⁵

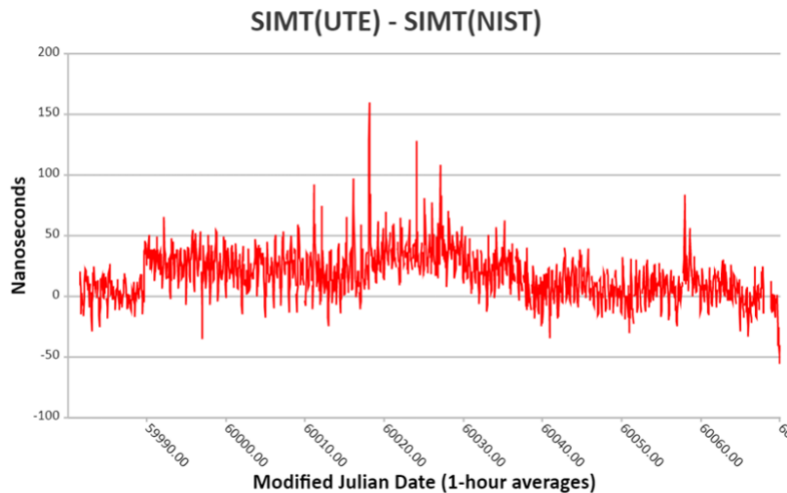


Figura XIV. Comparación entre SIM(UTE) y SIM(NIST) entre febrero y abril de 2023.

7. Sistema UTC. - Uno de los últimos logros del Uruguay, dentro del área de Tiempo y Frecuencia, es la participación de LABUTE en el UTC (Tiempo Universal Coordinado) [18], como UTC(UTE), a partir de marzo del 2023. El UTC es el principal estándar de tiempo por el cual el mundo regula los relojes. La participación se logró con el patrón primario de cesio, equipos accesorios y un equipo que permite la vista común de satélites (NIST Tai-1), mostrado en la Figura XV. Este conjunto es el encargado de la medida y generación del reporte diario que luego es enviado a los servidores del Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) para su procesamiento y comparación con otros laboratorios.



Figura XV.- Equipo de LABUTE para medida y envío de reportes a la UTC.

Para ser admitido en este sistema, se debió demostrar alta estabilidad durante largo tiempo. El BIPM emite periódicamente un reporte de todos los laboratorios que contribuyen (unos 86), denominado Circular T [19-20]. El peso de cada uno está determinado por su incertidumbre, teniendo mayor influencia aquellos laboratorios de menor incertidumbre. La Tabla II muestra, parcialmente, las diferencias entre UTC y algunos de los laboratorios intervinientes entre el 31 de marzo y el 30 de abril del 2023. UTC(UTE) figura en la última fila de la tabla.

1 - Difference between UTC and its local realizations UTC(k) and corresponding uncertainties.
From 2017 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 37 s.

Date 2023 MJD	0h UTC	FEB 24 59999	MAR 1 60004	MAR 6 60009	MAR 11 60014	MAR 16 60019	MAR 21 60024	MAR 26 60029	MAR 31 60034	Uncertainty/ns Notes			
Laboratory k		[UTC-UTC(k)]/ns									uA	uB	u
NRC (Ottawa)		-7.8	-8.7	-8.9	-8.8	-9.1	-9.6	-8.9	-8.6	0.3	3.5	3.6	
NRL (Washington DC)		-0.4	0.4	0.8	2.4	4.6	5.7	2.6	-0.3	0.3	20.0	20.0	
NSAI (Dublin)		8.7	6.4	10.7	15.8	13.8	14.3	-	-	0.3	7.3	7.3	
NTSC (Lintong)		0.3	-0.6	-0.4	-0.4	-0.3	0.0	-0.5	-0.5	0.5	3.1	3.1	
ONBA (Buenos Aires)		2586.7	2605.2	2612.1	2616.5	2651.9	2664.5	2684.7	2689.2	2.0	11.2	11.4	
ONRJ (Rio de Janeiro)		1.4	1.3	-5.0	-2.2	1.5	1.0	0.2	2.1	0.7	3.0	3.1	
OP (Paris)		0.9	1.2	0.9	0.9	0.6	0.6	1.0	0.9	0.3	1.7	1.7	
ORB (Bruxelles)		2.3	1.8	1.1	2.1	1.8	2.0	2.0	1.6	0.3	3.1	3.1	
PL (Warszawa)		-1.4	-2.1	-2.2	-1.4	-1.2	-0.2	0.3	0.7	0.3	2.9	2.9	
PTB (Braunschweig)		0.4	0.4	0.5	0.3	0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1	1.0	1.0	
ROA (San Fernando)		-2.3	-2.9	-2.3	-2.5	-2.9	-2.9	-3.1	-2.6	0.3	1.8	1.8	
SASO (Riyadh)		-417.1	-431.8	-445.6	-480.2	-513.8	-542.0	-566.9	-585.5	0.3	3.5	3.5	
SCL (Hong Kong)		50.1	49.9	52.1	48.4	51.6	52.7	49.5	50.9	0.3	3.5	3.5	
SG (Singapore)		6.8	-4.9	-14.6	-8.1	3.4	18.6	15.0	-2.9	0.3	3.3	3.3	
SIQ (Ljubljana)		-6.1	-8.9	-4.3	-0.8	-6.6	-0.4	-11.7	-6.8	0.3	3.9	3.9	
SL (Colombo)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SMD (Bruxelles)		1.7	1.4	1.1	1.1	0.6	0.5	0.5	0.5	0.3	3.6	3.6	
SHU (Bratislava)		-	264.4	255.0	-	-	-	-	-	1.5	12.2	12.3	
SP (Boras)		-0.3	-0.3	-1.1	-2.0	-2.8	-3.5	-3.6	-3.2	0.3	1.9	1.9	
SU (Moskva)		-0.6	-0.7	-0.9	-1.1	-1.0	-1.3	-1.1	-1.1	0.3	1.8	1.8	
TL (Chung-li)		-0.5	-0.7	-1.2	-2.0	-2.4	-2.7	-1.6	-0.7	0.3	2.1	2.2	
TP (Praha)		25.7	17.0	10.5	11.5	10.7	7.5	0.9	3.5	0.3	2.9	2.9	
UA (Kharkiv)		4.0	-13.1	9.8	8.5	-2.4	-7.1	-11.8	-14.6	1.5	7.4	7.5	
UAE (Abu Dhabi)		24.0	38.7	28.3	35.6	41.1	25.4	7.1	18.4	7.5	4.6	8.8	
UHE (Gebze-Kocaeli)		1.0	0.3	1.2	1.2	0.4	-2.2	-0.2	-1.2	0.3	3.7	3.7	
USNO (Washington DC)		0.2	0.2	0.1	0.4	-0.1	-0.7	-0.8	-0.8	0.3	1.8	1.8	
UTE (Montevideo)		-	-12.6	-16.2	3.4	-13.9	-22.0	-28.2	-10.2	3.0	7.7	8.2	

Tabla II. Diferencias entre los patrones locales y la UTC entre marzo y abril del 2023[19].

En la Figura XVI se observan estas diferencias entre los meses de marzo y mayo de 2023. El eje de tiempo está en unidades MJD (día juliano modificado). Es una cuenta de días y fracciones contados desde un punto inicial fijo, $MJD = JD - 2400000$, donde JD es el día juliano y tiene su inicio al mediodía del 01/01/4713 A.C. Fue usado desde hace tiempo por los astrónomos, y sigue siendo usado para la magnitud Tiempo.

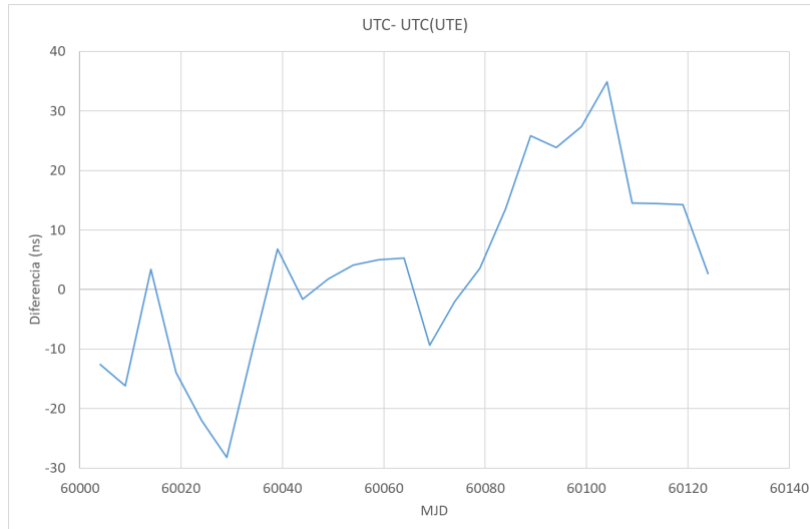


Figura XVI.- Diferencia de tiempo entre UTC y UTC (UTE).

En Uruguay, UTE mantiene un convenio con LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay) por el cual los patrones de LABUTE en electricidad, magnetismo y tiempo-frecuencia son reconocidos como Patrones Nacionales. Por esto, el patrón de tiempo-frecuencia de LABUTE es reconocido como Patrón Nacional del Uruguay en esta magnitud.

El logro de integrar el sistema UTC(UTE) es de gran importancia para el país ya que permite tener validación en las mediciones y calibraciones de tiempo y frecuencia. No basta con poseer un reloj atómico de cesio para asegurar que funciona correctamente. Puede tener varias fallas menores, que afecten su frecuencia, pero que no sean detectadas por el operador. La intercomparación con otros relojes es la forma más directa de validar los valores que proporciona, y la incertidumbre que el laboratorio estima.

Por medio de los sistemas descriptos, LABUTE se compara en forma permanente no solo con Laboratorio Nacionales de América, sino con Laboratorios Nacionales de todo el mundo. Este sistema patrón alcanza un nivel de incertidumbre pequeño, que permite estudios más exhaustivos en mediciones de tiempo y frecuencia, y de otras magnitudes que usan el tiempo en su definición, como la potencia eléctrica. Asimismo, permite otorgar trazabilidad a la hora-Uruguay a través de UTC(UTE) y a la calibración de otros relojes. Actualmente, no existe una ley que defina la hora-Uruguay a partir de referencia propia. Los servidores de las empresas ajustan su hora a servidores internacionales. En algún momento se deberá seguir el camino de la mayoría de los países y decidir por ley usar la referencia propia, y difundirla de manera oficial.

8. Conclusiones. - Desde la década del 60 del siglo pasado hasta el año 2023, se analizaron los diferentes tipos de relojes patrones en Uruguay; comenzado con relojes de péndulo hasta relojes atómicos de cesio. La cadena de desarrollo abarcó también relojes basados en osciladores con cristal de cuarzo y relojes atómicos de rubidio. El nivel de precisión se ha mejorado en muchos ordenes, desde 10^{-6} Hz/Hz a 10^{-13} Hz/Hz a nivel de Uruguay, llegando a 10^{-16} Hz/Hz a nivel internacional, en los Laboratorios más desarrollados.

Como resultado, LABUTE logró ser admitido para participar en forma directa en la UTC (Tiempo Universal Coordinado) como UTC(UTE), figurando sus resultados en los informes periódicos del BIPM (Oficina Internacional de Pesas y Medidas), Circular-T.

En estos momentos no existe una ley en Uruguay que defina la forma técnica de mantener la hora oficial y su diseminación a partir de una propia referencia. Los servidores de las empresas ajustan su hora a servidores internacionales. El sistema patrón desarrollado permitiría dar trazabilidad a la hora de Uruguay a través de UTC(UTE) y a las calibraciones de otros relojes patrones.

7. Referencias

- [1] Trigo L, Slomovitz D. *Calibración de cronómetros digitales por método de inducción*. Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 08, Montevideo, Uruguay, pp. 21-23, 2008.
- [2] Coppo I. *Plan de sincronismo para la red telefónica del Ecuador*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11051>. Accedido en 05-2023.
- [3] Slomovitz D, Trigo L, García A, Izquierdo D, Faverio C, Sandler R. *A portable system for phasor measurement units (PMU) calibration in high-voltage substations*. Measurement: Sensors, vol 18, 2021.
- [4] Slomovitz D et al. *Online verification system for phasor measurement units*. 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2020.
- [5] Pérez Iribarren R, Herrero V. *Desarrollo de un patrón de frecuencia con oscilador de Meacham a cristal, en cámara termostática de precisión*. Boletín de la facultad de Ingeniería y Agrimensura de Montevideo, vol. IX, n 7, octubre 1966.
- [6] Meacham L A. *The bridge-stabilized oscillator*, Proc. Inst. Radio Engrs, 26, pp. 1278 1938.
- [7] Trigo L, Slomovitz D. *Compensación de la deriva en osciladores de rubidio*. Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 08, Montevideo, Uruguay, pp. 24-25, 2008.
- [8] Trigo L, Slomovitz D. *Control de la deriva de osciladores de rubidio*. VIII SEMETRO, Joao Pessoa, Brasil, pp. 1-3. (2009).
- [9] Trigo L, Slomovitz D. *Patrón nacional tiempo-frecuencia basado en un reloj atómico de rubidio con deriva compensada*. Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 10, Montevideo, Uruguay, 2010, pp. 1-3. (2010).
- [10] Trigo L, Slomovitz D. *Rubidium atomic clock with drift compensation*. CPEM 2010, 2010.
- [11] Trigo L, Slomovitz D. *Long term experimental results of a rubidium atomic clock with drift compensation*. IX SEMETRO, Natal, Brasil, pp. 3, 2011.
- [12] BIPM, *SI base unit: second (s)*, <https://www.bipm.org/en/si-base-units/second>, accedido en mayo 2023.
- [13] Microchip 5071A Datasheet, https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/133269-5071a-datasheet, accedido en mayo 2023.
- [14] Domínguez I, López J M, Eduardo de Carlos L, López S. *Diseño del primer reloj de fuente atómica del CENAM*. <https://www.cenam.mx/memorias/descarga/simposio%202002/doctos/te019.pdf>. Accedido en mayo 2023.
- [15] Trigo L, Slomovitz D. *Measurement System for Atomic Clock Calibration*. IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting (EPIM), IEEE, 2018.
- [16] *SIM common-view time and frequency measurement system*, https://sim.nist.gov/scripts/sim_rx_grid.exe. Accedido en mayo 2023.
- [17] Lopez-Romero J M, Lombardi M, *SIM time scales*, Simposio de Metrología 2010, Querétaro, México, 2010.
- [18] BIPM, *Technical services: Time Metrology*, <https://www.bipm.org/en/time-metrology>. Accedido en mayo 2023.
- [19] BIPM, *Circular T*, <https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/Circular-T/cirt/cirt.424>. Accedido en mayo 2023.

[20] BIPM, *Explanatory supplement of bipm circular T*, https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/other-products/notes/explanatory_supplement_v0.6.pdf. Accedido en mayo 2023.

Nota contribución de los autores:

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

LT ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

AG ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

DS ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Nota de aceptación: Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.