

TIEMPO UNIVERSAL COORDINADO DEL CENAM: EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

J. M. López Romero, Nélida Díaz M., F. Jiménez Tapia.
Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carr. a Los Cués, El Marqués, 76241, Qro., México
Tel. (01 442) 2 11 05 43, e-mail: jlopez@cenam.mx

Resumen: Desde marzo de 1995 el Centro Nacional de Metrología, CENAM, ha mantenido ininterrumpidamente la generación de la escala de Tiempo Universal Coordinado UTC(CNM). Durante el mismo periodo de tiempo ha participado en la generación de la escala de Tiempo Universal Coordinado, el UTC, del BIPM. Para la generación del UTC(CNM) el CENAM mantiene en operación un conjunto de relojes atómicos de Cesio (cuyo número ha oscilado a lo largo de 10 años entre 3 y 6 relojes) y, desde el 2004, un Máser Activo de Hidrógeno. Con el objeto de mejorar la estabilidad y exactitud del UTC(CNM) la División de Tiempo y Frecuencia del CENAM ha desarrollado un reloj virtual con el cual se generará el UTC(CNM). En este artículo se realiza un análisis del desempeño del UTC(CNM) para el periodo entre enero del 2004 y abril del 2006. Se comparan los resultados con el desempeño de escalas de tiempo UTC de algunos otros laboratorios primarios de metrología. Así mismo, se presentan los resultados más recientes de la evaluación del desempeño del reloj virtual del CENAM.

1. INTRODUCCIÓN

El número de mediciones de tiempo realizadas en México diariamente es, por lo menos, del orden de diez mil millones. Tales mediciones de tiempo tienen un alto impacto económico. Una estimación conservadora indica que dichas mediciones están asociadas al manejo de un monto económico en el país de por lo menos 10 mil millones de dólares anualmente. Por otro lado, desde el punto de vista técnico, la calidad de múltiples bienes y servicios utilizados cotidianamente depende en buena manera de la medición de tiempo, tal es el caso de la telefonía, el internet, la televisión y la radio, entre muchos otros. En general, el sector de las telecomunicaciones requiere de mediciones de tiempo de alto nivel de exactitud. Aplicaciones avanzadas en ciencia y tecnología requieren de mediciones de tiempo de alta exactitud, tal es el caso de la navegación, astronomía, radio astronomía y física, entre otros. Las escalas de tiempo son de suma importancia debido a sus implicaciones a nivel social, ya que, entre otras cosas, de ellas se deriva la hora del día.

La escala de tiempo UTC, generada por el *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), es la referencia internacional para las escalas de tiempo [1]. El UTC satisface las dos relaciones siguientes: i) $|UTC - UT1| \leq 0,9$ s, y ii) $UTC = TAI + n$, donde n es un número entero de segundos. La elección del valor para n , así como la determinación del momento de modificación, es hecha por el *International Earth Rotation Service and Reference*

Systems (IERS). Actualmente $n = -33$ segundos. Cabe indicar que la escala de tiempo UTC no es usada directamente en aplicaciones industriales y otros usos prácticos ya que es el resultado numérico de un algoritmo matemático. Sin embargo, las realizaciones que algunos países mantienen del UTC, por medio de sus laboratorios primarios de metrología, las cuales son denotadas por UTC(k), donde k indica el acrónimo del laboratorio que genera la escala, son de suma importancia ya que éstas son las que se utilizan para las aplicaciones directas en los procesos industriales y otros usos prácticos. En el caso de México la realización del UTC es mantenida por el CENAM. Dicha realización es denotada por UTC(CNM).

2. EL UTC(CNM)

En marzo de 1996 el Centro Nacional de Metrología (CENAM) inició su contribución en la generación del UTC [2] [3]. En aquel mismo año, el CENAM inició la generación de su escala UTC(CNM), de la cual se derivan la hora del día para los tres husos horarios del país. Al momento de escritura de este trabajo, el UTC(CNM) se genera en términos de la salida de un reloj atómico de tipo comercial de alto desempeño el cual es comparado con otros tres relojes atómicos de cesio de tipo comercial, un máser activo de hidrógeno y un patrón primario de frecuencia de bombeo óptico [4]. El reloj utilizado para la generación del UTC(CNM) se le llama también *Reloj Maestro*. En el corto plazo el UTC(CNM) será generado en términos de una escala de tiempo promediada que toma en cuenta el desempeño, no

solamente de un reloj atómico, sino de un ensamble de relojes. El UTC(CNM) provee al país de una referencia de tiempo de muy alta exactitud y estabilidad, con un nivel de sincronía con el UTC mejor que 100 nanosegundos.

3. COMPARACIÓN INTERNACIONAL DEL UTC(CNM)

Desde marzo de 1996, el UTC(CNM) se mantiene en un programa de comparación internacional con otras escalas de tiempo UTC(k) de aproximadamente 50 laboratorios primarios de metrología alrededor del mundo. Dicho programa de comparación es coordinado por el BIPM. Los resultados oficiales de la comparación del UTC(CNM) con el UTC son publicados mensualmente en la Circular T del BIPM. La técnica de vista común del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es utilizada para los efectos de dicha comparación [5]. El CENAM sigue la agenda de observaciones del BIPM para la región del Noroeste de América. Por otro lado, a partir de mayo del 2005, el CENAM participa en un programa de comparaciones en el SIM que utiliza también el sistema GPS en vista común pero incorpora receptores GPS de 8 canales [6]. Cabe indicar que los resultados de la comparación del UTC(CNM) dentro del SIM son consistentes con los resultados del BIPM publicados mensualmente en la Circular T [7].

4. RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN INTERNACIONAL DEL UTC(CNM)

La figura 1 muestra gráficamente los resultados publicados en la Circular T del BIPM entre enero del 2004 y abril del 2006, sobre las diferencias UTC – UTC(CNM). La estabilidad del UTC(CNM), medida en términos de la desviación de Allan, para tiempos de promediación de 1 año es de 1.7 partes en 10^{15} . La Figura 3 muestra los puntos de la escala UTC(CNM) sobre los cuales se ha efectuado un ajuste intencional en el corrimiento fraccional de frecuencias del reloj maestro. Cabe mencionar que en todos los casos los cambios en la desviación fraccional de frecuencia en el reloj maestro han sido menores que 2×10^{-14} . La tabla 1 muestra los valores numéricos de los corrimientos fraccionales de frecuencia efectuados en el reloj maestro y los observados en el UTC(CNM). Los valores de la desviación fraccional de frecuencia desplegada en el panel del reloj maestro, son denotados por $\langle \Delta f / f \rangle$.

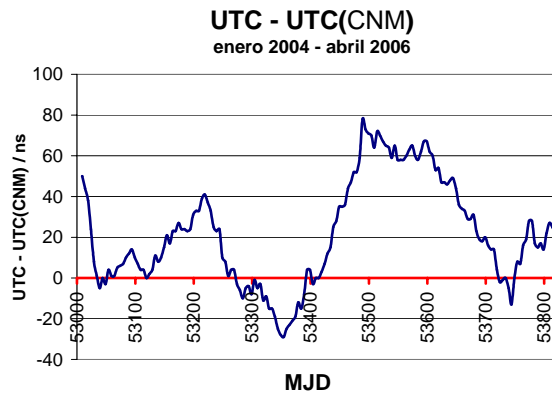


Figura 1. Resultados publicados en la Circular T del BIPM sobre la comparación del UTC(CNM) con el UTC. Los resultados mostrados corresponden al periodo que va de enero del 2004 a abril del 2006.

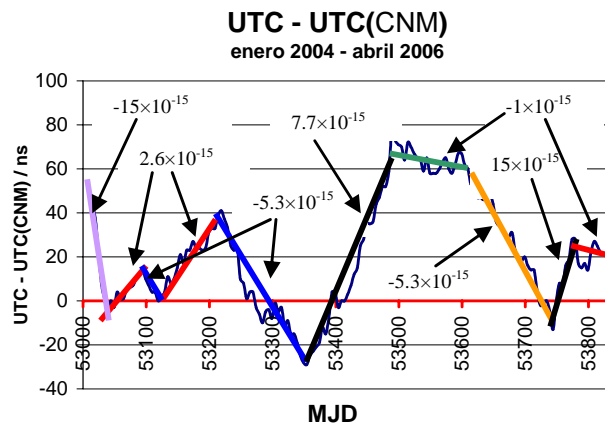


Figura 2. Desviaciones fraccionales promedio del UTC(CNM) respecto al UTC.

Las desviaciones fraccionales de frecuencia promedio del UTC(CNM) respecto al UTC son denotadas como $\langle \Delta f / f \rangle$. En ambos casos se utilizan los subíndices A y D para indicar antes y después del corrimiento de frecuencia. Finalmente, se indican como δ_p y δ_E los cambios en la diferencia fraccional de frecuencia en el reloj maestro y en el UTC(CNM), respectivamente. La figura 4 muestra las diferencias de tiempo del UTC(CNM) respecto al UTC, así como de otras escalas similares. Las diferencias de tiempo mostradas en la figura 4 son las publicadas en la Circular T del BIPM.

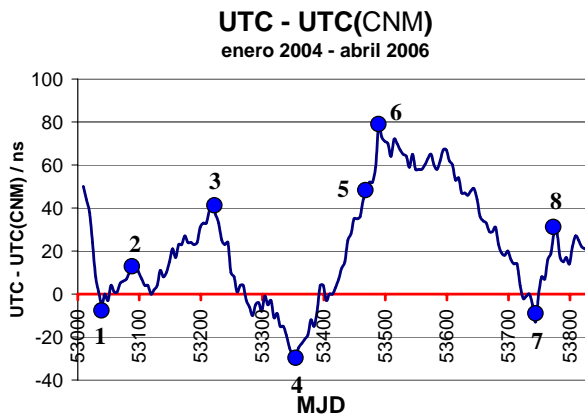


Figura 3. Puntos de la escala UTC(CNM) que indican una acción intencional sobre la desviación fraccional de frecuencia del reloj maestro.

| | Reloj Maestro / $\times 10^{-15}$ | | | UTC(CNM) / $\times 10^{-15}$ | | |
|---|---|---|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| | $\left\langle \frac{\Delta f}{f} \right\rangle_A$ | $\left\langle \frac{\Delta f}{f} \right\rangle_D$ | δ_p | $\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_A$ | $\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_D$ | δ_E |
| 1 | -139 | -146 | -7 | -15 | 2.6 | 17,6 |
| 2 | -146 | -139 | 7 | 2.6 | -5.3 | -7,9 |
| 3 | -139 | -120 | 19 | 2.6 | -5.3 | -7,9 |
| 4 | -120 | -133 | -13 | -5.3 | 7.7 | 13 |
| 5 | -133 | -127 | 6 | 7.7 | 7.7 | 0 |
| 6 | -127 | -120 | 7 | 7.7 | -1 | -8,7 |
| 7 | -120 | -133 | -13 | -5.3 | 15 | 20,3 |
| 8 | -133 | -120 | 13 | 15 | 1 | -14 |

Tabla 1. Valores numéricos de los corrimientos fraccionales de frecuencia en el reloj maestro del CENAM y en el UTC(CNM).

De la figura se aprecia que las diferencias entre el UTC(CNM) y el UTC para el periodo de tiempo entre enero del 2004 y abril del 2006 son similares a las del UTC(NPL), UTC(ROA) y las del UTC(KRIS). Por otro lado, las escalas de tiempo UTC(PTB), UTC(NRC) y UTC(OP) muestran una dispersión alrededor del UTC a largo plazo ligeramente menor que el UTC(CNM). La escala de tiempo UTC(NIST) muestra la menor dispersión tanto a corto como a largo plazo. Cabe indicar que el UTC(NIST) es generado en términos de una escala de tiempo promediada similar a la que se discute en la sección 5 de este artículo. Las estabilidades de las escalas de tiempo pueden ser medidas objetivamente usando la desviación de Allan. La figura 5 muestra la estabilidad del UTC(CNM) medida en términos de

la desviación de Allan. Excepto en una región cercana a $\tau = 6$ meses, la estabilidad del UTC(CNM) puede ser aproximada por la expresión: $\sigma_y(\tau) \approx 8 \times 10^{-12} / \sqrt{\tau}$, donde τ es el tiempo de promediación medido en segundos.

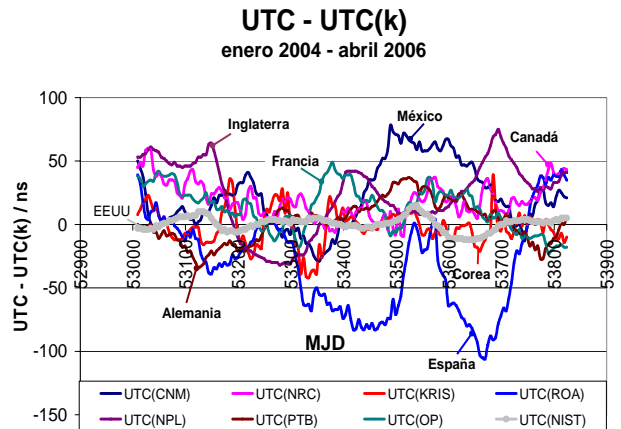


Figura 4. Diferencias de tiempo respecto al UTC de algunas escalas de tiempo UTC(k) durante el periodo entre enero del 2004 y abril del 2006.

Con el objeto de tener un marco de comparación para la estabilidad del UTC(CNM), la figura 6 muestra la estabilidad de las escalas de la figura 4. La estabilidad del UTC(CNM) es similar a la estabilidad del UTC(OP) para todos los tiempos de promediación. También es similar al UTC(KRIS) salvo para tiempos de promediación de 1 año donde el UTC(CNM) muestra mejor estabilidad. La estabilidad del UTC(NIST) permanece siempre mejor que el resto de las escalas de tiempo analizadas. Es interesante notar que, para el período de tiempo analizado, la estabilidad del UTC(CNM) difiere sistemáticamente de la estabilidad del UTC(NIST) por un factor no mayor que 5. Los resultados de estabilidad mostrados en la figura 6 han sido obtenidos utilizando directamente las diferencias de tiempo publicadas en la Circular T del BIPM.

5. RELOJ VIRTUAL DEL CENAM

La generación de escalas de tiempo promediadas se basa en un ensamble (conjunto) de relojes y un algoritmo matemático que combina de manera óptima sus características metrológicas. El resultado del algoritmo matemático es un *Reloj Virtual*. Las escalas de tiempo generadas en términos de relojes virtuales, también llamadas escalas de tiempo promediadas, tienen mejor desempeño en

confiabilidad, estabilidad y exactitud que cualquiera de los relojes participantes en el ensamble.

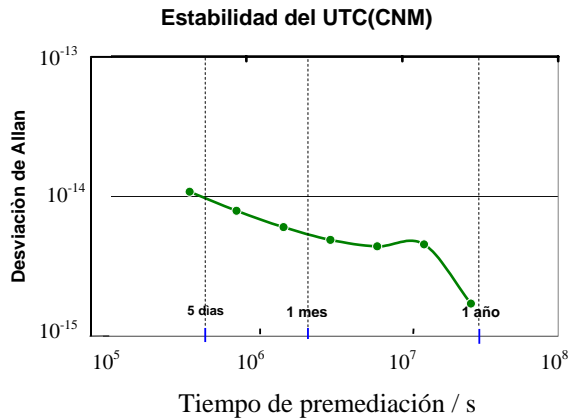


Figura 5. Estabilidad del UTC(CNM) medida en términos de la desviación de Allan.

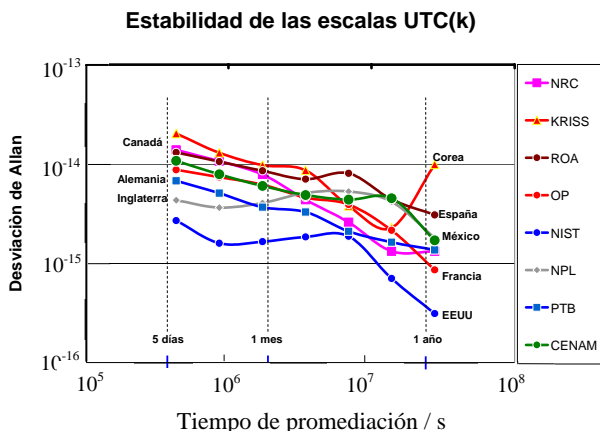


Figura 6. Estabilidades de la escala de tiempo UTC(CNM) comparada con la estabilidad de otras escalas de tiempo similares.

El algoritmo matemático detrás de una escala de tiempo promediada calcula a un tiempo t , la diferencia de tiempo entre cada uno de los relojes atómicos miembros del ensamble y el reloj virtual V . El tiempo generado por el reloj virtual V , que es el tiempo de la escala, se obtiene aplicando la corrección apropiada al tiempo de cualquiera de los relojes miembros del ensamble. La participación de cada uno de los relojes se realiza mediante la medición de la diferencia de tiempo respecto a un reloj común, denominado usualmente reloj maestro. Para el caso del reloj virtual del CENAM, las comparaciones entre los relojes del ensamble se realizan por medio de un comparador de fases no comercial de 32 canales. Dichas comparaciones están representadas en la figura 7 por medio de las

flechas sólidas. El comparador de fases realiza una medición cada segundo con una resolución de 1 picosegundo. Sin embargo cabe indicar que el ruido del comparador está al nivel de 5 picosegundos.

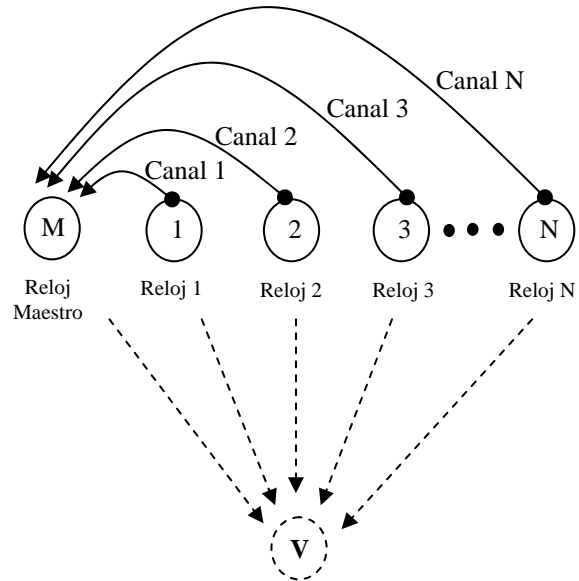


Figura 7 Diagrama esquemático de las comparaciones que toman parte en la generación del Reloj Virtual del CENAM. Las líneas sólidas representan los relojes y comparaciones reales mientras que las líneas intermitentes representan al reloj y comparaciones virtuales.

El algoritmo de la escala de tiempo promediada del CENAM, denominada también ETP-1, es similar al de la escala de tiempo promediada AT1 del NIST [8]. La ETP-1 es una escala de tiempo procesada en tiempo real. El algoritmo genera en tiempo real las diferencias de cada uno de los relojes miembros del ensamble respecto al reloj virtual. El algoritmo de la ETP-1 realiza estimaciones de la diferencia de tiempo y diferencia de frecuencia entre cada uno de los miembros del ensamble y el reloj virtual en cada ciclo de medición. Dicho ciclo de medición en la ETP-1 puede ser elegido entre un segundo y 1 día. El algoritmo de la ETP-1 utiliza 4 ecuaciones fundamentales para la generación del reloj virtual, a saber:

$$\bar{X}_i(t + \tau) = X_i(t) + \left[Y_i(t) + \frac{D_i \tau}{2} \right] \tau$$

$$X_i(t + \tau) = \sum_{j=1}^N w_j [\bar{X}_j(t + \tau) - X_{ji}(t + \tau)]$$

$$\bar{Y}_i(t + \tau) = \frac{X_i(t + \tau) - X_i(t)}{\tau}$$

$$Y_i(t + \tau) = \frac{\bar{Y}_i(t + \tau) + m_i Y_i(t)}{1 + m_i}$$

Aquí $\bar{X}_i(t + \tau)$ es la predicción de la diferencia de tiempo del reloj i -ésimo respecto al reloj virtual V para el tiempo $t + \tau$, $X_i(t)$ es la diferencia de tiempo del reloj i -ésimo respecto al reloj virtual al tiempo t , $Y_i(t)$ es la frecuencia del reloj i -ésimo al tiempo t , la constante D_i es el corrimiento de frecuencia del reloj i -ésimo respecto al reloj virtual V , τ es el ciclo de iteración. Los subíndices toman valores desde 1 hasta N , donde N es el número de relojes que participan en la generación de la escala de tiempo ETP-1. w_j es el peso del reloj j -ésimo. Cabe indicar que los pesos están normalizados, esto es, $\sum_{i=1}^N w_i = 1$. La elección de los valores específicos

para los pesos w_i se hace por medio de la relación $w_i \propto 1/\sigma_i$, donde σ_i es la desviación de Allan del

reloj i -ésimo estimada para un tiempo de promediación de 1 día. $\bar{Y}_i(t + \tau)$ es la predicción de la diferencia de frecuencia promedio del reloj i -ésimo. Finalmente, la constante m_i es estimada en función de la mejor estabilidad para cada reloj. Con el objeto de transformar el reloj virtual V en un reloj real, se ha introducido, con peso cero, un *Microphase Steper* (MPS) al ensamble de relojes cuya entrada es la frecuencia del Maser. El algoritmo de la ETP-1 mide las diferencias fraccionales, con tiempos de promediación que van desde una hora hasta 1 día, entre la salida del MPS y el reloj virtual V y utiliza dicha información para corregir de manera automática la frecuencia del Maser. De esta forma la ETP-1 incorpora un control automático para igualar la frecuencia de la salida del MPS a la frecuencia del reloj virtual. Ver figura 8.

6. CONCLUSIONES

La escala de tiempo UTC(CNM) se genera de manera ininterrumpida desde marzo del 1996. Las diferencias de tiempo entre el UTC(CNM) y el UTC se mantienen sistemáticamente por debajo de 100 ns desde marzo del 2003. Se ha desarrollado en el CENAM un algoritmo que permite operar un reloj virtual el cual a su vez establece la plataforma para generar el UTC(CNM) en términos de la frecuencia corregida de un Maser activo de Hidrógeno.

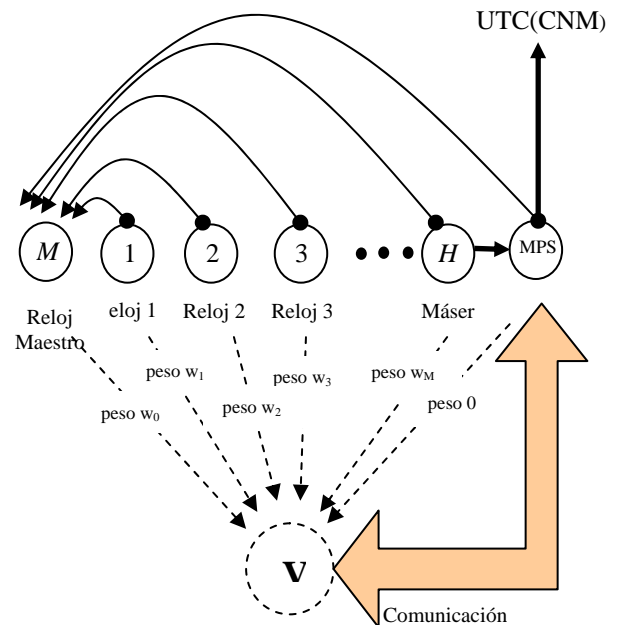


Figura 8. Ensamble de relojes para la generación del UTC(CNM) en términos del reloj virtual V .

REFERENCIAS

- [1] Terry J. Quinn, "The BIPM and the Accurate Measurement of Time", Proc. of the IEEE, Vol. 79, No. 7, July 1991, pp 894 – 905.
- [2] Circular T 100 del BIPM.
- [3] J. M. López-Romero et al, "First Year Results of the Internacional Comparison of the UTC(CNM)", Proc. of the 1997 IEEE International Frequency Control Symposium, pp. 404 – 407.
- [4] Iván Domínguez et al, "Primer Reloj Atómico Construido en América Latina: Evaluación de Errores Sistemáticos", Memorias del Simposio de Metrología 2001, Querétaro, México.
- [5] Allan D., Weiss M., "Accurate Time and Frequency Transfers During Common-view of GPS Satellite", Proc 1980 International Frequency Control Symposium, pp. 334 – 346.
- [6] J.M. López-Romero et al, "SIM Time and Frequency Comparison Network in Near Real Time", Simposio de Metrología 2006.
- [7] Michael Lombardi et al, "The Inter-American Metrology System (SIM) Common -View GPS Comparison Network", <http://tf.nist.gov/general/pdf/2089.pdf>
- [8] Marc A. Weiss and Thomas P. Weissert, "TA2, A Time Scale Algorithm for Post-Processing: AT1 Plus Frequency Variance", IEEE Trans. Instr. and Meas., Vol. 40, No. 2, April 1991, pp. 496 – 501.