

EL UTC(CNM): NUEVO ESQUEMA DE GENERACIÓN

N. Díaz Muñoz, F. Jiménez Tapia, M. López Romero
 División de Tiempo y Frecuencia, Centro Nacional de Metrología
 km. 4.5 Carretera a los Cués, El Marqués, Querétaro
 Teléfono 01 (442) 211 0543, ndiaz@cenam.mx

Resumen: El Tiempo Universal Coordinado, UTC, es la referencia internacional de tiempo, su generación se encuentra en constante mantenimiento y está a cargo del Bureau International des Poids et Mesures, BIPM. El UTC es una escala de tiempo virtual, donde poco más de medio centenar de laboratorios alrededor del mundo mantienen una realización local de esta escala contribuyendo a su generación. En México se genera la escala denominada UTC(CNM) mantenida por la División de Tiempo y Frecuencia del Centro Nacional de Metrología (CENAM). A partir del 1 de Octubre de 2009 el UTC(CNM) se realiza en términos de un reloj virtual. En este trabajo se expone el esquema de generación del UTC(CNM) en términos de una escala de tiempo promediada, asimismo se presenta el análisis del desempeño del UTC(CNM), mostrando sus características de estabilidad y exactitud.

1. INTRODUCCIÓN

Una escala de tiempo es el resultado de integrar unidades de tiempo de manera continua, infinita y ordenada. Existen muchas escalas de tiempo empleadas en diversas aplicaciones, en particular, mencionaremos algunas relacionadas con la referencia internacional de tiempo:

a) La escala de Tiempo Universal (UT1), es una escala de tiempo astronómica, donde la unidad básica se define y se mide en términos de los movimientos de rotación y traslación de la Tierra.

b) La escala de Tiempo Atómico Internacional (TAI), en esta escala hay coincidencia para definir la unidad básica con la definición del Sistema Internacional de unidades (SI) y se genera por el BIPM.

c) La escala de Tiempo Universal Coordinado (UTC), se genera también por el BIPM en base al TAI y al UT1, esto se cumple de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$UTC - TAI = n \quad (1)$$

$$|UTC - UT1| \leq 0,9 \text{ s} \quad (2)$$

Donde n es un número entero de segundos. En la ecuación (1) se establece que la diferencia entre el UTC y el TAI es siempre igual a un número entero de segundos. En la ecuación (2) se restringe al UTC para que no difiera del UT1 más de 0,9 segundos. La determinación del valor de n y el momento en

que se debe modificar este valor, se determina por el International Earth Rotation Service and Reference System (IERS).

El BIPM recibe datos de escalas de tiempo provenientes de diversos laboratorios de metrología ubicados alrededor del mundo y así generar el UTC, sin embargo el UTC no puede utilizarse directamente en aplicaciones industriales y técnicas debido que es el resultado numérico de un algoritmo matemático. Las escalas de tiempo que contribuyen al UTC, generadas por los diversos laboratorios de metrología [1], son de gran importancia debido a que son justamente éstas las que se utilizan en las aplicaciones directas en la industria y en la tecnología. Estas realizaciones del UTC locales se identifican como UTC(k), donde k indica el acrónimo del laboratorio que genera la escala. Para el CENAM, $k = \text{CNM}$, por consiguiente la escala generada se denomina UTC(CNM).

2. DESCRIPCIÓN DEL UTC(CNM)

2.1 Antecedentes del UTC(CNM)

En marzo de 1996 el CENAM se agregó al conjunto de laboratorios que contribuyen en la generación del UTC [2], en aquel mismo año el CENAM inició la generación de la escala de tiempo real UTC(CNM) de la cual se deriva la hora del día para los tres husos horarios del país. Desde el año 1996 hasta septiembre de 2009 el UTC(CNM) fue generado por un solo reloj de Cesio, denominado Reloj Maestro, siendo el reloj con mejor desempeño del conjunto de relojes atómicos que operan en los laboratorios

de la División de Tiempo y Frecuencia del CENAM. Para asegurar el buen desempeño del UTC(CNM) el reloj maestro se mantenía en comparación interna permanente con todo el grupo de relojes atómicos. Esta comparación se llevaba a cabo a través de la técnica denominada Comparación de Fase por Doble Mezclador [2]. Bajo este esquema se realizaba una medición de fase de las señales de 5 MHz de cada par de relojes atómicos cada segundo, las 24 horas del día, todos los días. Con dichas mediciones era posible estimar la estabilidad en frecuencia de cada reloj atómico y conocer a su vez su desempeño, permitiendo determinar cuál del conjunto de relojes era el mejor y así definirlo como reloj maestro.

A partir del 1 de octubre de 2009 y hasta la fecha, el UTC (CNM) se realiza con la contribución de todos los relojes atómicos del CENAM, utilizando un algoritmo matemático que permite combinar las mejores características metrológicas de cada reloj generando de esta manera una escala de tiempo promediada. Este esquema de generación de escalas de tiempo promediadas ha sido implementado recientemente en algunos de los laboratorios que de igual manera contribuyen en la generación del UTC.

2.2. Comparación Internacional del UTC(CNM)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [3] es un sistema satelital operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para fines de defensa y navegación principalmente, el cual también se usa como un sistema intermediario para la transferencia de tiempo de muy alta exactitud. El sistema GPS consta de 24 satélites distribuidos en 6 orbitas, con 4 satélites por órbita. Dichas órbitas son semisíncronas con periodos de 11h58 minutos, cada órbita a 55° de inclinación respecto al plano ecuatorial con 22 000 km de radio (4.2 veces el radio de la tierra). El sistema GPS transmite en dos portadoras ubicadas en la banda L, a saber: 1.57542 GHz y a 1.2276 GHz. La emisión se hace utilizando técnicas de espectro disperso lo que hace que la transmisión sea resistente a interferencias naturales e inducidas permitiendo a su vez que la señal de los satélites esté siempre presente en cualquier punto de la tierra. Las señales emitidas por el sistema GPS se generan por relojes atómicos a bordo en cada satélite. Entre las múltiples aplicaciones del GPS se encuentra la de medición de tiempo ya que el sistema opera bajo principios de sincronía. Parte de la información que envían los

satélites es el tiempo de la escala *GPS-time*, la cual es una escala de tiempo propia del sistema.

Una de las técnicas más usadas en la comparación de escalas de tiempo, que están físicamente separadas grandes distancias, es la denominada *técnica de vista común del sistema GPS*.



Fig. 1 Representación gráfica de la técnica de vista común del sistema GPS.

Dicha técnica opera básicamente de la siguiente manera:

- i) Tanto el laboratorio A como el laboratorio B realizan mediciones simultáneas de diferencia de tiempo entre su escala de tiempo local y un mismo satélite del sistema GPS.
- ii) Ambos laboratorio convienen previamente una agenda común para las observaciones.
- iii) Intercambio de las mediciones realizadas por cada laboratorio. Las mediciones de diferencia de tiempo Δt_{A-S} al tiempo t que realiza el laboratorio A con el satélite S pueden escribirse como

$$\Delta t_{A-S}(t) = T_A(t) - T_{GPS}(t) - D_A \quad (3)$$

donde $T_{GPS}(t)$ es el tiempo del sistema GPS al instante t , mientras que $T_A(t)$ es el tiempo del laboratorio A al mismo instante t , D_A es la suma de retardos en la propagación de la señal del satélite S hasta el receptor en el laboratorio A. De manera similar, las mediciones que realiza el laboratorio B pueden expresarse como:

$$\Delta t_{B-S}(t) = T_B(t) - T_{GPS}(t) - D_B \quad (4)$$

Tomando las diferencias de las mediciones del laboratorio A y del laboratorio B se tiene la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \Delta T_{A-B}(t) &= \Delta T_{A-S}(t) - \Delta T_{B-S}(t) \\ &= T_A(t) - T_B(t) - (D_A - D_B) \end{aligned} \quad (5)$$

Es decir, la contribución del GPS en la ecuación 5 se cancela (al nivel de los nanosegundos) permaneciendo solamente las diferencias de tiempo entre los laboratorios A y B. Los retardos D_A y D_B son función de la posición de los satélites al momento de la comparación, así como de la posición de las antenas GPS de los laboratorios y de los retardos internos de cada receptor GPS. Con esta técnica es posible hacer comparaciones de escalas de tiempo entre pares de laboratorios con incertidumbres del orden de los nanosegundos[4].

2.3. El nuevo esquema de generación UTC(CNM).

La generación de la Escala de Tiempo Promediada implantada en el CENAM desde Octubre de 2009, está basada en un conjunto de relojes atómicos y un algoritmo matemático que combina las características metrológicas de cada reloj participante, la conjunción de estos dos elementos da como resultado la obtención de un Reloj Virtual o escala de tiempo promediada y de esta forma se puede tener un mejor desempeño en confiabilidad, estabilidad y exactitud de lo que puede arrojar por sí solo cada reloj.

El algoritmo responsable de la generación de la Escala de Tiempo Promediada fue denominado ETP-1. El algoritmo calcula a un tiempo t , las diferencias de tiempo de cada uno de los relojes participantes y el Reloj Virtual (RV). El tiempo generado por el Reloj Virtual, se obtiene aplicando la corrección apropiada al tiempo de cualquiera de los relojes que participan en la ETP-1. Cada reloj participa mediante la medición de la diferencia de tiempo respecto a un reloj común denominado reloj maestro. En los laboratorios de Tiempo y Frecuencia del CENAM, se realiza la comparación entre relojes por medio de un comparador de fases de 32 canales. El comparador de fases realiza una medición cada segundo con una resolución de 1 pico segundo y emplea la técnica de medición denominada doble mezclador.

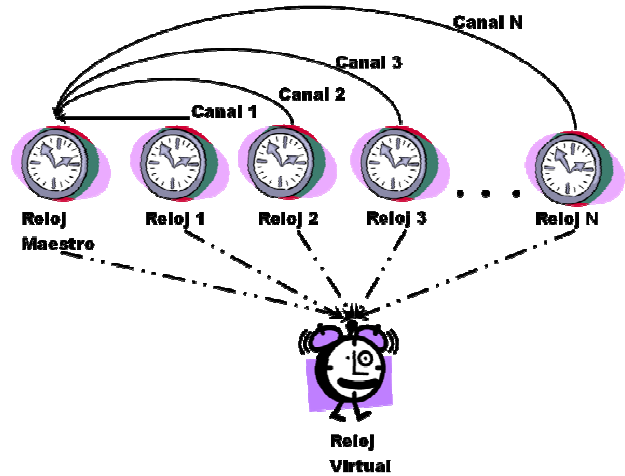


Fig. 2 Diagrama representativo de la generación del Reloj Virtual, en donde las líneas solidas son los relojes y comparaciones reales en tanto que las líneas intermitentes son las comparaciones de cada reloj atómico con el reloj virtual.

El algoritmo de la ETP-1 está conformado de 4 ecuaciones, como se muestran a continuación:

$$\hat{X}_i(t + \tau) = X_i(t) + \left[Y_i(t) + \frac{D_i \tau}{2} \right] \tau \quad (6a)$$

$$X_i(t + \tau) = \sum_{j=1}^N w_j [\hat{X}_j(t + \tau) - X_{ji}(t + \tau)] \quad (6b)$$

$$\hat{Y}_i(t + \tau) = \frac{\hat{X}_i(t + \tau) - X_i(t)}{\tau} \quad (6c)$$

$$Y_i(t + \tau) = \frac{\hat{Y}_i(t + \tau) + m_i Y_i(t)}{1 + m_i} \quad (6d)$$

- Donde $\hat{X}_i(t + \tau)$ es la predicción de la diferencia de tiempo del reloj i -ésimo respecto al reloj virtual para el tiempo $t + \tau$.
- $X_i(t + \tau)$ es la diferencia de tiempo del reloj i -ésimo respecto al reloj virtual al tiempo t .
- La constante D_i es el corrimiento de frecuencia del reloj i -ésimo respecto al reloj virtual.

- 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 promediada.
- w_j es el peso del reloj j-ésimo. Los pesos están normalizados, esto es, $\sum_{i=1}^N w_i = 1$. La determinación de los valores de 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.
- $\hat{Y}_i(t + \tau)$ es la predicción de la diferencia de frecuencia promedio del reloj i-ésimo.
- $Y_i(t + \tau)$ es la diferencia de frecuencia del reloj i-ésimo.
- La constante m_i es estimada en función de la mejor estabilidad para cada reloj.

Con el algoritmo matemático descrito anteriormente se ha implantado en la División de Tiempo y Frecuencia del CENAM la escala de tiempo promediada. Inicialmente se contaba con 4 relojes de Cesio y 1 máser activo de hidrógeno, actualmente dos de estos relojes de Cesio han sido retirados. La escala se calcula cada hora teniendo una asignación de pesos dinámica.

Con el propósito de que la escala de tiempo se convierta en una escala real se utiliza un Micro Phase Steeper (MPS), el cual recibe la instrucción de corrección del algoritmo que calcula el reloj virtual y modifica una de las señales de frecuencia del máser de hidrógeno cada vez que se calcula la escala de tiempo, es decir cada hora. La señal originada por el máser de hidrógeno y modificada por el MPS es la llamada UTC(CNM). La salida del MPS se utiliza como otro reloj que participa en la generación de la escala con el objeto de retroalimentar las diferencias de tiempo entre la salida del MPS y la escala. El MPS se controla de manera que las diferencias de tiempo entre la salida del MPS y la escala permanezcan constantes. El MPS participa en la generación de la escala con peso 0, esta descripción se representa en el siguiente esquema.

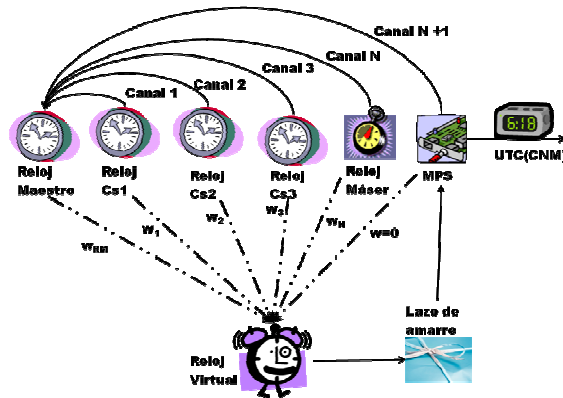


Fig. 3 Esquema que ilustra la nueva implementación de la generación del UTC(CNM).

Cabe mencionar que la implantación del Reloj Virtual se realizó con medios informáticos, con esto se quiere decir que el algoritmo matemático ETP-1 y el control que se realiza sobre el MPS para corregir la señal del Máser de Hidrogeno proceden de un software que se describe a continuación.

El software tiene por nombre ESTIV que quiere decir **E**scala de **T** tiempo **V**irtual, se desarrolló en Delphi 2010 y consta de 6 módulos principales:

1. ESTIV_Adquisición: Este programa realiza la adquisición de diferencias de tiempo entre el reloj maestro y los relojes que participan en la generación del reloj virtual, la comunicación entre el comparador de fase y la computadora que ejecuta el software es RS-232 y cada segundo es adquirida una medición.



Fig. 4 Pantalla del programa de adquisición.

- ESTIV_Fase_Acumulada: Por la naturaleza de las mediciones que se obtienen del comparador de fase, la función de este programa es como su nombre lo indica, realizar la frase acumulada de las mediciones del comparador de fase para que estos datos sean utilizados en la generación del reloj virtual.



Fig. 5 Pantalla del programa de fase acumulada.

- ESTIV_ETP-1: Este programa se encarga de generar el reloj virtual, el cálculo lo realiza cada hora empleando las cuatro ecuaciones descritas anteriormente. También en este programa se realiza la asignación de pesos de manera automática a partir de la determinación de las estabilidades de las diferencias entre el reloj virtual y cada uno de los relojes participantes. En este modulo también se obtiene el valor del corrimiento en frecuencia que se emplea para controlar el MPS.

- ESTIV_Corrimiento: Este programa manda un comando al MPS para realizar el corrimiento de frecuencia, la comunicación es RS-232 y el corrimiento se realiza cada hora.

- ESTIV_Grafico: Este programa se encarga de mostrar gráficamente las diferencias de tiempo entre el reloj maestro y los demás relojes, los datos de fase acumulada, los resultados de la escala de tiempo

promediada y muestra gráficos de estabilidad.



Fig. 6 Pantalla del programa de ETP-1.



Fig. 7 Pantalla del programa de corrimiento de datos.



Fig. 8 Pantalla del programa de gráficos.

- ESTIV_Alarma. Este programa se encarga de monitorear los datos de fase acumulada,

en caso de existir alguna discontinuidad en los datos el programa envía correos electrónicos avisando de esta irregularidad en los datos para que los usuarios tomen las medidas pertinentes y que el evento no afecte la generación de la escala.



Fig. 9 Pantalla del programa dealarma.

3. RESULTADOS

En la figura 10 se muestra una gráfica de las diferencias de tiempo entre el UTC y algunas de las mejores escalas de tiempo de diversos laboratorios nacionales. Al centro de la gráfica se muestra una línea color blanco que representa la fecha en la cual se realizó el cambio de esquema en la generación de la escala de tiempo UTC(CNM) (línea azul). Como se puede observar el grafico correspondiente al UTC(CNM), la dispersión de los datos del lado del nuevo esquema comparándolo con el anterior presenta una menor amplitud.

Del gráfico de las diferencias de tiempo de la figura 10 se calcularon las estabilidades para cada laboratorio. En las figuras 11 y 12 se presentan los gráficos de las estabilidades de los UTC(k) a modo de comparar el anterior y el nuevo esquema de generación del UTC(CNM). Cabe recalcar que las escalas de tiempo de los diferentes laboratorios mostradas en las gráficas anteriores son escalas de tiempo promediadas. En el grafico de la figura 11 se puede observar claramente la diferencia para tiempos de promediación grandes del UTC(CNM) generado con el antiguo esquema respecto a los demás UTC(k)'s.

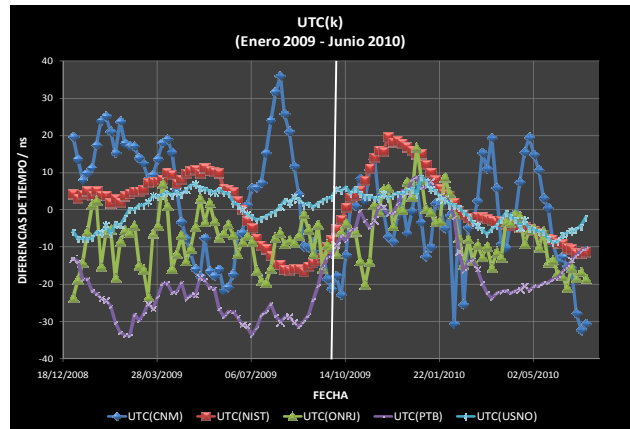


Fig.10 Comparación de las diferencias de tiempo entre las mejores escalas de tiempo respecto al UTC, en el periodo comprendido entre el 1ro de enero de 2009 al 26 de junio de 2010.

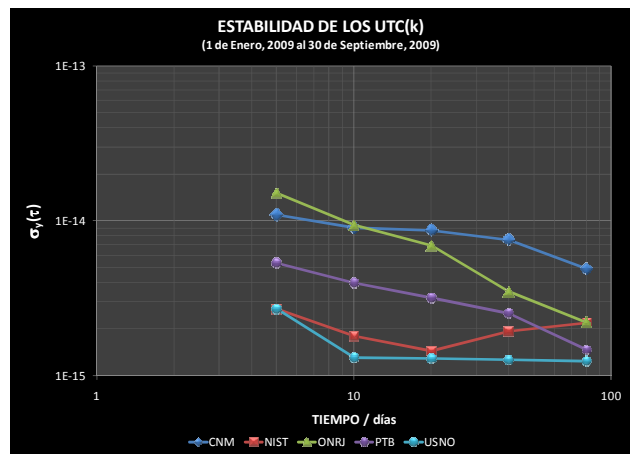


Fig. 11 Grafico de las estabilidades de los UTC(k) desde el 1 de enero de 2009 hasta el 30 de septiembre de 2009.

Por otro lado, de las estabilidades mostradas en la figura 12 se puede observar que hay una mejoría en la ventana de observación de 80 días, para el caso del UTC(CNM) definido en términos de una escala de tiempo promediada, justamente el comportamiento que se espera para este tipo de escalas en los largos periodos de tiempo.

En la figura 13 se muestra un comparativo de la estabilidad del UTC(CNM) entre ambos esquemas de generación. Se puede observar que para tiempos de promediación menores a 30 días el antiguo esquema presenta mejor estabilidad que el nuevo esquema, sin embargo para ventanas de

observación mayores el nuevo esquema posee mejor estabilidad que el antiguo esquema de generación.

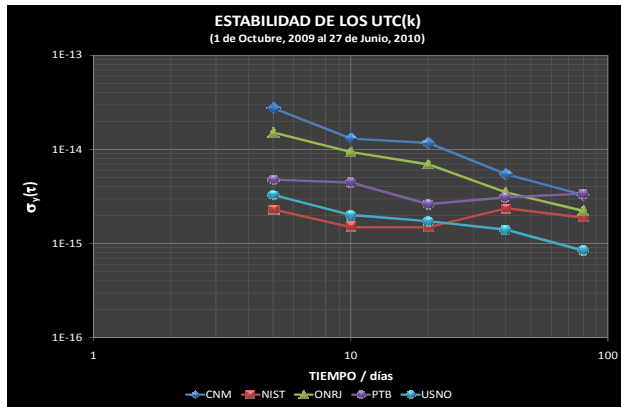


Fig.12 Gráfico de las estabildades de los UTC(k) desde el 1 de octubre de 2009 hasta el 27 de junio de 2010.

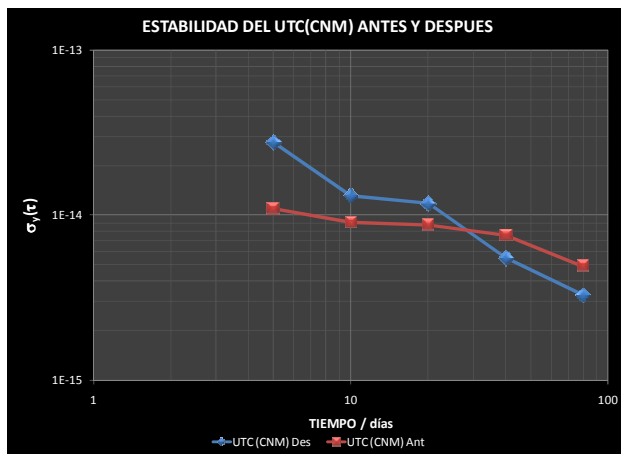


Fig. 13 Gráfico comparativo de las estabildades del UTC(CNM) con el antiguo esquema y el nuevos esquema.

4. CONCLUSIONES

Se presentó el nuevo esquema de generación del UTC(CNM) en función de un reloj virtual. Éste utiliza un conjunto de relojes y un algoritmo matemático que combina las características metrológicas de cada reloj, obteniendo un reloj virtual el cual tiene mejor desempeño que cualquiera de los miembros del conjunto. Se mostró el sistema informático que componen al reloj virtual, el cual está dividido en módulos para una mejor ejecución. Se llevo a cabo un comparativo del desempeño del UTC(CNM) con

el nuevo esquema respecto al esquema anterior, el cual se basaba solo en un reloj para su generación. Se mostro que el UTC(CNM) generado a partir de una escala de tiempo promediada presenta mejor estabilidad para tiempos de promediación de un mes o más.

Finalmente cabe hacer notar que para la realización de la escala de tiempo promediada se inició con 4 relojes de Cesio y un máser de hidrógeno. Durante este periodo dos de los relojes de Cesio se retiraron del conjunto debido al término de su vida útil. Este cambio se hace notar con un incremento en la amplitud de la dispersión en las mediciones de las diferencias de tiempo del UTC(CNM) respecto al UTC, tal y como se puede constatar en la gráfica de la figura 10. En un futuro inmediato se tiene contemplado la restitución de estos relojes, esperando mejorar el desempeño del UTC(CNM).

AGRADECIMIENTOS

En general a toda la División de Tiempo y Frecuencia del CENAM.

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] 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.
- [3] W. Lewandowski and C. Thomas, "GPS time transfere", Proc. Of the IEEE, Vol 79, No 7 Julio 1991.
- [4] F. Jiménez Tapia, J. M. López Romero, "Evaluación del comportamiento del UTC(CNM)", Simposio de Metrología 2008.