

TIEMPO LUNAR COORDINADO: ¿ACASO E. T. NECESITA DISPONER DE RELOJ?

Sergio BORRALLO TIRADO



Introducción



N abril de 2024 aparecieron diferentes noticias en la prensa y la televisión que trataban sobre un asunto fascinante pero que puede sonarle bastante extraño a alguien ajeno a la ciencia: resulta que la NASA había recibido el encargo por parte de la Casa Blanca de presentar, para finales de 2026 como muy tarde, un plan para la creación de un «Tiempo Lunar Coordinado» (LTC, por sus siglas en inglés).

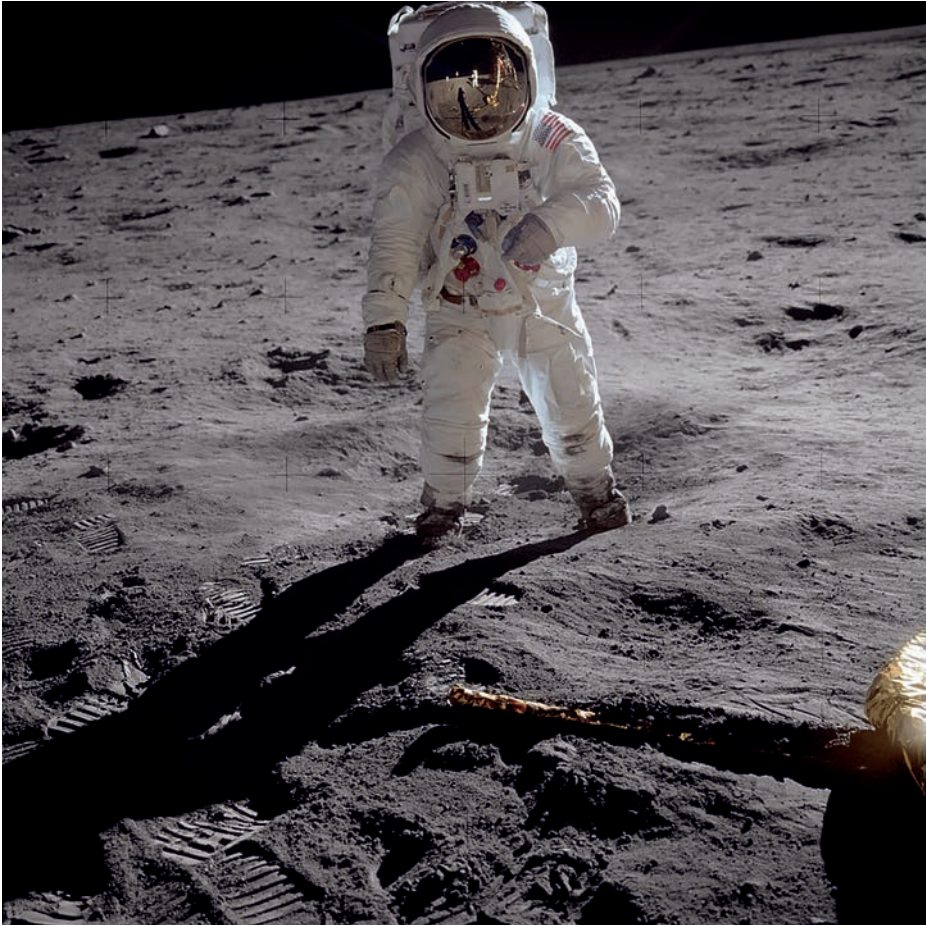
Como lamentablemente suele ocurrir en los medios de comunicación no especializados cuando hablan sobre temas científicos o técnicos, mucha de la información que se pudo oír y leer sobre esta futura nueva escala de tiempo LTC estaba compuesta de medias verdades y, en algunos casos, de absolutas falsedades. En diversas noticias se citaban

términos como «husos horarios» o «zonas horarias» y otras inexactitudes varias que nada, o muy poco, tienen que ver con el asunto en cuestión y, en general, el tema se trató con escaso rigor científico.

En este artículo voy a intentar explicar, de manera breve y sencilla, qué es eso de la hora lunar, qué utilidades y ventajas puede presentar y, sobre todo, por qué nos queremos complicar la vida creando nuevas escalas de tiempo aparentemente tan extrañas. «Tiempo Lunar Coordinado»... ¿acaso los extraterrestres necesitan tener su hora propia? Vamos a verlo.

La Luna vuelve a estar de moda

Empecemos aportando algo de contexto. Las primeras actividades espaciales se desarrollaron a mediados del siglo XX. Lo que inicialmente comenzó con el lanzamiento de satélites artificiales culminó, años más tarde, con uno de los hitos más importantes en la historia de la humanidad: la llegada del primer ser humano a la Luna. Ese viaje estuvo motivado, es bien sabido, más por razones políticas (la carrera espacial y la competitividad extrema entre Estados Unidos y la URSS) que por causas justificadas de necesidad científica. Por



Buzz Aldrin en la Luna en una foto tomada por Neil Armstrong durante la misión Apollo 11.
(Foto: www.wikipedia.org)

ello, después de la del Apollo 11 en 1969, hubo un puñado más de misiones en la Luna, pero fueron perdiendo importancia e interés. Esto fue debido, principalmente, a que el coste de estas empresas es desorbitado, mientras que los beneficios realistas que se pueden obtener, desde el punto de vista científico, técnico o económico, no son muy elevados, por lo que se consideró que las misiones lunares no eran una prioridad en la que gastar ingentes recursos humanos y económicos.

Sin embargo, a raíz del Programa Artemis de la NASA, que comenzó hace relativamente pocos años, se ha revitalizado muchísimo el interés por las misiones lunares y está previsto, a medio plazo, establecer una presencia mucho más regular en la Luna y sus proximidades. Esto no sólo incluiría nuevos viajes lunares por parte de seres humanos, sino que la idea es realizar una expansión más permanente y global, incluso desplegando infraestructura e instrumentos varios de manera progresiva.

Entre los múltiples y diferentes retos tecnológicos y científicos a los que estas futuras misiones se van a tener que enfrentar, hay una complicación extra, que puede parecer insignificante pero que en realidad es de suma importancia, y es que, por motivos que veremos más adelante, los relojes en la Luna funcionan de manera ligeramente diferente que en la Tierra.



Logo del Programa Artemis de la NASA.
(Foto: www.wikipedia.org)

El tiempo: una magnitud más extraña de lo que parece

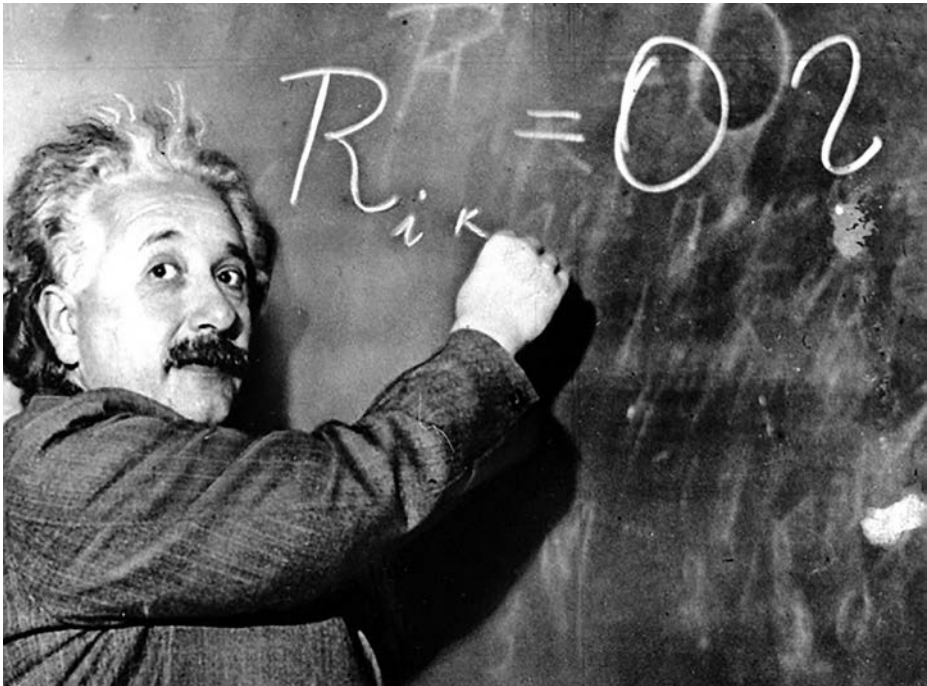
El origen de todo este asunto está en que el tiempo es una magnitud física absolutamente fascinante, que se comporta de manera singular en según qué situaciones, y que en general no es tan fácil de medir como uno podría pensar *a priori*.

Evidentemente, todo el mundo sabe lo que es el tiempo, o al menos tiene una idea subjetiva de ello; al fin y al cabo, es parte fundamental de nuestras vidas. Pero a poco que uno se interese por este tema, se dará cuenta de que en

realidad el tiempo, como magnitud física, es bastante complicado de definir y más aún de comprender en su totalidad. De la manera en el que lo experimentamos subjetivamente con nuestros sentidos, parece algo así como una sucesión de eventos que ocurren de forma ordenada y sucesiva, que fluyen en una única dirección y constante. Es decir, nuestro cerebro percibe que, en apariencia, el tiempo sólo avanza «hacia el futuro» y que lo hace con una «velocidad constante». Pero, ¿esto es realmente así?

No voy a discutir en este artículo la linealidad y direccionalidad del tiempo. Hablar sobre estos temas nos llevaría a pantanosas, aunque francamente fascinantes, áreas que son limítrofes entre teorías científicas muy complejas y la ciencia ficción. Lo que es seguro es que, a día de hoy, para nuestra actividad diaria y en lo que a nivel tecnológico nos afecta, podemos considerar el tiempo como una línea que avanza en una única dirección. Hacia el futuro, vamos. Por desgracia, me temo que no veremos ni a corto ni a medio plazo a Marty McFly emergiendo del *DeLorean* junto al entrañable doctor Emmett Brown.

Pero la «velocidad» con la que avanza, querido lector, es otra historia que sí nos afecta, y mucho, en nuestro día a día, aunque no seamos conscientes de



Albert Einstein. (Foto: www.wikipedia.org)

ello. Nuestros sentidos nos hacen percibir el paso del tiempo como una constante; es decir, nos da la impresión de que pasa a la misma «velocidad», al mismo ritmo, en todo momento y lugar, pareciendo además esta percepción lógica y coherente con nuestra rutina diaria. Es natural pensar que dos relojes igual de precisos y perfectamente calibrados medirán el mismo paso del tiempo ya estén en Madrid o en Pekín, ya sea hoy, ayer o mañana, estén en reposo o en movimiento. Pero, ¿es realmente así? Es decir, ¿es la «velocidad» con la que pasa el tiempo una constante universal? O, dicho de otro modo, ¿perciben dos relojes, o dos observadores, el mismo paso del tiempo, estén donde estén, se muevan como se muevan? La respuesta, por sorprendente que parezca, se conoce ya desde hace más de un siglo gracias a posiblemente el físico más famoso de la historia, Albert Einstein: no, el tiempo no pasa igual en todos lados y para todo el mundo, lo que se resume con su famosísima frase «el tiempo es relativo».

Dilatación temporal: no es ciencia ficción, aunque lo parezca

Einstein, con su Teoría de la Relatividad Especial, introdujo un concepto revolucionario conocido como «dilatación del tiempo», que establece que la velocidad a la que pasa el tiempo (o, dicho de otra manera, la velocidad con la que un observador lo percibe) depende de dos factores:

- *La velocidad relativa entre dos observadores (Teoría de la Relatividad Especial)*. Un observador/reloj que se mueve a una velocidad muy elevada registrará el paso del tiempo de forma más lenta que otro observador/reloj que se mueva más despacio. Un ejemplo de la cultura popular donde aparece este efecto es en la película *El planeta de los simios*, de 1968. En ella, los protagonistas viajan durante varios meses a velocidades cercanas a la luz, en un viaje estelar. Cuando vuelven a la Tierra, la encuentran totalmente cambiada y a los humanos dominados por una raza de monos de alta inteligencia. Esto es debido a que en la Tierra en realidad han pasado 2.000 años por efecto de la dilatación temporal, mientras que para ellos ha transcurrido muchísimo menos tiempo. ¡Ojo! Evidentemente con esto no se quiere decir que una persona pueda vivir más años que otra si viaja a una velocidad próxima a la de la luz. Ambos observadores (el que se mueve más rápido y el que lo hace más despacio) vivirán en promedio su esperanza de vida, ni un segundo más.
- *El campo gravitatorio en el que se encuentre el reloj y/o el observador (Teoría de la Relatividad General)*. Observadores/relojes en campos gravitatorios muy intensos registran el paso del tiempo de una manera mucho más lenta, y viceversa. Esto se puede ver, por ejemplo, en la

película *Interstellar*, de Christopher Nolan, en la cual los protagonistas viajan cerca de agujeros negros y aterrizan en planetas de gravedad muchísimo más elevada que la terrestre, lo que hace que para ellos el tiempo pase mucho más despacio de lo que pasa en la Tierra. Todos nos acordamos de la emotiva escena de Cooper cuando visita en el hospital a su hija Murph, ahora una anciana mucho mayor que su padre... Todo ello se debe a la dilatación temporal. Al igual que he comentado antes, Cooper no vivió, ni vivirá, más años de los que le corresponden; pero mientras que para él sólo han transcurrido varios meses de misión espacial (y ha percibido el paso del tiempo como absolutamente normal), para su hija han pasado decenas de años (cuyo transcurso ella ha percibido también de manera absolutamente normal).

Es evidente que las consecuencias de la dilatación temporal por efectos relativistas son fácilmente apreciables para relojes/observadores que se mueven a velocidades muy, muy altas (cercanas a la velocidad de la luz) y en campos gravitatorios muy fuertes (cientos o miles de veces más potentes que el campo gravitatorio terrestre). Por lo tanto, en nuestro día a día, con objetos que se mueven moderadamente despacio en campos gravitatorios suaves, los efectos relativistas no son apreciables y se pueden considerar como despreciables en la mayoría de las ocasiones. Pero no siempre. La ciencia y la tecnología hacen uso en la actualidad de cálculos e instrumentos tan extremadamente precisos que incluso los efectos relativistas más minúsculos pueden afectar, y mucho, a su correcto funcionamiento.

Un ejemplo muy claro de esto lo encontramos en los satélites GPS. La manera en la que funciona este sistema exige que la hora del satélite sea muy, muy precisa. Esto es debido a que los GPS funcionan con señales que se mueven a la velocidad de la luz. Y dado que la velocidad de la luz es increíblemente elevada (¡trescientos mil kilómetros por segundo!), cualquier error en la hora del satélite, aunque sea de milmillonésimas de segundo, introduce un fallo apreciable, e indeseable, en la precisión final del posicionamiento obtenido. Por un lado, los satélites son objetos que se mueven a velocidades muy elevadas (unos 14.000 km/h), lo que por relatividad especial hace que sus relojes internos midan el tiempo un poquito más despacio que un reloj que esté en reposo en la superficie terrestre. Por otro lado, al encontrarse en órbitas alejadas de la Tierra (a una altitud de unos 20.000 km), están sometidos a un campo gravitatorio bastante más débil que el de la superficie terrestre, por lo que por relatividad general sus relojes internos miden el tiempo un poquito más rápido. La suma de ambos efectos relativistas (de signos contrarios) no es, en general, cero; es una cantidad muy pequeña, pero lo suficientemente importante como para afectar a la precisión del propio sistema GPS que, como he comentado, exige de tiempos extremadamente precisos si buscamos

posicionamiento igualmente preciso. Esto implica que antes de poner en órbita los satélites de esta constelación haya que tener en cuenta los futuros efectos relativistas que sufrirán por dilatación temporal y, por consiguiente, haya que introducir las correcciones relativistas de antemano.

¿Entonces, cómo pasa el tiempo en la Luna?

Pues con todo lo anterior en mente, nos preguntamos: ¿cómo pasa el tiempo realmente en la Luna? Vamos a verlo. Dado que la Luna se mueve a

velocidades del orden del planeta Tierra, y siendo en cualquier caso una velocidad muy poco elevada (en comparación con la velocidad de la luz, al menos), la dilatación temporal por relatividad especial es prácticamente despreciable. Pero, dado que el campo gravitatorio lunar es mucho más débil que el campo gravitatorio terrestre (la gravedad en la Luna es, aproximadamente, un 16,6 por 100 de la gravedad terrestre), eso quiere decir que los efectos de dilatación temporal por relatividad general sí serán lo suficientemente significativos. Por supuesto, desde un punto de vista relativo y debido a las exigencias de precisión de nuestra tecnología actual, porque la dilatación temporal seguirá siendo en realidad muy, muy pequeña. De manera muy aproximada, por media un reloj en la Luna registrará que el tiempo pasa 58,7 microsegundos más rápido (para cada «día terrestre») respecto de uno que se encuentre en la Tierra. Es decir, si tuviéramos un reloj en la Luna y otro en la Tierra, en 50 años desfazarían un segundo debido a la dilatación temporal. Tras 50 años de funcionamiento ininterrumpido, y partiendo de un sincronismo perfecto a las 12:00:00, el reloj en la Tierra marcaría las 12:00:00 y el de la Luna las 12:00:01.

Y es precisamente este desfase, esta diferencia entre el tiempo que mediría un reloj en la Tierra respecto de uno en la Luna, lo que ocasiona, en gran medida, la necesidad por parte de la NASA (y, en realidad, de cualquier agencia espacial) de disponer de un «Tiempo Lunar Coordinado» o, lo que es lo mismo, una escala de tiempo basada matemáticamente en la Luna.



Reloj atómico de Cesio construido para los primeros satélites GPS a finales de 1970.
(Foto: www.wikipedia.org)

LTC: una nueva escala de tiempo

Pero, ¿qué es eso de una escala de tiempo lunar? Bueno, no voy a explicar con detalle ni rigurosidad en qué consiste una escala de tiempo desde el punto de vista físico, dado que no es el objetivo de este artículo. Pero sí puedo dar una idea muy general de lo que pretende establecer la NASA con este LTC.

Una escala de tiempo es un sistema artificial, acordado entre comunidades científicas y, por tanto, diferentes países, que se utiliza para medir el tiempo, la duración de los eventos. Una escala de tiempo se define, generalmente, en términos de una unidad de tiempo base, una época de origen, un sistema de referencia físico, así como otras normas de carácter científico-técnico. Hay múltiples escalas de tiempo, todas ellas diferentes entre sí. No hay escalas mejores ni peores, sino que todas ellas responden a necesidades técnicas diferentes y son útiles en función del contexto donde se aplican.

Existen escalas de tiempo atómico, es decir, definidas usando como referencia fenómenos cuánticos extremadamente precisos de naturaleza periódica. Un ejemplo de este tipo sería el Tiempo Universal Coordinado (UTC), que posiblemente sea la escala de tiempo atómico más importante en

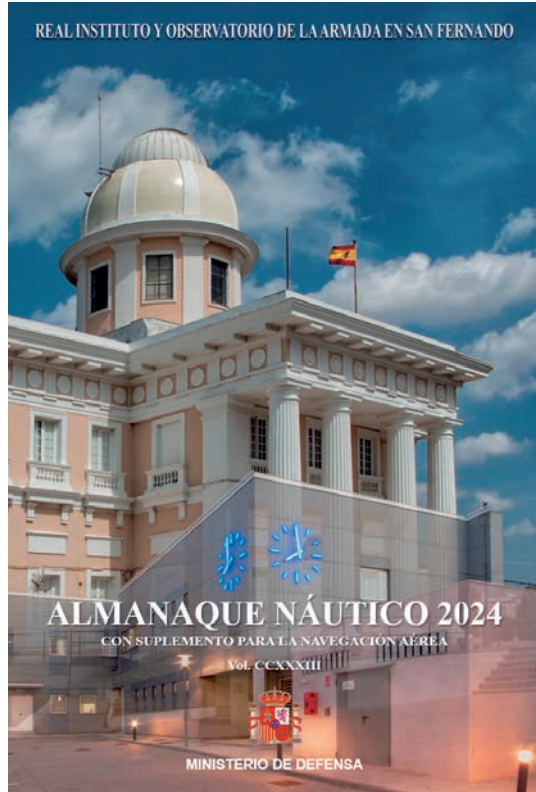


Edificio de la Sección Hora del Real Instituto y Observatorio de la Armada.
(Fotografía facilitada por el autor)

la actualidad, que es la base de lo que podríamos considerar la «hora oficial del mundo» y cuyo cálculo se realiza gracias a los datos y aportaciones de, entre otras instituciones, la Sección de Hora del Real Instituto y Observatorio de la Armada. Por otro lado, hay escalas de tiempo de carácter dinámico, definidas de acuerdo a fenómenos físicos de origen astronómico, estando éstas generalmente más vinculadas con el propio movimiento de la Tierra. La más conocida es, sin duda, el Tiempo Universal (UT), que es la base, por ejemplo, de los cálculos que se publican en el *Almanaque Náutico* de la Armada. UT y UTC son escalas diferentes, pero la relación entre ellas está perfectamente establecida, y precisamente los famosos «segundos intercalares» surgen por las diferencias progresivas entre ambas escalas.

Por supuesto, no hay ningún problema en que existan diferentes escalas de tiempo, dado que éstas se crean con reglas matemáticas y los cálculos necesarios que las vinculan de manera unívoca y que, por tanto, nos permiten pasar de una escala de tiempo a otra en función de las necesidades y relacionar las operaciones realizadas con escalas temporales diferentes.

Por todo ello, lo que la Casa Blanca le ha pedido a la NASA que confeccione es precisamente una nueva escala de tiempo, pero «optimizada» para trabajar en la Luna y sus proximidades. Es decir, los expertos de la NASA tendrán que definir los parámetros y características de esta nueva escala de tiempo teniendo muy en cuenta que, como ya hemos visto, los efectos relativistas afectan a los observadores/relojes situados en la Luna, haciendo que el tiempo pase más rápido para ellos que para un observador/reloj en la Tierra. Por supuesto, la NASA tendrá que establecer igualmente cuáles son las relaciones matemáticas entre esta nueva escala lunar, LTC, y las escalas de tiempo más importantes en la Tierra (UTC por la parte atómica y UT por la



(Fuente: Armada)

parte dinámica, entre otras) y, de igual modo, deberá fijar las diferentes características y parámetros que definirán esta nueva escala de tiempo de acuerdo con los criterios que considere prioritarios. Lo más normal —aunque es sólo mi humilde opinión— es que para la correcta y precisa definición de esta nueva escala LTC sea incluso necesario el despliegue, de una manera u otra, y el posterior mantenimiento y coordinación de un conjunto de relojes atómicos ultra-precisos en la Luna y sus proximidades para medir el tiempo *in situ* con la mayor exactitud. Evidentemente esto conllevaría unos gastos económicos muy elevados, además de que exigiría un gran esfuerzo a las partes implicadas.

¿Vale la pena todo el esfuerzo?

Teniendo esto en cuenta, ¿es realmente necesaria la creación de esta nueva escala de tiempo LTC? Bueno, si la Casa Blanca se lo ha solicitado a la NASA es porque muy probablemente así sea. Es cierto que es posible realizar operaciones espaciales (en la Luna y en cualquier otro satélite y/o planeta) sin definir una escala de tiempo adaptada a las condiciones físicas particulares de cada escenario, puesto que los desvíos relativistas pueden ser corregidos *a priori* para adaptar la velocidad del paso del tiempo del lugar de operaciones a la del paso del tiempo en la Tierra. De hecho, la humanidad ha viajado con anterioridad a la Luna en varias ocasiones y ha llevado a cabo numerosas operaciones espaciales sin crear escalas de tiempo particularizadas a cada escenario. Pero también parece evidente que si entre los planes a medio y corto plazo de la NASA se encuentra, como ya he comentado previamente, el despliegue continuado en el tiempo de futuras operaciones lunares y espaciales, muy posiblemente el esfuerzo de crear esta nueva escala LTC será mucho más que provechoso en el largo plazo y aumentará de manera significativa la precisión y seguridad de futuras operaciones espaciales, puesto que dispondremos de dos escalas de tiempo: una terrestre (UTC, por ejemplo) y una lunar (LTC), cuyas relaciones matemáticas entre ellas estarán perfectamente definidas y estandarizadas. Es mucho más eficiente operar en la Luna con una escala de tiempo lunar, coherente con el paso real del tiempo en este satélite, que con una escala de tiempo terrestre, con relojes que no miden adecuadamente el paso del tiempo en la Luna y que exigen tener en cuenta los efectos relativistas de manera continuada.

Eso sí, será de suma importancia que la definición de la nueva escala LTC sea lo más rigurosa posible, porque si se quiere garantizar la seguridad y precisión de las futuras misiones espaciales en la Luna y proximidades, es absolutamente imprescindible tener bajo control las desincronizaciones (que inevitablemente van a ocurrir por distintos efectos, que incluyen los ya explicados fenómenos relativistas) entre los relojes situados en la Tierra y los de los satélites y naves espaciales que se encuentren en zona lunar.

Disponer de un LTC debidamente implementado aportará, en mi opinión, considerables ventajas a las futuras misiones de la NASA y de otras agencias espaciales. Entre otros posibles beneficios, una LTC precisa permitirá a las naves espaciales determinar su ubicación con mayor exactitud (dado que los errores de sincronización de tiempo se pueden traducir en errores significativos de distancia), facilitará la futura creación de mapas lunares precisos y actualizados, la realización de experimentos científicos en la Luna y, en general, favorecerá la sincronización de comunicaciones e intercambio de datos entre estaciones lunares y terrestres.

En resumidas cuentas, la nueva escala de tiempo LTC muy posiblemente será un hecho en un futuro muy próximo, y sin duda oiremos y leeremos más sobre ella durante los próximos meses en las noticias. Y aunque no vaya a ser un elemento que afecte al día a día del ciudadano medio, es siempre conveniente que tengamos un concepto claro de lo que realmente es esta nueva escala de tiempo y de las previsibles ventajas que va a aportar a las futuras misiones espaciales, no sólo de la NASA sino también de sus países aliados que realicen actividades en la Luna y proximidades.

Así pues, querido lector, si en un futuro está planificando pasar unos días de vacaciones en la Luna (es una zona muy tranquila, se comenta), no se olvide de ajustar su reloj a la nueva escala de tiempo LTC si no quiere perder 60 valiosos microsegundos al día que, si uno se planifica adecuadamente, pueden dar para mucho.



Escuela de Suboficiales con un Hughes 500
numeral 01-602 de la extinta Sexta Escuadrilla.
(Foto: Federico Yanguas Guerrero)

