DEL PROGRESO CIENTÍFICO AL DESARROLLO TECNOLÓGICO, DEL DESARROLLO TECNOLÓGICO AL PROGRESO CIENTÍFICO: EL GPS COMO CASO DE ESTUDIO

UNAI ETXEBARRÍA
Münster (Alemania)

Resumen. A través de la exposición de la historia y características técnicas del GPS (Global Positioning System), y destacando esencialmente los efectos asociados a la relatividad especial, se muestra la interacción entre el progreso científico y la innovación tecnológica, y específicamente la adopción de esta nueva tecnología por parte de la comunidad geodética. En claro paralelismo con la evaluación de propuestas científicas se argumentará cómo la elección de tal tecnología ha sido realizada dentro de un ámbito específico de aplicación en relación a una pluralidad de valores que comprende criterios internos como el de eficiencia y estabilidad, así como otros externos, tales como transportabilidad o económico, pero que han de ser contemplados como un conjunto particular y dinámico en el que es la interacción entre los diferentes valores la que determina la nueva técnica como preferible sobre otras, de modo que frente a la maximización de un valor, la eficiencia, concurre una armonización de los diferentes valores.

Abastract. By considering the history and the technological traits of GPS (Global Positioning System), and particularly by emphasizing the effects associated with special relativity, the interaction between scientific progress an technological innovation can be seen, specifically as regards the use of this new technology by the geodetic community. In a clear parallelism with the assesment of scientific proposals, this article examines how the choice of this technology has been made in the field of applications related to a plurality of values which embrace internal criteria such as efficiency and stability, and external criteria as well, such as transportability or economic values. However, these values must be considered a particualr and dynamic whole in which the interaction among them determines that the new technique can be preferable to other one, in such a way that, facing to the maximization of a value, for example efficiency, a harmonization of different values takes place.

Argumentos de Razón Técnica, Nº 4 (2001) pp. 83-116

INTRODUCCIÓN

Uno de los sistemas técnicos más recientes y de mayor impacto social y económico en este final de siglo, pero cuyas consecuencias últimas en ambos casos están muy lejos aún de ser conocidas, es el sistema GPS. De ambos impactos se hacía eco recientemente un periódico de tirada nacional, en el cual se anunciaba la posible instalación del GPS en taxis de Madrid, 'así, en caso de emergencia o agresión, el conductor podrá indicar su posición exacta a la policía en segundos', añadiendo a continuación que 'el anuncio de que la Comunidad de Madrid instalará GPS en los 16.000 taxis madrileños ha abierto una *guerra* en las empresas privadas que distribuyen este sistema'.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un complejo sistema tecnológico, nacido a la vera de la guerra fría y dentro de los gastos dedicados al esfuerzo militar y espacial; sectores que dominaron la I+D de los EEUU durante los años sesenta. Desde un punto de vista de la innovación tecnológica[1], la confluencia de diferentes programas científicos y tecnológicos, entre 1955 y 1970, como la invención de diferentes dispositivos de resonancia atómica para la medición del tiempo y relojes atómicos, la creación de redes mundiales de difusión de señales y seguimiento de satélites, o los programas de satélites como Tiros, Telstar o Echo, fueron los antecedentes imprescindibles para el futuro GPS. En definitiva, el principal factor que encontramos en el desarrollo de las diferentes tecnologías y técnicas, fue la urgente necesidad de contar con sistemas de transferencia, medición y sincronización del tiempo, indispensables para llevar a cabo programas espaciales como fuera el caso del Apolo. [Cooper - Chi 1979].

La creación de sistemas de sincronización de alta precisión sobre grandes distancias, tal y como se hacían necesarios, exigía la aplicación de correcciones en la medición del tiempo de cara a dar cuenta de efectos métricos debidos principalmente a la velocidad relativa y a la diferencia de los potenciales gravitatorios entre dos puntos que han de ser temporalmente coordinados. Ambos efectos son predichos por la

[1] Al referirme a «innovación», no hago uso de su significado técnico, principalmente en economía, y sobre todo desde Schumpeter, como «creación de una nueva función de producción», esto es, como la transformación de una invención en un bien de utilidad social y comercial, sino que con ella designo cualquier «cosa nueva» en ciencia o tecnología, no haciendo distinción en consecuencia de la «invención». Véase [Ruttan 1959].

teoría de la relatividad. En concreto, la teoría especial de la relatividad describe las tranformaciones necesarias para las mediciones entre dos sistemas en movimiento relativo uno respecto del otro. Mientras que la relatividad general se extiende a todo movimiento posible, y no sólo a la velocidad uniforme entre dos sistemas inerciales, incluyendo además los efectos de la gravedad. De este modo, la necesidad de un buen conocimiento y comprensión de los efectos relativistas, junto con la disponibilidad de la tecnología que fue generando la implementación de diferentes programas tecnocientíficos, y que proporcionó la instrumentación necesaria, impulsó la realización de experimentos de contrastación más sofisticados y exactos en torno a las predicciones relativistas, tanto de la relatividad especial como de la general, experimentos que sobre todo se realizarían en los años setenta. A su vez estos experimentos corroboraban las predicciones teóricas relativistas con una exactitud y precisión creciente, incrementando la fiabilidad necesaria en una teoría que jugaría un destacado papel en la construcción de la nueva tecnología. No en vano, un aspecto importante acerca de la aplicación del conocimiento científico en la construcción de tecnologías es que la realización de un proyecto tecnológico ha de ser sobre todo seguro y digno de confianza. Esta condición excluye por regla general de la práctica tecnológica, aunque no de la investigación tecnológica, aquellas teorías que no han sido suficientemente corroboradas [Bunge 1974, 38]. En otras palabras, en tecnología prima, en relación a la ciencia, el uso del conocimiento comprobado que, aún siendo siempre susceptible de discusión, proporciona una seguridad más allá de toda duda.

En las páginas siguientes se abordará la cuestión de las interacciones entre el progreso científico y la innovación tecnológica, a la luz del ejemplo que nos proporciona el GPS. Para ello, en el primer punto se darán las características técnicas y estructurales básicas del GPS, y se condensará la historia del programa. Los puntos segundo y tercero mostrarán los principales efectos de la relatividad especial que han de tenerse en cuenta para que el sistema cumpla los requisitos de exactitud y precisión necesarios, de modo que el sistema funcione de forma eficaz y eficiente. El siguiente punto reflejará, entre las innumerables áreas de aplicación del GPS, la trascendencia que ha tenido este sistema en la geodesia, como nuevo instrumento científico. Finalmente, se expondrán a la luz del caso estudiado, algunas consideraciones axiológicas en torno al progreso científico y la elección de sistemas tecnológicos.

1. Sistema de Posicionamiento Global. NAVSTAR - GPS

El GPS puede definirse como un sistema de radionavegación basado en satélites que proporciona una precisa información sobre la posición tridimensional, la velocidad y el tiempo (cronológico) en cualquier punto de la Tierra (tierra, mar y aire), durante las 24 horas del día a su usuario; consistiendo en una constelación de 24 satélites (21 satélites principales y 3 de reserva)[2] circulando en 6 planos órbitales, con cuatro satélites por plano, a 20.200 km de altitud sobre la superficie terrestre y con un período orbital de 12 horas[3].

El principio fundamental de navegación se apoya en la medición de los llamados seudoalcances *(pseudoranges)* entre el usuario y 4 satélites. De entre estos, tres proporcionan la localización espacial, mientras que el cuarto es necesario dado que el GPS funciona mediante una técnica unidireccional (de satélite a antena receptora) y, en consecuencia, el reloj del usuario no se encuentra sincronizado con el reloj del satélite. Este error de sincronización es el motivo del término seudoalcance.

El sistema completo consta así de tres secciones *(segments)*, la sección espacial *(space segment)* con los satélites activos, la sección de control *(control segment)* para el control del sistema y del tiempo, y predición de las órbitas, cuyo centro principal se encuentra en Boulder (Colorado), y, finalmente, la sección del usuario *(user segment)*, con los diferentes receptores.

En relación a su historia, ésta puede condensarse en los siguientes puntos [Bauer 1997, 151-3]. A partir de 1964 la marina de los EEUU comenzó a desarrollar un sistema de posicionamiento basado en satélites denominado TRANSIT. Este sistema tenía como finalidad principal mejorar la navegación y posicionamiento de la flota de submarinos Polaris, y con ello aumentar su eficacia. Las limitaciones de este sistema, que aún permanece en uso, (por ejemplo, la localización no podía ser permanente y resultaba poco precisa cuando los submarinos se encontraban en movimiento), provocó el desarrollo de dos nuevos proyectos que carecieran de los inconvenientes que habían hecho del pro-

[2] Actualmente son un total de 28 satélites.

[3] Existe su equivalente ruso llamado GLONASS cuya historia y configuración resulta paralela en muchos aspectos al sistema norteamericano GPS. De hecho, algunas empresas comercializan equipos receptores utilizables para ambos sistemas.

grama original un sistema con una eficiencia muy mermada. Por un lado, el sistema bidimensional TIMAT.ION, desarrollado por la Marina, y, en segundo lugar, el sistema tridimensional, System 621 B, de las Fuerzas Aéreas. Al poco de comenzados ambos proyectos, sin embargo, el Ministerio de Defensa optó por unificar ambos sistemas con el fin de economizar gastos dando nacimiento el 17 de abril de 1973 al sistema **NAV**igation **S**atellite **T**iming **A**nd **R**anging - **G**lobal **P**ositioning **S**ystem, abreviadamente conocido como GPS [Bauer 1997, 151-3].

Muy esquemáticamente, su construcción puede resumirse en tres fases:

- Primera fase (1974-1979) : fase de comprobación. Se lleva a cabo la fase de pruebas en la que se realizan diferentes ensayos experimentales sobre el funcionamiento de satélites, con cuya ayuda se comprueba el valor militar del sistema y la validez general del mismo. El primer satélite sería lanzado el 27 de junio de 1977.
- Segunda fase (1978-1985) : fase de desarrollo. Los principales objetivos fueron el de profundizar en el desarrollo técnico del sistema, y el lanzamiento de nuevos prototipos de satélites.
- Tercera fase (1985-1995) : fase de construcción. Se completa progresivamente el sistema de satélites, siendo funcional el primer bloque de satélites en febrero de 1989. El 17 de julio de 1995, es considerado el sistema plenamente operativo, '...el día de hoy la constelación de satélites del Sistema de Posicionamiento Global ha satisfecho todos los requisitos de Capacidad Operativa Completa'. [Fuerzas Aéreas de los EEUU. Citado en Bauer 1997, 153].

La utilización militar de la sección espacial fue puesta a prueba durante la reciente guerra del Golfo en 1990-1991, en la que durante las últimas fases de la guerra (además de otros sistemas de satélites) se emplearon de 15 a 16 satélites GPS [Pike-Stambler 1992, 177].

Como en tantas otras innovaciones tecnológicas militares su utilidad en el mundo civil fue rápidamente advertida. En este sentido, el GPS se suma a la larga lista de innovaciones tecnológicas que siendo desarrolladas bajo los auspicios militares han sido transferidas al mundo civil como los ordenadores, el sonar, el radar, los aviones a reac-

ción, los insecticidas, los transistores, la energía nuclear, el humilde bolígrafo, o el sistema Internet, entre los múltiples ejemplos que pueden citarse[4]. En el caso del GPS, su paso al mundo civil tuvo entre otros motivos el derribo del vuelo 007 de las Líneas Aéreas de Corea en septiembre de 1983 por los sistemas de defensa aérea de la extinta Unión Soviética, lo que motivó que el presidente Reagan anunciara en 1984 el acceso de una parte de las capacidades de navegación proporcionada por el GPS a la comunidad civil, con la finalidad de evitar futuros errores de navegación, como el que llevó al vuelo coreano a penetrar el espacio aéreo soviético [Lewis 1996, 487][5].

En particular, el GPS proporciona así dos serviciós diferentes. Por un lado, el Servicio de Posicionamiento Preciso (*Precise Positioning Service, PPS)* para uso militar y para determinadas agencias gubernamentales, y el Servicio de Posicionamiento Estándar *(Standard Positioning Service, SPS)* destinado a la comunidad civil.

El PPS, proporciona una exactitud de al menos 22 m en el plano horizontal, 27,7 m en el plano vertical, una exactitud de transferencia temporal UTC (Tiempo Universal Coordinado) de 200 nanosegundos, y una exactitud en la medición de la velocidad de 0,2 m/s. El acceso a este servicio esta controlado a través de dos sistemas criptográficos, denotados como *Antispoofing (AS)*, mecanismo que frustra cualquier intento por parte de un adversario de replicar y transmitir diferentes datos con la finalidad de engañar al usuario, y *Selective Availability (SA)*, que hace fluctuar el registro del reloj del satélite corrompiendo así la exactitud del tiempo de transmisión desde el satélite, y provocando además errores en el parámetro de datos de navegación. Los usuarios del PPS eliminan los efectos de SA mediante criptografía. Por contra,

[4] Acerca de la transferencia de tecnología militar a la civil, pueden verse los trabajos recogidos en la excelente obra de [M. Roe Smith (Ed), 1987].

[5] Claro está, la transferencia de tecnología militar al mundo civil, no beneficia únicamente a éste último, sino que en última instancia retorna al mundo militar, y no solo económicamente, sino también en forma de productos reutilizables. De hecho, el déficit de equipamiento militar durante la guerra del Golfo fue satisfecho mediante la compra a empresas y la utilización de equipamiento civil estándar. Así, los menos de 2.000 receptores militares disponibles a comienzos de la guerra en agosto, se aumentaron entre 3.000 y 5.000 receptores comerciales a comienzos de enero de 1991, e igualmente el grueso de terminales de los satélites utilizados por las fuerzas terrestres no eran militares sino teléfonos que utilizan el sistema Inmarsat (civil) para comunicarse; en total, un 30% de las comunicaciones de la Armada durante la guerra fueron a través de sistemas comerciales civiles [Pike - Stambler 1992, 179].

el servicio SPS esta abierto sin restricciones a cualquier usuario, proveyendo de una exactitud de 100 m en el plano horizontal, 156 m en el plano vertical, y 340 ns en el tiempo [Kaplan 1996, 4-5].

Tras largas gestiones y negociaciones, la delimitación y clarificación de la disponibilidad, así como del uso civil y militar del sistema, ha encontrado un provisional punto final en la publicación de la orden presidencial de Clinton, fechada el 29 de marzo de 1996, sobre la utilización del sistema GPS. En ella se establecen los siguientes objetivos del sistema GPS: [Müller - Lechner 1997]:

- Refuerzo y salvaguarda de la seguridad nacional de los EEUU.
- Fomento de la aceptación y de la ulterior utilización del GPS con finalidades pacíficas mundiales
- Estimulación de las inversiones del ámbito civil, o bien, de la utilización de la tecnología GPS de los EEUU.
- Fomento de la seguridad y eficiencia en los transportes.
- Aumento de las capacidades científico-técnicas de los EEUU.

Asimismo especifica las funciones del Departamento de Defensa, cuya obligación será,

- Financiar y gestionar el sistema GPS original (secciones espacial y de control).
- Garantizar un Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS) y un Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS).
- Controlar los efectos del GPS/DGPS en la seguridad nacional.
- Desarrollar los procedimientos y tecnologías necesarios para impedir localmente una utilización hostil del GPS/DGPS.

Y junto a todo ello,

- Asegurarse de que las Fuerzas Armadas de los EEUU protegen las ventajas militares [del sistema sobre las civiles]. Y, en vista de ello, ocuparse de que la utilización civil no sea perturbada más de lo debido.

2. Procedimientos de sincronización. Tiempo coordinado

El tiempo GPS es el ejemplo más claro de tiempo coordinado. Un sistema de tiempo coordinado se define como un conjunto de relojes espacialmente distribuídos, sincronizados mediante el transporte lento (en comparación con la velocidad de la luz) de relojes o mediante señales electromagnéticas, con valores ajustados que posibilitan mantener la sincronización[6]. Para obtener un sistema de tiempo coordinado se procede del siguiente modo [Ashby-Allan 1979, 650. Ashby 1994, 512]:

a) Imagínese un sistema de referencia inercial local (no en rotación) no afectado por el movimiento rotatorio de la Tierra, y con origen en el centro de ésta. En este sistema de referencia, denominado *Earth Centered Inertial Frame* (ECI), se encuentra distribuído un conjunto de relojes estándar, sincronizados entre sí mediante señales electromagnéticas.

b) Introdúzcase, a continuación, un conjunto de relojes estándar distribuídos aleatoriamente sobre la superficie de la Tierra (u orbitando sobre ella). A cada uno de estos relojes se le aplica un conjunto de correcciones sistemáticas, tal que a cada instante, cada reloj en este sistema es sincrónico con los relojes estándar ficticios en reposo del sistema ECI. Este conjunto de relojes estándar corregidos se mantendrán en tiempo coordinado. Esto es, el tiempo coordinado equivale al tiempo medido por relojes estándar en el sistema ECI.

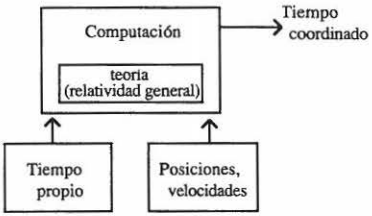

Fig. 1. Obtención de tiempo coordinado [Ashby - Allan 1979, 651].

6 [Ashby-Allan 1979, 649]. Esta es la referencia principal para el estudio de los métodos de sincronización y procedimientos de cronometraje, con detallados análisis teóricos acerca de las implicaciones prácticas de los efectos relativistas y numerosos ejemplos experimentales relevantes para la implementación de un sistema de tiempo coordinado.

La posibilidad de realizar el conjunto de correcciones sobre los registros de tiempos propios que permiten crear el sistema de tiempo coordinado viene dada por la relatividad general. Así, el GPS es principalmente una aplicación de la teoría de la gravitación [Alley 1994, 129].

Establecer un sistema que reúna las características necesarias, de modo que no existan discrepancias en los registros, o que las posibles discrepancias sean corregibles, requerirá por tanto tener en cuenta efectos relativistas debidos a la diferencia de potencial gravitatorio, pero también, efectos debidos a la velocidad de los relojes, tanto en los satélites como en Tierra, y a la velocidad de rotación de esta última. Es aquí en donde se hace necesario dar cuenta de los resultados que predicen la relatividad especial y general. Quizás por ello el físico Neil Ashby, uno de los principales expertos en el estudio de los efectos relativistas aplicados a sistemas de navegación, geodesia y metrología, ha afirmado que,

> «El mejor ejemplo existente de un sistema de ingeniería en el cual la relatividad representa un papel esencial es el GPS». [Ashby 1994, 511].

La relatividad es, en consecuencia, además de una teoría física fundamental, un campo de investigación aplicada de primer orden en la actualidad, algo que el Departamento de Defensa norteamericano ya valoró a partir de finales de los años cincuenta apoyando la investigacion sobre la gravitación, con el punto de mira puesto en la construcción de sistemas de navegación antes citados, y que luego darían como resultado el GPS. Así, quien en 1956 se uniera al Laboratorio de Física General perteneciente a los Laboratorios de Investigación Aeronaútica, Joshua N. Goldberg, escribió,

> «El Dr. Max Scherberg, un matemático que era el investigador principal en el ARL [Laboratorios de Investigación Aeronáutica] decidió iniciar el apoyo a la relatividad general en la Universidad de Indiana con Vaclav H'lavaty y en la Universidad de Siracusa con Peter Bergmann. El teniente coronel que era comandante del ARL entonces, creyó que un gran esfuerzo de investigación dentro de la propia casa que supervisara un programa de apoyo externo era un importante medio para tener a las Fuerzas Aéreas al tanto de los nuevos desarrollos científicos y en posición de explotar la nueva tecnología. Por lo tanto, animó a contratar a nueva gente para los

grupos [de investigación] del estado sólido y de física nuclear. Además, consideró la relatividad general como un campo de creciente interés que sería importante para las Fuerzas Áreas». [Goldberg 1992, 89][7].

La ayuda ofrecida por las Fuerzas Aéreas se concretó al financiar y ofrecer transporte militar a los participantes en algunos de los congresos sobre relatividad general celebrados fuera de los Estados Unidos, y directamente, por supuesto, en la formalización de contratos de investigación con numerosos grupos de investigación distribuídos en diversas universidades.

Un ejemplo directo de investigación empírica financiado militarmente para la implementación de un sistema sincronizado como el GPS lo encontramos ya en los años setenta.

El resultado final del famoso experimento de Hafele-Keating [Hafele-Keating 1972a,b], realizado con aviones circumnavegando la Tierra en sentidos opuestos para contrastar el fenómeno de la dilatación temporal, había adolecido de un considerable grado de exactitud, principalmente en el caso del vuelo hacia el este, al haber sido realizados mediante vuelos comerciales. Los autores cuantificaron en un 60% la incertidumbre en este caso frente a un 8% en el caso del vuelo hacia el oeste, motivada principalmente por los errores y deficiencias en los datos de vuelo y en las aproximaciones teóricas utilizadas en la derivación de la relación fundamental del experimento. Pese a su deficiente exactitud el experimento fue suficientemente revelador como para mostrar la dependencia direccional del comportamiento de un reloj en movimiento, y los resultados permitían alcanzar conclusiones definidas. Ahora bien, a la hora de implementar el GPS tales conclusiones son insuficientes, por ello, se realizó con posterioridad un nuevo experimento

[7] El apoyo y financiación a la investigación de la relatividad general, y específicamente sobre la radiación gravitacional finalizó en 1972, cuando el Congreso de los Estados Unidos aprobó la enmienda Mansfield que señalaba que el Departamento de Defensa no debía participar en proyectos de investigación básica sino que debía de restringir su apoyo financiero a aquellos proyectos de investigación que tuvieran aplicación a las necesidades militares [*Ibid.*, 90]. El hecho es, sin embargo, que para entonces la relatividad general era la base teórica fundamental para el desarrollo del GPS, cuya fecha de nacimiento oficial fue casualmente al año siguiente de la enmienda Mansfield, por lo que la financiación nunca se interrumpió. Lo que había ocurrido era que la relatividad general era ya un proyecto de investigación con una clara aplicación tecnológica-militar. Véase a continuación el experimento Maryland.

dirigido dentro del programa tecnocientífico del GPS, y bajo los auspicios militares, cuyos resultados fueron definitivos.

El experimento fue realizado entre septiembre de 1975 y enero de1976 por un grupo de investigación de la Universidad de Maryland bajo la dirección de Carroll O. Alley, sobre los efectos relativistas (gravitación) en los procedimientos de cronometraje y sincronización de alta precisión sobre la Tierra para el desarrollo del GPS. En este caso, mediante vuelos militares, se realizaron los trayectos en sentido norte-sur desde la Base Andrews de las Fuerzas Aéreas cercana a Washington (38.54 N-77.01 W) hasta Christchurch en Nueva Zelanda (43.33 S-172.40 E) y en la dirección sur-norte desde la base en Washington señalada hasta la base militar situada en Thule (77.35 N-69.40 W, Groenlandia), a una altura de unos 10.000 metros y a una velocidad de 500 km/h, siendo tanto la posición como la velocidad controlada cada segundo mediante radar. Tanto en los aviones como en tierra había tres relojes atómicos bajo condiciones controladas (temperatura, humedad, campos magnéticos, etc.), mientras las mediciones de los tiempos propios se verificaban mediante dos métodos:

a) Durante unas veinte horas aproximadamente, tanto antes como después del vuelo, se compararon directamente la marcha de los relojes.

b) Durante el vuelo eran enviados impulsos láser de 0,1 ns desde tierra y una vez registrados se reflejaban a tierra nuevamente siendo captados en la estación.

El efecto de dilatación temporal producto de la velocidad del avión produjo en los relojes un incremento negativo de –6ns, mientras que dado que el potencial gravitatorio es inferior durante el vuelo que en Tierra, los relojes se adelantaban 53 ns. En conclusión, la diferencia final fue por tanto de 47 ns. Esta conclusión sólo resultó en el vuelo con dirección norte-sur, más propiamente norte-sureste, ya que en el caso del otro vuelo, realizado prácticamente sobre el mísmo meridiano, no se observó la diferencia de –6ns [Alley 1983, 421, 417].

El resultado final entre el valor obtenido y el valor calculado era de 0,987 ± 0,016, lo que equivale a un 1,6 % en la exactitud. Este resultado, muy superior al de Hafele-Keating, dejaba fuera de dudas la predicción de la dilatación temporal como fenómeno físico, y al mismo tiempo venía a apoyar los resultados obtenidos por sus predecesores.

En definitiva, de la correcta aplicación y comprensión de los efectos relativistas dependía en buena medida la exactitud, y en último término, la eficiencia del sistema de navegación GPS. En estos efectos nos centraremos a continuación.

3. Efectos relativistas

Todo sistema de radio navegación tiene como característica primordial *la exactitud en la medición del tiempo*, y por lo tanto la transferencia exacta de tiempos entre las diferentes secciones (segments) es fundamental para su correcto funcionamiento; por ejemplo, un error de 1 nanosegundo (1ns = 10^{-9} s) en el cómputo de tiempos en un sistema de navegación como el GPS equivale a unos 3 cm de error en la posición. Los principios del funcionamiento del sistema presentados brevemente con anterioridad no son sino una idealización. En efecto, un sistema tan complejo está sujeto a unos errores que han de tenerse en cuenta si se pretende que el sistema cumpla las funciones para las cuales ha sido diseñado, esto es, para que resulte efectivo,

> «Desde un punto de vista general, se introducen errores en el proceso de estimación de los parámetros si el modelo es demasiado simple, no ajustándose así a la realidad física. El sencillo concepto de medición y navegación por seudoalcance (...) deja de considerar algunas circunstancias físicas, o lo hace de forma insuficiente». [Seeber 1993, 289].

En concreto, las circunstancias físicas que han de considerarse si se quiere que el sistema funcione con plena eficacia son las siguientes,

a) el sistema de referencia geocéntrico de una Tierra fija no es un sistema inercial.

b) la mecánica newtoniana no es estrictamente aplicable.

c) la señales no se propagan en el vacío.

Por lo tanto, es necesario realizar una serie de correcciones sobre las coordenadas y los relojes de los satélites, y las observaciones. En la corrección de algunos errores del proceso de medición de seudoalcances tanto la teoría especial de la relatividad como la general son factores

que se han de tener en cuenta [Seeber 1993, 289-92; Ackroyd-Lorimer 1994, 129-132; Kaplan 1996, 243-5]. Estas correcciones afectan a las tres secciones que completan el sistema.

En primer lugar [Ashby 1994, 509, 511], consideremos cómo afecta el desplazamiento Doppler estrictamente sobre el reloj atómico situado en la superficie, i.e. el reloj-patrón localizado en la sección de control.

Como consecuencia de la dilatación temporal sabemos que la relación entre tiempos t y t', siendo t el tiempo requerido para una señal en realizar un trayecto dado, y siendo el cociente u/c pequeño, viene determinada por,

$$t' \approx \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\upsilon^2}{c^2} \right) t.$$

Por consiguiente, considerado un reloj situado en la superficie de la Tierra sobre el Ecuador, debido al movimiento rotatorio de la Tierra la señal del reloj experimentará un desplazamiento Doppler visto desde el sistema no rotacional,

$$-\frac{1}{2} \frac{\upsilon^2}{c^2} \approx -1{,}2 \times 10^{-12},$$

equivalente a unos 104 ns por día.

En segundo lugar, si hacemos referencia al usuario, el receptor GPS puede encontrarse en movimiento relativo sobre la superficie de la Tierra, ello implica un desplazamiento Doppler adicional, provocado por su velocidad con respecto a la superficie, que puede alcanzar del orden de 10^{-12}.

Observemos a continuación algunos de los efectos relativistas más importantes, de forma específica y real, esto es, en su aplicación práctica tal y como es descrita en GPS.

Por un lado, los satélites, equipados con relojes atómicos de cesio y rubidio, giran a alta velocidad y a gran altura alrededor de la Tierra. En consecuencia, y debido a los efectos de la relatividad especial, su frecuencia se ralentizará, y por lo tanto vistos desde la Tierra «retrasarán». Pero, dado que se encuentran a gran altura y sujetos a efectos gravitatorios inferiores a los relojes situados sobre la superficie de la

Tierra se producirá el efecto contrario, esto es, el reloj del satélite marchará más rápido, tal y como predice la relatividad general. Desafortunadamente, ambos efectos no se cancelan, siendo este último el predominante. En principio no es posible distinguir entre la contribución debida al potencial gravitatorio (relatividad general) y a la originada por el efecto Doppler transversal (relatividad especial) [Bertotti 1979, 624], por lo que en la práctica una combinación de ambas nos describirá el resultado de la variación de la frecuencia observada en Tierra.

Si la frecuencia del reloj del satélite es n_t, al ser recibida en Tierra se verá desplazada en n_r. Una vez tomado en cuenta el efecto Doppler normal, la relación entre ambas frecuencias viene dada por [Zhu-Groten 1988, 44],

$$\frac{v_r}{v_t} = 1 - \frac{\left(\phi_t + \frac{\upsilon_t^2}{2} - \phi_o + \left(\phi_o - \phi_r - \frac{\upsilon_r^2}{2}\right)\right)}{c^2},$$

siendo ϕ_t y ϕ_r, los potenciales gravitatorios del satélite y de la estación receptora respectivamente, υ_t y υ_r, sus velocidades (υ_r debido a la rotación terrestre), mientras que, ϕ_o, es el valor de $(\phi_r + \upsilon_r^2 / 2)$ sobre la geoide.

Como consecuencia de la diferencia de frecuencias y con el fin de compensar ambos efectos relativistas, la frecuencia del reloj del satélite se ajusta antes del lanzamiento a 10,22999999545 MHz ($4{,}45 \bullet 10^{-10}$ del valor nominal 10,23 MHz) de modo que la frecuencia observada en Tierra es de 10.23 MHz, frecuencia a la que funciona el reloj atómico en la sección de control.

El cociente $(\phi_t + \upsilon_t^2 / 2) / c^2$ de la relación anterior contiene una parte constante y una fluctuación periódica debido a la ligera excentricidad de la órbita del satélite, por lo tanto, tras el ajuste previo al lanzamiento del satélite, existe todavía un desplazamiento residual. Cuando el satélite se encuentra en el perigeo, la velocidad del satélite es más alta y el potencial gravitatorio menor. Por el contrario cuando el satélite se encuentra en el apogeo, ocurre la situación inversa, la velocidad es menor y el potencial gravitatorio es mayor. Esta corrección ha de realizarla el usuario y viene determinada por,

$$\Delta t_r = Fe \sqrt{A} \sin E_k ,$$

en donde,

$F = -4{,}4442807633 \bullet 10^{-10}$ s/m,

e = excentricidad orbital del satélite,

A = eje semimayor de la órbita del satélite,

E_k = anomalía en la excentricidad de la órbita del satélite.

Siendo el valor máximo a alcanzar de 70 nanosegundos en el tiempo (o 21 m tras 6 minutos).

En tercer lugar, la señal emitida por el satélite experimenta una leve curvatura espacio-temporal debido al campo gravitatorio de la Tierra que puede alcanzar una distancia de 18,7 mm, y, finalmente, debido al efecto rotacional de la Tierra, se introduce un efecto relativista llamado efecto Sagnac. Durante el tiempo de propagación de la señal desde el satélite, el reloj ubicado sobre la superficie de la Tierra experimenta una rotación finita que es necesaria computar, tal y como aparece en la figura inferior.

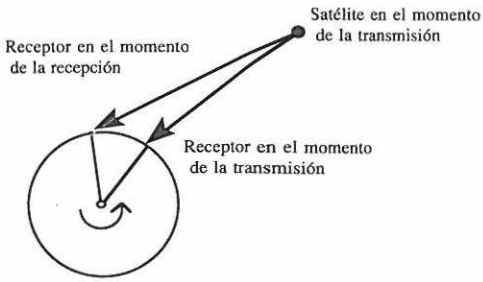

Fig. 2. Efecto Sagnac [Kaplan 1996, 245].

Véamos a continuación con detenimiento este importante efecto.

El segundo postulado de la relatividad, posibilitaba a Einstein establecer un procedimiento para la sincronización de dos relojes distanciados entre sí. Básicamente el procedimiento puede describirse del

siguiente modo[8]. Considérense dos relojes A y B situados a una distancia entre sí, L, medible en principio mediante el tiempo que requiere un pulso de luz en completar el trayecto A→B→A multiplicado por c/2 (para lo que resulta irrelevante la presencia del reloj B). A contiuación se envía una señal desde el reloj A, en el tiempo t_A, tal que el tiempo requerido por esa señal en recorrer el trayecto de A a B resulta L/c. Entonces se considera que el reloj B queda sincronizado con el reloj A, si la señal llega en el tiempo t_B, determinado por $t_B = t_A + L/c$. Este procedimiento, conocido como sincronización de Einstein, y válido para relojes en reposo en todo sistema de referencia inercial, le permitía así establecer las relaciones de simetría y transitividad entre relojes sincronizados.

Ahora bien, en el caso de sistemas acelerados, y en GPS todo el sistema se encuentra en rotación, la independencia en el sentido de sincronización que se da en el procedimiento de Einstein, esto es, de A a B o de B a A, no es autoconsistente, y, sin embargo, la consistencia del sistema es un requisito básico. Es más, si se sincroniza A con B y B con C, entonces A no estará necesariamente sincronizado con C. Para el caso de sistemas de referencia en rotación, como es el de la Tierra, el principio de la constancia de la luz predice que la luz, o cualquier señal electromagnética, necesitará un tiempo diferente en recorrer el mismo trayecto, bien que la señal se propague en la misma dirección, o en la opuesta, al sentido de la rotación. Este efecto, fue puesto de manifiesto en 1913 por el físico francés G. Sagnac, y conocido en consecuencia como *efecto Sagnac*[9]. El efecto Sagnac es además la base del funcionamiento de los giroscopios láser.

El físico Georges M.M. Sagnac (1869-1928), estaba interesado en la propagación de la luz en sistemas en movimiento, y particularmente en el efecto de Fizeau, considerando a partir de 1910 la posibilidad de utilizar un interferómetro rotatorio, objetivo que finalmente llevaría a cabo en 1913. Básicamente, el sistema experimental utilizado por Sagnac consistía en un interferómetro cuya totalidad de componentes se encontraban fijados sobre una mesa rotatoria de 50 cm de diámetro con cuatro espejos distribuidos en su perímetro, de modo que dos haces con direcciones opuestas, originados a partir de un único rayo de luz, rea-

8 Aquí se ha considerado un procedimiento equivalente al originalmente propuesto por Einstein, en el cual la emisión de las señales se realizaba desde un punto equidistante a ambos relojes.

9 Acerca del efecto Sagnac, véase [Post 1967].

lizaban sendos trayectos poligonales, y cuyas franjas de interferencia, una vez reunidos, eran recogidas en una placa fotográfica.

Una vez que todo el sistema es puesto en rotación a una velocidad angular w rad/s, el desplazamiento de las franjas, Df, con respecto al desplazamiento en el caso del interferómetro en reposo viene dado por,

$$\Delta\phi = 4\omega A \ / \ \lambda_0 c,$$

siendo A el área limitada por el trayecto poligonal de los haces. Mientras que el intervalo temporal, tanto en el sistema estacionario como en el rotatorio, es,

$$\Delta\tau = 4\omega A \ / \ c^2.$$

Sagnac interpretaba los resultados sobre la base de un posible 'viento de éter' y concluía que los valores obtenidos estaban de acuerdo con la hipótesis de un éter inmovil relacionado con la existencia de un sistema en reposo absoluto.

Simplificadamente puede considerarse una trayectoria circular. En este caso si no hay 'viento de éter' la velocidad relativa entre el interferómetro en rotación y los haces es de $c \pm wr$, en función de su sentido favorable o contrario a la rotación y el tiempo necesario para completar un trayecto completo será $2\pi r \ /(c \pm \omega r)$. De este modo el intervalo temporal en la llegada de ambos haces será, (para primer orden de wr/c),

$$\Delta t = 4\pi r^2 \ / \ c^2 = 4\omega A \ / \ c^2,$$

que es el resultado obtenido por Sagnac, y para quien resultaba indiscutible que su experimento refutaba la relatividad especial. Sin embargo, el experimento de Sagnac es perfectamente explicable en términos relativistas. Para Langevin y Pauli, el fenómeno observado por Sagnac era de primer orden en u/c, y el desplazamiento era producto de la diferencia de las longitudes ópticas entre ambos haces; básicamente era el análogo óptico del péndulo de Foucault.

En función del procedimiento e interpretación de los resultados de Sagnac parece clara la similitud existente con la comparación de tiempos en satélites geoestacionarios, si se obvian las diferencias instru-

mentales y técnicas utilizadas en este segundo caso. Por lo tanto si se necesita una precisión de nanosegundos, no puede asumirse que la Tierra sea un sistema inercial, tal y como se desprende de los resultados que obtuvieron Hafele y Keating en su conocido experimento de 1972. La posible diferencia observable es la que rompe la transitividad del procedimiento de sincronización de Einstein, transitividad que es, sin embargo, absolutamente necesaria en cualquier sistema de alta precisión de tiempo coordinado, como es el GPS.

Por consiguiente, si en un sistema de dos relojes distanciados entre sí sobre el ecuador terrestre [Landau-Lifshitz 1961, 281; Ashby 1994, 507], se realiza el procedimiento de sincronización de Einstein sucesivamente a lo largo del ecuador (siendo por lo tanto la distancia entre ambos de $2\pi R$), la discrepancia entre ambos relojes en tiempo coordinado será,

$$\Delta\tau = \frac{\omega}{c^2} \int r^2 d\phi = \pm \frac{2\omega A}{c^2},$$

cantidad que habra de sustraerse o sumarse al reloj, en función de su movimiento a favor o en contra al de la rotación terrestre. Aplicando al caso real de la Tierra (Winkler 1991, 1036], y con los valores,

$$c = 2{,}9979245 \times 108 \text{ m/s}$$
$$2\omega/c^2 = 1{,}6227 \times 10^{-2} \text{ s/m}^2$$
$$R = 6{,}378 \times 10^6 \text{ m},$$

se obtiene,

$$\Delta t = \pm \frac{2\omega A_T}{c^2} = \pm \frac{\omega^2 \pi R^2}{c^2} \approx \pm\ 207{,}4 \text{ ns}.$$

Es decir, un reloj que circumnavegue la Tierra en dirección Este alrededor del Ecuador registrará una discrepancia de 207,4 ns, con respecto a un reloj «fijo» en el origen. Cantidad que por tanto habrá de añadirse al registro final[10].

[10] Los patrones universales de sincronización con las correcciones exactas a aplicar recomendadas por el CCDS (Comité Consultivo para la Definición del Segundo) y del CCIR (Comité Consultivo Internacional de Radio) son [Winkler 1991, 1035-6]:

En el caso de la utilización de satélites, como es el caso del GPS, la corrección a realizar será por supuesto mayor ya que habrá de tenerse en cuenta la diferencia de potencial gravitatorio ($\Delta U(r)$), pero el principal componente disturbador es provocado por la rotación de la Tierra, origen como hemos visto del efecto Sagnac. La confirmación experimental de este efecto, anticipada ya por Hafele y Keating, fue posteriomente reafirmada, para el caso específico de la comparación de registros de tiempo mediante satélites por Y. Saburi [Saburi *et al.* 1976], y por D.W.Allan, M.A.Weiss y N. Ashby [Allan-Weiss-Ashby 1985], mediante una variación del experimento de Hafele-Keating utilizando señales electromagnéticas, así como por D.W.Allan [Allan *et al.* 1985], al comparar los registros GPS con los obtenidos mediante el uso de relojes portátiles entre diferentes estaciones en la superficie de la tierra.

En resumen, si todas estas correcciones no se llevasen a cabo, los errores sistemáticos degradarían la totalidad del sistema. Por ejemplo, la combinación de los efectos relativistas producirían en los satélites un error acumulado en un día de 39.000 ns en tiempo o 12 km en la distancia; en definitiva, el sistema resultaría inservible a efectos reales. Un sistema de las características y los costes del programa GPS (12.000 millones de dólares en 1994), y dadas su utilidad militar y civil, obligan a que su funcionamiento esté sujeto a las predicciones aportadas por el conocimiento que la relatividad proporciona del mundo [Alley 1994, 129].

4. Aplicaciones del GPS: Geodesia

Frente a la utilización original del GPS como sistema de posición para los submarinos, y en general para la navegación, uno de los sorprendentes desarrollos tecnológicos que a partir de los años setenta se

a) para el caso de relojes en movimiento,

$$At = \frac{2\omega A_T}{c^2} + \int_{\text{trayectoria}} [1 - \frac{\Delta U(r)}{c^2} + \frac{\upsilon^2}{2c^2}]ds$$

b) para el caso de sincronización mediante señales electromagnéticas,

$$\Delta t = \frac{2\omega A_T}{c^2} + \frac{1}{c} \int_{\text{trayectoria}} d\sigma .$$

produjo dentro de la tecnología militar, aunque ya desde los años cincuenta existían técnicas en esta dirección tanto en los Estados Unidos como en la extinta Unión Soviética, fue la obtención de nuevas y más refinadas técnicas en la dirección y guía de bombas, misiles y proyectiles de artillería. El término utilizado de *Precisión guided munitions* describe este tipo de armamento, capaz de alcanzar sus objetivos con una alta precisión, siendo el GPS la tecnología más reciente a este respecto ya que permite determinar con gran exactitud la posición de cualquier vehículo del que parta el proyectil, sea en tierra, mar o aire; pero a su vez también posibilita la localización del objetivo con gran precisión, una vez que esta operación se complementa con la utilización de otros sistemas como sensores infrarrojos, microondas o láser, por ejemplo, lo que a su vez permite la corrección en vuelo de los proyectiles con trayectorias de vuelo prederminadas [Burt 1981, 48-50. Alford 1981, 118]. Como ya se mencionó, la guerra del Golfo fue la primera situación de aplicación militar real del GPS.

Ha sido no obstante el mundo civil el que de forma más continuada, variada y temprana ha aprovechado las oportunidades de esta nueva tecnología. Se ha dicho que el GPS es a la posición lo que el reloj fue al tiempo, y asi como estaba muy lejos de ser imaginado en el momento de su invención cualquier intento por cuantificar o anticipar la totalidad de usos y aplicaciones que el reloj ha llegado a tener, o el impacto que la precisa medición del tiempo ha tenido en el mundo, la situación con el GPS resulta muy similar, de modo que al día de hoy únicamente pueden conjeturarse algunas de sus futuras aplicaciones [Lewis 1996, 487]. Esta afirmación se sustenta una vez que se tiene presente la explosión de aplicaciones que en apenas quince años ha tenido esta tecnología en múltiples campos de la actividad humana. En particular, un campo científico que ha encontrado en el GPS una nueva herramienta de progreso han sido las ciencias de la Tierra. De hecho, el impacto del GPS en estas disciplinas ha sido calificado de «revolucionario» [Mueller 1993, 1], convirtiéndose este sistema en la técnica de posicionamiento dominante para sus comunidades científicas.

La geodesia, disciplina en la que nos centraremos a continuación, es la ciencia de la medida y cartografiado de la superficie terrestre, incluyendo en la actualidad la determinación del campo gravitatorio externo y del fondo marino; su índole interdisciplinar, en la que problemas científicos, medios técnicos y necesidades sociales marchan juntos, ha forzado desde siempre a esta comunidad científica a examinar

y valorar los efectos de la aplicación de nuevas tecnologías en la disciplina[11]. Dentro de esta ciencia, la geodesia mediante satélites es el campo que incluye las técnicas observacionales y computacionales que posibilitan la solución de problemas geodésicos mediante el uso de mediciones a, desde o entre satélites, y cuya historia disciplinar comienza propiamente con el lanzamiento del satélite SPUTNIK-1 el 4 de octubre de 1957, si bien puede retrotraerse hasta comienzos del siglo XIX, cuando en 1802 Laplace determinó a partir del movimiento nodal lunar el achatamiento terrestre. Como tal, la geodesia mediante satélites es considerada una ciencia básica, si nos atenemos a que uno de sus objetivos es el de proporcionar conocimiento del movimiento de los satélites bajo la influencia de diferentes fuerzas, así como la descripción de las posiciones de los satélites y estaciones terrestres en sistemas de referencia apropiados. Pero por otra parte, cuando las observaciones por satélite son utilizadas para solucionar diversos problemas, entonces, la geodesia por satélites pertenece al dominio de las ciencias aplicadas.

La geodesia espacial, en la que se incluye como subárea la geodesia mediante satélites, se encuentra en cierto modo en una situación similar a la astrofísica, por cuanto se da una estrecha unión entre el desarrollo de nuevas tecnologías y la consecución de objetivos científicos en continua expansión. Esta rápida incorporación provoca que el abanico de problemas que la comunidad científica puede abordar se expansione vertiginosamente, ya que permite incorporar cuestiones que poco tiempo atrás se consideraban imposibles de abordar de un modo satisfactorio. Aunque esta característica sea especialmente señalable en la geodesia y la astrofísica, que duda cabe que puede considerarse una particularidad de la actividad científica actual, de la bautizada «gran ciencia».

Ya desde fases muy tempranas el GPS se ha sumado como instrumento científico en este campo, que debido a sus ventajas de mayor exactitud, válido para todas las condiciones atmosféricas, disponible continuamente, con funcionamiento en tiempo real, fácilmente transportable, muy económico y accesible, están sustituyendo de forma creciente los métodos convencionales. Estas características, por consiguiente, son las que han hecho del GPS una herramienta muy ventajosa y con aplicaciones prácticamente ilimitadas, no ya sólo para la geodesia sino para

[11] Véase, por ejemplo, [Rinner 1971].

un diverso número de campos como el control topográfico, agrimensura, navegación, fotogrametría, etc., y para un número casi incalculable de casos especiales[12].

La incorporación del GPS en la geodesia, además de su valor como instrumento científico, ha tenido un impacto múltiple ya que entre sus efectos más generales, pueden destacarse los siguientes:

- Previamente a su utilización generalizada se impulsaron numerosos experimentos con la finalidad de comprobar sus eficacia como instrumento científico. [Torge 1988].
- Posteriormente ha servido como base para la realización de múltiples proyectos de investigación [Ambrosius *et al.* 1998, 227-39,]
- Ha tenido efectos institucionales dentro de la propia comunidad científica con la creación de nuevas organizaciones [Mueller 1993].
- Estas dos últimas características de alcance global, por ejemplo mediante la creación del Servicio GPS Internacional para Geodinámica (IGS) compuesto por una red mundial de noventa puestos permanentes distribuídos por todo el mundo, ha obligado a una intensa cooperación internacional [Mueller 1993; Minster *et al* 1993; Ambrosius *et al.* 1998, 221-6].

Pero el uso del GPS, además de sus ventajas, también ha provocado nuevos problemas[13].

- Uno de los primeros problemas fue que las exigencias de exactitud en las mediciones, dependientes entre otros factores de los receptores utilizados, no eran alcanzables a comienzos de los ochenta, lo que impulsó un rápido proceso de innovación técnica en estos aparatos.
- Además, el enorme volumen de datos GPS ha provocado la necesidad de desarrollar métodos computacionales eficientes y económicos de analisis. [Zumberge *et al.* 1997].

[12] En torno a la aplicaciones y mercados que se abren al GPS, véanse [Seeber 1993, 325-352] y [Lewis 1996].

[13] Algunos problemas más específicos con los que se encontró la comunidad geodética se enumeran en [Torge 1988, 13].

Frente a estas cuestiones, los éxitos de la aplicación de GPS en geodesia vienen a ser en la actualidad innumerables, y una visión medianamente completa queda fuera de las pretensiones de este artículo. De la temprana inclusión de esta nueva tecnología da cuenta el siguiente ejemplo, quizás menos espectacular que su aplicación a fenómenos geofísicos, pero que permite apreciar la rapidez de su aplicación, cuando aun el GPS estaba en fase de desarrollo.

Uno de las finalidades de la geodesia mediante satélites, en particular, es el trazado de redes locales para el control de proyectos de ingeniería. A él se corresponden entre otros, la construcción de túneles, puentes, carreteras, acueductos y oleoductos, y aceleradores de partículas. A este último caso nos acercaremos brevemente a continuación.

Aunque los análisis geodéticos, topográficos y cartográficos desempeñan un papel pequeño en proyectos de ingeniería de grandes dimensiones, son una parte indispensable, y que ha de preceder al trabajo de los ingenieros y técnicos. En el caso de la construcción e instalación de aceleradores se precisa la máxima precisión, siendo la finalidad última del control topográfico el garantizar que el haz de partículas siga un trayecto lo más próximo posible al trayecto teórico calculado, para lo que es necesario que la ubicación de los diferentes componentes, como los dipolos, tetrapolos y detectores, principalmente, se encuentren en perfecto alineamiento. Por ello, las exigencias en las mediciones geodéticas se estiman en milímetros.

Por otro lado, el continuado incremento en el tamaño de los aceleradores ha aumentado las dificultades técnicas y la complejidad de las mediciones geodéticas, en dos factores fundamentales:

a) La influencia de la curvatura de la tierra, y,

b) La desviación de la vertical.

Ambos factores dificultan el requisito básico en el diseño de un acelerador, como es que ha de estar en un plano horizontal real. En el primer caso, el problema responde al hecho de que al aumentar el radio del acelerador, la diferencia en los planos horizontales entre el centro del acelerador y el túnel del acelerador aumenta. Dado que habitualmente es un linac (acelerador lineal) el encargado de proyectar el haz de partículas en el acelerador circular, entonces la diferecia entre los

planos del punto de inyección del haz y el plano de la trayectoria aumenta.

En el segundo caso, el problema radica en las ondulaciones sobre la superficie de la Tierra que pueden ir de pocos centímetros a varios metros diferencia. Estas ondulaciones se manifiestan en la superficies equipotenciales del campo gravitatorio de la Tierra, de modo que cualquier ondulación o divergencia entre estas superficies se evidenciará en una distorsión del plano realizado a partir de las alturas niveladas, y en un acelerador las partículas no siguen la superficie equipotencial sino que han de orbitar, como se ha dicho con anterioridad, en un plano real.

En los sucesivos aceleradores construídos en el CERN, desde el Proton Sincrotrón de 28 GeV (1954-59), cuyo diámetro era de 200 m, hasta el gran colisionador electrón positrón (LEP, 1986-88), de 8,6 km de diámetro, estos problemas, entre otros, han obligado a que el grupo de geodesia aplicada del CERN haya incluído las técnicas e intrumental más avanzado en su trabajo, siendo el GPS la última «gran herramienta» que se ha sumado al instrumental científico.

En particular, la primera aplicación del GPS dentro del CERN fue realizada durante la construcción del LEP a mediados de los años ochenta, cuando aún el sistema no se encontraba en pleno funcionamiento. La aplicación fundamental del GPS fue durante la instalación de la red de control geodética del acelerador de 27 kilómetros de perímetro, y en el que habían de ser instalados un total de 4500 componentes entre dipolos, tertrapolos, etc., siendo los resultados obtenidos mediante la utilización de esta nueva tecnología comparados con los resultados obtenidos mediante técnicas convencionales con la finalidad de comprobar las ventajas e inconveniencias del uso práctico de esta nueva técnica.

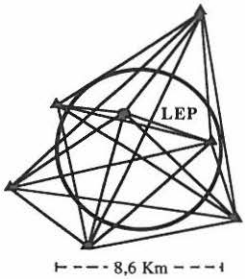

Fig. 3. Red geodética de control del LEP [Turner (Ed.) 1987, 105].

La instalación de la red (figura 3) realizada en diciembre de 1984 consistió en seis puntos de control, más un punto central fijo (representado mediante un círculo) siendo medido cada uno mediante dos detectores en dos sesiones, dando como resultado unas diferencias típicas de 1 mm en la latitud, 2 mm en la longitud y 4 mm en la altura. Para determinar el grado de exactitud de estas mediciones, los resultados obtenidos fueron comparados con los registrados en una campaña realizada al año siuguiente en la que se utilizaron métodos convencionales [Turner (Ed.) 1987, 130]. Las mediciones GPS han posibilitado que pese al incremento de las dificultades respecto de anteriores aceleradores de menor tamaño, los procesos de medición se definan mediante una mayor exactitud, mayor fiabilidad y un coste económico inferior, si bien, la solución mediante el uso del GPS de los problemas señalados, no ha supuesto un abandono de las técnicas convencionales, en algunos casos insustituibles (al menos en el presente), como son las mediciones en el interior del acelerador una vez construído.

5. Progreso científico, evaluación de tecnologías y pluralidad axiológica

La primera consideración a tener en cuenta es el caracter restrictivo que ha dominado la reflexión filosófica en torno al concepto de progreso científico, lo que ha ocasionado que éste se haya contemplado a la luz de un único valor como el de verdad o verosimilitud. De este modo, el progreso científico ha sido considerado de forma generalizada en términos de las teorías y, muy especialmente de teorías físicas, ignorando la experimentación, y reduciendo el valor de los experimentos únicamente a su función de contrastación, y, por consiguiente, cualquiera que fuese el origen y función original de éstos, referidos en general como corroboraciones o refutaciones de una *consecuencia teórica* en particular. Esto es, por sus «virtudes» hacia la teoría. Un segundo elemento de menor atención aún en filosofía de la ciencia ha sido el de la instrumentación e innovaciones tecnológicas, y sin embargo, el progreso científico ha estado constreñido siempre, más aún en la actualidad, a determinada disponibilidad instrumental. Así, el físico y químico Philip H. Abelson, editor de la revista *Science* entre 1962 y 1984, ha escrito al respecto,

«Con frecuencia en la actualidad los instrumentos dirigen *(shape)* el modo de la investigación. Ellos hacen posible los descubrimientos. Ellos determinan qué descubrimientos se harán». [Abelson 1986, 182][14].

Sin embargo, tan sólo a partir de los años ochenta, diversos autores, comenzando con Hacking, y pasando por Ackerman, Galison, Franklin o Gooding, han reivindicado el papel de la experimentación y la instrumentación en la ciencia, proporcionando además un buen punto de apoyo sobre el que replantear las relaciones entre la ciencia y la tecnología[15]. Tras estos estudios es innegable que el papel de los experimentos en la ciencia es mucho más plural que el tradicionalmente asignado; así, la exploración y descubrimiento de nuevos fenómenos, la medición de constantes físicas, el perfeccionamiento de métodos de medición o la evaluación de una nueva técnica, son algunos de los múltiples objetivos perseguidos en la experimentación. Como hemos visto en páginas precedentes los experimentos han desempeñado un papel cardinal en la implementación y evaluación del GPS. Así, centrándonos en el caso estudiado, podemos mencionar tres objetivos principales de la experimentación en el proceso de evaluación de la eficiencia de la nueva tecnología, asociados a tres fases sucesivas como son el diseño, el control y la explotación de nuevas aplicaciones del sistema[16]:

[14] Sirva de ejemplo lo que señala respecto del uso del ordenador, y tras referir ampliamente esta dependencia instrumental en ciencias como la física, química, biología y ciencias biomédicas: «un cálculo típico en cromodinámica cuántica se estima que requiere 3 • 1017 operaciones aritméticas por minuto durante 70 años. Con el ordenador GF-11 diseñado específicamente para solucionar problemas numéricos en este subcampo de la Mecánica Cuántica el tiempo de cómputo se reducía a un año» [*Ibíd.*, p. 190].

[15] Qué duda cabe que el GPS es asimismo un excelente ejemplo sobre el que explorar «empíricamente» la interacción entre ciencia y tecnología, tal y como se habrá podido advertir en páginas precedentes. No obstante el interés de esta cuestión, aquí restringiremos el análisis a ciertas consideraciones axiológicas. En cualquier caso, creo que la nocion de «tecnociencia» acuñada por Latour, y ya utilizada ocasionalmente a lo largo de este artículo, es un concepto adecuado para denotar la profunda conexión entre ambas actividades, entendidas como una acción conjunta orientada a la sociedad y dirigida esencialmente a la transformación del mundo. Este carácter específico de la tecnociencia es mantenido en [Echeverría 1998a, esp. tesis 3 y 4]. Para una interpretación crítica, ya que no me atrevería a decir que absolutamente contraria al uso de la noción de tecnociencia, dada la posibilidad de utilización que deja abierta su autor al establecer una diferencia entre perspectiva conceptual, tendente a diferenciar ciencia y tecnología, y práctica u operativa proclive a diluir ambas actividades, véase [González 1997, esp. p. 267-8].

[16] Para las consideraciones que se plantean a continuación se ha seguido a

- Los experimentos como el de «Maryland» o el de Y. Saburi realizados a mediados de los años setenta tuvieron como objeto la de incrementar la exactitud en la medición de un fenómeno cuyos resultados habían de tomarse en cuenta para el diseño y construcción del nuevo sistema. Por lo tanto, estos experimentos, englobados dentro de la fase de comprobación en la investigación tecnológica, se encuentran directamente relacionados con la disponibilidad y contrastación de conocimiento científico necesario para la implementación eficiente del sistema.
- El experimento de David A. Allan [Allan *et al.* 1985], tuvo como finalidad el chequeo o control del sistema toda vez que tras un determinado tiempo de funcionamiento, el sistema podía degradarse. El experimento exploraba la eficiencia y validez del sistema a largo plazo [*Ibid.* 119], y al igual que en el caso anterior determinado (parcialmente) por el conocimiento científico disponible , i.e., predicciones relativistas: dilatación temporal y efecto Sagnac, pero con una característica importante desde un punto vista axiológico como es la relación de la eficiencia de un sistema con el de su solidez o estabilidad, lo que nos expresa la fiabilidad de una técnica [Quintanilla 1993, 188].
- Finalmente nos encontramos con un tercer tipo de experimento en relación a una tecnología, provocado por las necesidades u objetivos específicos que genera una nueva función o utilización de tal tecnología. La comprobación realizada por el grupo de geodesia aplicada del CERN tenía como finalidad explorar la eficiencia de una innovación tecnológica dado un objetivo específico, la construcción de una red de control, y previa incorporación del GPS como nuevo instrumento científico; de ahí que los resultados obtenidos fueran comparados con los obtenidos mediante otros métodos. En este caso, en consecuencia, la emergencia o posibilidad de una utilización nueva de la tecnología dispone los criterios particulares de la eficiencia del sistema.

[Quintanilla 1993], quien define la eficiencia técnica de un sistema como el ajuste o «la correspondencia entre los objetivos y los resultados efectivos del sistema» de modo que un incremento en esta correspondencia equivale a un incremento en la eficiencia [*Ibid.*, p. 187].

Si los dos primeros puntos pueden considerarse como una plasmación «empírica» de la caracterización de eficiencia realizada por M. A. Quintanilla, con esta última consecuencia nos alejamos de sus afirmaciones en una cuestión básica. Como el propio autor afirma, la evaluación de una tecnología está sujeta comúnmente a una mezcla de criterios internos y externos [*op. cit.*, 184], los primeros de los cuales están relacionados con la eficiencia, mientras los segundos lo son en relación a la utilidad del diseño tecnológico, pero añadiendo, posteriormente, que la noción dada de eficiencia es independiente de cualquier función de utilidad [*ibid.* 187]. La elección del GPS como instrumento científico por parte de la comunidad geodética proporciona un buen caso para explorar estas afirmaciones.

Los criterios internos (técnicos) que se han subrayado como los principales en la elección del GPS respecto de otras técnicas son su mayor exactitud y funcionamiento en tiempo real. Estas características, sin embargo, están sujetas al dominio de aplicación de la técnica. Así, para distancias superiores a 500 km, por ejemplo, la técnica mediante VLBI (Very Long Baseline Interferometry) resulta en ocasiones preferible, y del mismo modo, para distancias muy cortas o mediciones en interiores la utilización de giroscopios es asimismo superior. Por consiguiente, es el dominio de aplicación el que permite especificar en términos concretos el ajuste entre los objetivos que se pretenden alcanzar y los resultados alcanzados mediante el uso de una determinada técnica. Pero, además, existe un conjunto de criterios externos o pragmáticos, cuya importancia ha sido reiteradamente puesta de manifiesto, que ha hecho que métodos convencionales perfectamente utilizables en determinadas situaciones por sus características técnicas de exactitud y funcionamiento comparables al GPS, estén siendo desplazados por este último. En concreto, estas características son las de validez en todas las condiciones atmosféricas, disponiblidad continua, fácilmente transportable, muy económico y accesible. El *conjunto* total de criterios o valores, internos y externos, ha determinado que el GPS sea una tecnología preferible, a pesar de que su uso ha generado nuevos problemas como necesidad en la mejora de softwares de modelos estocáticos o la necesidad de nuevos receptores.

Así, el problema de incrementar el conocimiento y control sobre un ámbito particular de la realidad se apoya en la satisfacción de un *conjunto* plural de valores que van de la mano de la aplicación e investigación de las posibilidades ofrecidas por una nueva tecnología capaz

de solucionar un determinado número de problemas teóricos y prácticos. Para quienes se encuentran inmersos en las prácticas científicas de la geodesia, el modo de solución de estos problemas, y la mejora en los resultados finales obtenidos, es lo que constituye el progreso para la disciplina. En este sentido nos acercamos a la noción de progreso mediente la resolución de problemas propuesta por Laudan, pero con una importante diferencia. Si para Laudan, «el objetivo de la ciencia consiste en obtener teorías con una elevada efectividad en la resolución de problemas» [citado en Echeverría 1995, 92], en nuestro caso no son sólo las teorías las que resuelven los problemas. Como se ha visto en el caso de la geodesia, la solución a determinados problemas específicos se ha llevado a cabo a través de la exploración y aplicación eficiente de técnicas determinadas y de una nueva tecnología.

Esto implica que de modo paralelo a como una teoría científica no es únicamente evaluada a través de un único valor como el de verosimilitud, sino a la luz de un conjunto plural de valores como fecundidad, generalidad, consistencia, etc. que dan el significado concreto a la expresión de preferible o mejor [Echeverria 1995, 122], las tecnologías son igualmente evaluadas en términos de una pluralidad de valores que determinan la elección final de tal propuesta, sea esta tecnológica o científica, pudiendo incidir, como en el caso de la geodesia, en el progreso de la disciplina. Así, en lugar de maximizar un valor como la eficiencia, lo que concurre es una armonización de diferentes valores. Es por ello necesario que la investigación axiológica no se reduzca al estudio de un valor específico, cayendo en el monismo axiológico, sino que la reflexión tenga en cuenta que es la interacción de un conjunto de valores dinámicos lo que define como preferible una nueva propuesta.

De hecho, incluso siendo el GPS una tecnología de origen militar, en donde la evaluación de las tecnologías se realiza a través de parámetros en ocasiones diferentes que en la tecnología civil, y en donde los costos suelen tener una importancia secundaria frente a otros como uniformidad, funcionalidad [Roe Smith 1985, 7] o eficiencia, el factor económico –recordemos que esto sucede en 1973– fue sin embargo fundamental en este caso en la unificación de dos sistemas anteriores claramente deficientes, dando como nacimiento al proyecto GPS.

En consecuencia, estas consideraciones apuntan al hecho de que una reflexión axiológica en torno a la tecnología (y la ciencia), tenga en cuenta:

- Que la evaluación de las tecnologías, al igual que sucede en la ciencia, son realizadas en relación a un conjunto de valores.
- Que este conjunto de valores comprende tanto valores internos y externos.
- Que es el dominio de aplicación y los objetivos asociados a éste[17] lo que 'descubre' los criterios (internos y externos) de evaluación específico, y por lo tanto, de elección.
- Y como consecuencia de todo ello, dado que la evaluación de las tecnologías es un proceso inscrito en un determinado marco de aplicación que define los valores satisfechos, una línea divisoria rígida entre valores internos y externos es axiológicamente inadecuada.

BIBLIOGRAFÍA

Abelson, P.H.: 1986, «Instrumentation and computers». *American Scientist 74*, 182-192.

Ackroyd, N. - Lorimer, R.: 1994[2] [1990], *Global navigation. A GPS user's guide*. Lloyd's of London Press. Ltd. London.

Alford, J. (Ed.): 1981, *The impact of new military technology*. The Adelphi Library 4. The International Institute for Strategic Studies. Gower Publ. Co. Ltd. Hampshire.

Alford, J.: 1981, «Military competition in space». En *Alford, J. (Ed.) 1981*, pp. 116-22.

Allan, D.W. - Weiss, M.A. - Ashby, N.: 1985, «Around-the-world relativistic Sagnac experiment». *Science 228*, 69-70.

Allan, D.W. *et al.*: 1985, «Accuracy of international time and frequency comparisons via Global Positioning System satellites in common-view». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement IM-34 (2)*, 118-125.

Alley, C.O.: 1983, «Proper time experiments in gravitational fiels with atomic clocks, aircraft, and laser light pulses». En Meystre, P. - Scully, M.O. (Eds.): 1983, *Quantum optics, experimental gravity, and measurement theory*, pp. 363-427. Plenum Press Publ. New York.

Alley, C.O.: 1994, «Investigations with lasers, atomic clocks and computer calculations of curved spacetime and of the differences between the

[17] Es decir lo que J. Echeverría denomina como *escenarios de acción* en [Echeverria 1998, 23].

gravitation theories of Yilmaz and of Einstein». En Barone, M. - Selleri, F. (Eds.): 1994, *Frontiers of fundamental physics*, pp. 125-137. Plenum Press. New York.

Ambrosius, B.A.C. *et al.*: 1998, «The role of GPS in the Wegener Project». *Journal of Geodynamis 25*, 213-240.

Ashby, N.: 1994, «Relativity in the future of engineering». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 43 (4)*, 505-514.

Ashby, N. - Allan, D.W.: 1979, «Practical implications of relativity for a global coordinate time scale». *Radio Science 14 (4)*, 649-669.

— 1984, «Coordinate time on and near the Earth». *Phys. Rev. Lett. 53 (19)*, 1858.

Bauer, M.: 1997, *Vermessung und Ortung mit Satelliten. Navstar-GPS und andere Satelliten gestützte Navigationssysteme. Eine Einführung für die Praxis*. Herbert Wichmann Verlag. Heidelberg.

Bertotti, B.: 1979, «Relativistic effects on time scales and signal transmision». *Radio Science 14*, 621-7.

Bunge, M.: 1974, «Technology as applied science». En Rapp, F. (Ed.) : 1974, *Contributions to a philosophy of technology. Studies in the structure of thinking in the technological sciences*, pp. 19-39. Reidel. Boston. Publicado originalmente en 1966, *Technology and Culture 7*, 329-347.

Burt, R.: 1981, «New weapons technologies: Debate and directions». En *Alford, J. (Ed.) 1981*, pp. 46-77.

Cocke, W.J.: 1966, «Relativistic corrections for terrestrial clock synchronization». *Phys. Rev. Lett. 16 (15)*, 662-4. «Errata«. *Phys. Rev. Lett. 16 (17)*, 779; *(26)*, 1233.

Cooper, R.S. - Chi, A.R.: 1979, «A review of satellite time transfer technology: Accomplishments and future application». *Radio Science 14*, 605-619.

Echeverría, J.: 1995, *Filosofía de la ciencia*. Akal. Madrid.

Echeverría, J.: 1998, «Teletecnologías, espacios de interacción y valores». *Teorema XVII-3*, 11-25.

Goldberg, J.N.: 1992, «US Air Force support of general relativity: 1956-1972». En Eisenstaedt - Kox (Eds.) 1992, *Studies in the History of General Relativity. Einstein Studies*, vol. 3, pp. 91-102. Based on the Proceedings of the 2nd International Conference on the History of General Relativity, Luminy, France 1988. Birkhauser. Boston.

Groten, E. - Strauß, R. (Eds.): 1988, *GPS-techniques applied to geodesy and surveying*. Lectures Notes in Earth Sciences, vol. 19. Springer Verlag. Berlin.

Hafele, J.C. - Keating, R.E.: 1972 a, «Around-the-World atomic clocks: predicted relativistic time gains». *Science 177*, 166-8.

Hafele, J.C. - Keating, R.E.: 1972 b, «Around-the-World atomic clocks : observed relativistic time gains». *Science 177*, 168-170.

Kaplan, E.D. (Ed.): 1996, *Understanding GPS. Principles and applications*. Aretch House. Boston.

Landau, L. - Lifshitz, E.: 1961[3] [1951], *The classical theory of fields*. Addison-Wesley Pub. Reading, Mass.

Lewis, S.: 1996, «GPS markets and applications». En *Kaplan (Ed.) 1996*, pp. 487-526.

Mader, G.L.(Ed.): 1993, *Permanent satellite tracking networks for Geodesy and Geodynamics*. Symposium No 109. Viena, 11-24 de agosto de 1991. Springer-Verlag. Berlin.

Minster J.-B. *et al.*: 1993, «Network design considerations for the International GPS Geodynamics Service». En *Mader (Ed) 1993*, pp. 23-31.

Müller, A. - Lechner, W.: 1997, «Satellitenpositionierungssysteme». En Dick, G. - Gendt, G.: 1997, *GPS-Anwendungen und Ergebnisse '96*, pp.10-18. Beiträge zum 41. DVW-Fortbildungsseminar vom 7. bis 8. November 1996 am GeoforschungsZentrum Potsdam. Schriftenreihe des DVW. Verlag Konrad Wittwer.

Mueller, I.I.: 1993, «Planning an international service using the global positioning system (GPS) for geodynamic applications». En *Mader (Ed.) 1993*, pp. 1-22.

El Mundo, 23 de febrero de 1999. Cuadernillo «Madrid» p. 4.

Pike, J. - Stambler, S.: 1992, «Military space systems –Lessons from Desert Storm–». En Heintze, H.-J. (Ed.): 1992, *Remote sensing under changing condition*, pp. 175-185. Proceedings of the Immenstaad Workshop 1992. UVB-Universitätsverlag. Dr. N. Brockmeyer. Bochum.

Post, E.J.: 1967, «Sagnac effect». *Rev. Mod. Phys. 39 (2)*, 475-493.

Quintanilla, M.A.: 1993, «The design and evaluation of technologies: some conceptual issues». En Mitcham, C. (Ed.): 1993, *Philosophy of technology in spanisch speaking countries*, pp. 173-195. Philosophy and Technology, vol. 10. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

Quintanilla, M.A.: 1997, «El concepto de progreso tecnológico». *Arbor 157 (620)*, 377-390.

Rinner, K.: 1971, «Der Einfluß der allgemeinen technischen Entwicklung auf das Vermessungswesen». *Zeitschrift für Vermessungswesen*, año 96, 536-545.

Roe Smith, M. (Ed.): 1987, *Military enterprise and technological change*. MIT Press. Cambridge. Massachusetts.

Ruttan, V.: 1979 [1959], «Usher y Schumpeter en la invención, la innovación y el cambio tecnológico». Recogido en Rosenberg, N.: 1979, *Economía del cambio tecnológico*, pp. 66-77. FCE. México.

Saburi, Y. - Yamamoto, M. - Harada, K.: 1976, «High-precision time comparison via satellite and observed discrepancy of synchronization». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement IM-25 (4)*, 473-7.

Schwartz, W.: 1993, «Applied geodesy for particle accelerators». En Linkwitz, K. - Eisele, V. - Mönicke, H.-J. (Eds.): 1993, *Applications of Geodesy to Engineering*, pp. 215-226. Symposium No. 108. Stuttgart, 13-17 de mayo de 1991. Springer Verlag. Berlin.

Seeber, G.: 1993, *Satellite geodesy. Foundations, methods, and applications.* Walter de Gruyter. Berlin.

Torge, W.: 1988, «More than five years of GPS-experiments - Rethinking of Geodesy». En *Groten - Strauß (Eds.) 1988,* pp. 9-13.

Turner, S. (Ed.): 1987, *Applied Geodesy. Global Positioning System - Networks - Particle Accelerators - Mathematical Geodesy.* Lectures Notes in Earth Sciences, vol. 12. Springer Verlag. Berlin.

Winkler, G.M.R.: 1991, «Synchronization and relativity». *Proceedings of the IEEE 79 (6),* 1029-1039.

Zhu, S.Y. - Groten, E.: 1988, «Relativistic effects in GPS». En *Groten - Strauß (Eds.) 1988,* pp. 41-6.

Zumberge, J.F. *et al.*: 1997, «Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks». *Journal of Geophysical Research 102 B3,* 5005-5017.