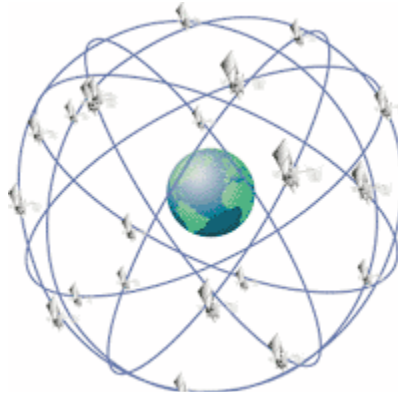


# La Relatividad General y El Sistema de Posicionamiento Global ( GPS)

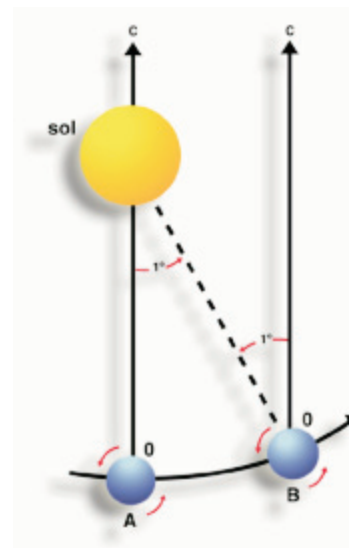
Resumen de un artículo de Neil Ashby, Universidad de Colorado

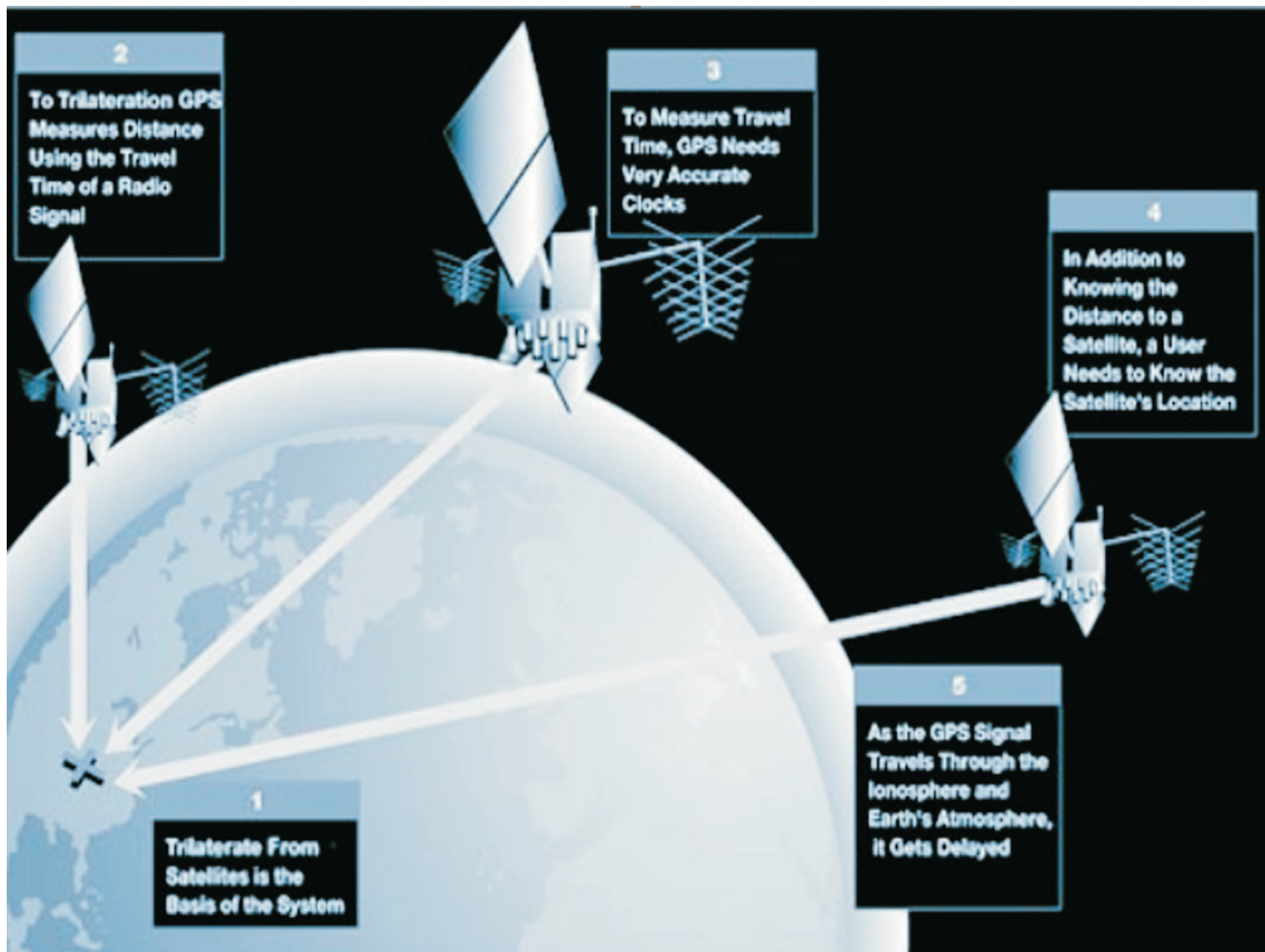
El artículo aparece en <http://www.phys.lsu.edu/mog/mog9/node9.html>



El Sistema de Posicionamiento Global (**GPS**) consiste de 24 satélites que orbitan la Tierra, cada uno llevando un reloj atómico estable y de gran exactitud. Cuatro satélites están en cada uno de los seis planos orbitales diferentes, cada uno con una inclinación de  $55^\circ$  con respecto al Ecuador de la Tierra. El período orbital son 12 horas (siderales, ver figura o clase 3 para saber la diferencia entre un día solar y sideral.) , así que la posición aparente de un satélite con el escenario de las estrellas se repite cada 12 horas. Transmisores activados por los relojes envían señales de tiempo sincrónicas, con la información de la posición y el tiempo de transmisión. De esta forma el receptor en la Tierra puede determinar su posición y tiempo mediante la decodificación del mensaje enviado por cuatro satélites diferentes. El satélite también lleva detectores de rayos gamma. Los satélites pueden determinar las coordenadas espacio tiempo de un evento nuclear midiendo los tiempos de arrivo de la señal y resolviendo de nuevo cuatro ecuaciones de propagación simultáneas.

Sin considerar los aceleradores de alta energía, no hay otro sistema de ingeniería en existencia hoy día en el cual ambos la relatividad general y la especial tengan tantas aplicaciones. El Sistema se basa en el principio de la constancia de la velocidad de la luz en un sistema de referencia inercial: el sistema inercial centrado en la Tierra o como lo denominaremos: sistema ECI (Earth Centered Inertial ). La dilatación del tiempo, el fenómeno de la relatividad especial, es significativa para los relojes en movimiento tanto para los relojes ubicados en los satélites como para los relojes en reposo en la Tierra. El principio de equivalencia encuentra su expresión en la presencia de varias fuentes de corrimientos de las frecuencias de las señales debido al campo gravitacional. También, debido a que la Tierra y sus satélites están en caída libre en el campo gravitacional del Sol, se generan corrimientos en la frecuencia de origen gravitacional nacen debido al potencial gravitacional de la Luna y el Sol, sin embargo estos tienen una influencia de unas pocas partes en  $10^{16}$  y por tanto pueden ser despreciados.





El efecto Sagnac tiene una gran influencia en este sistema de medición. Ya que la mayoría de los usuarios de GPS están en reposo (o casi) sobre la superficie de la Tierra, sería altamente deseable sincronizar los relojes en un sistema de referencia que estuviera rotando fijo a la Tierra (un sistema fijo Earth Fixed, Earth Center Frame o sistema **ECEF**). Sin embargo, debido a que la Tierra rota, esta sincronización no es posible. Este es el efecto Sagnac. Es suficientemente importante en los **GPS** para que deba ser considerado. Inconsistencias que ocurrirían en procesos de sincronización realizados en la superficie de la Tierra mediante rayos de luz, o con relojes portables que se muevan lentamente, dependen del camino recorrido y pueden llegar a ser del orden de varias docenas de nanosegundos, (una mil millonésima de segundo:  $10^{-9}$  segundos) demasiado grandes para ser tolerados en el sistema del **GPS**. De esta forma el efecto Sagnac obliga a diseñar una convención diferente para la sincronización de los relojes. También, el campo de una señal en el **ECEF** no es una línea recta. En el **GPS**, la sincronización es realizada en el sistema **ECI**; esto soluciona el problema de la inconsistencia debido a la dependencia del camino.

Varias fuentes de efectos relativistas se introducen al determinar la unidad de tiempo, el segundo SI (Sistema Internacional) está definido por el Observatorio Naval de Estados Unidos (USNO). Para un reloj que permanece fijo sobre la Tierra, la dilatación del tiempo generada por el movimiento de rotación de la Tierra puede ser visto alternativamente como una contribución, en el sistema ECEF, al potencial efectivo gravitacional el cual incluye las contribuciones provenientes de la no esfericidad de la Tierra. Relojes fijos a la Tierra ubicados en la misma superficie equipotencial de este campo gravitacional, marcan el tiempo con la misma rapidez. Considerando tiempos geológicos, la forma de la Tierra se ha distorsionado así que se acerca a una de estas figuras equipotenciales - la geodésica de la tierra al nivel promedio del mar. El segundo SI está definido por la rapidez de los relojes atómicos ubicados sobre la geodesia. Esta rapidez esta determinada con una suficiente exactitud, relativa a relojes en infinito, teniendo en consideración tres efectos:

- la dilatación del tiempo debido a la rotación de la Tierra
- los cambios de frecuencia debido al monopolio gravitacional
- y al potencial cuadrupolar debido a la deformación de la Tierra.

En relatividad general (GR), el tiempo coordenado se expresa en forma aproximada suponiendo un movimiento lento de la tierra y que el sistema solar es un campo gravitacional débil. El tiempo propio transcurrido en un reloj que está en movimiento depende de la posición de los relojes y la velocidad de los objetos masivos cercanos, y puede ser calculado si las velocidades y posiciones y la masa de estos objetos son conocidos.

Los efectos relativistas en los relojes de los satélites pueden ser combinados de forma tal que solo dos correcciones necesitan ser consideradas. Primera, el corrimiento, en promedio de la frecuencia de los relojes en órbita es corregido en frecuencia por algo así como 446, 47 partes en  $10^{12}$ . Esta es una combinación de 5 fuentes distintas de efectos relativistas: corrimiento gravitacional de la frecuencia de los relojes en la Tierra debido al monopolio de la Tierra y a su momentum cuadrupolar, corrimiento de la frecuencia de origen gravitacional del reloj del satélite, y corrimientos del tipo del efecto Doppler de segundo orden debido al movimiento del satélite y los relojes fijos en la Tierra.

Segundo, si la órbita es excéntrica, una corrección adicional aparece de las combinaciones del campo gravitacional que varía y el corrimiento de la frecuencia debido al movimiento debido a que las distancias del satélite con respecto a la Tierra cambia. Esta corrección es periódica y es proporcional a la excentricidad de la órbita. Para una excentricidad de .01 la amplitud de este término es del orden de 23 nanosegundos. Debido a una falta de computadores en los satélites en los primeros días del GPS, se decidió que esta última corrección era de responsabilidad del software en los GPS de los receptores (aquellos ubicados en la Tierra).

En el tiempo del lanzamiento del primer NTS-2 al tiempo de lanzamiento de primer satélite NTS-2 (Junio de 1977), el cual contenía el primer reloj de cesio que se pondría en órbita, habían algunos que dudaban que los efectos relativistas fueran efectivos. Un sintetizador de frecuencia se construyo en el sistema del reloj del satélite de forma tal que después del lanzamiento, si llegara a ocurrir que la rapidez del reloj su órbita final era la que predecía la relatividad general, entonces el sintetizador debería ser activado para poner al reloj coordenado a la rapidez necesaria de operación.

El reloj atómico fue operado inicialmente por alrededor de 20 días para medir su rapidez antes de prender el sintetizador. La frecuencia medida durante aquel intervalo, los 20 días mencionados, fue de 442,5 partes en  $10^{12}$ ,

más rápido que los relojes en el piso; si esta señal permaneciera sin corregirse habría resultado en errores en los tiempos de alrededor de 38.000 nanosegundos por día. La diferencia entre los valores de la frecuencia predichos y medidos estaba alejada solamente en 3, 97 partes en  $10^{12}$  de lo que se observó, bastante bien dentro de las capacidades de precisión del reloj que está en órbita. Esto entonces dio una aproximación al 1% considerando el movimiento combinado y los corrimientos gravitacionales para un reloj que orbita alrededor de la tierra en un radio de 4,2 veces el radios de la Tierra.

Actualmente uno no puede realizar pruebas de relatividad en forma fácil con el sistema porque los relojes SV son activamente manejados dentro de un microsegundo del tiempo de coordenado universal (USNO).

Varios efectos relativistas son demasiados pequeños para afectar el sistema a la precisión actual de este, pero pueden llegar a ser importantes a medida que el sistema es mejorado; estos incluyen retardos del tiempo de origen gravitacional, cambio de la frecuencia de los relojes en satélites debido al momentum cuadrupolar de la tierra y curvatura especial.

Este sistema fue conseguido inicialmente para algún uso de navegación militar teniendo acceso a transmisiones codificadas de los satélites las cuales no están disponibles para los usuarios civiles. La incertidumbre en la oposición en tiempo real usando el código de posicionamiento preciso es ahora del orden de 2,4 metros. Promediando sobre el tiempo y sobre muchos satélites reduce esta incertidumbre al punto donde algunos usuarios están actualmente interesados modelar muchos efectos hasta el nivel del mil metro. Aún sin estos ímpetus, el GVS provee una fuente muy fértil para las aplicaciones del concepto de relatividad.

Nuevas y sorprendentes aplicaciones de la determinación de la posición y en la transferencia del tiempo basada en sistemas GPS están siendo continuamente inventadas. Aplicaciones civiles incluye por ejemplo: registro del movimiento de los elefantes en África, estudio de los movimientos de las placas, exploración, mapeo, salvamentos en el océano abierto, bitácora de vehículos de flete, falla en línea de alto poder y sincronización de los nodos telecomunicacionales. Alrededor de 60 fábrica producen sobre 350 aparatos comerciales **GPS**. Millones de recibidores son hechos cada año, el precio del receptor local debe ser de alrededor de US\$ 200.