



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL "GPS"

TRABAJO DE SEMINARIO
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :

JORGE EDUARDO OCEGUERA SILVA

ASESOR: ING. JUAN GONZALEZ VEGA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX. FEBRERO DE 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN
PRESENTE.

AT'N: ING. RAFAEL RODRIGUEZ CEBALLOS
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautilán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Comunicaciones. Sistema de Posicionamiento Global "GPS"

que presenta el pasante: Jorge Eduardo Ocegüera Silva

con número de cuenta: 8560545-5 para obtener el Título de:

Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautilán Izcalli, Edo. de México, a 14 de Febrero de 1996

MODULO:

PROFESOR:

FIRMA:

Satélites

Ing. Juan Gonzalez Vega

Fibra Optica

Ing. Francisco Tellituid López

Redes Digitales

Ing. Silverio Joél Sanchez Pérez

DEP/VBOSEN

A mi Padre,

Que en Paz Descanse...

Gracias, Esther y Raúl Fierros...

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

ÍNDICE

- I. INTRODUCCIÓN**
- II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA GPS**
- III. TEORÍA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO**
- IV. USO EN AERONAVEGACION**
- V. USO EN CARTOGRAFÍA**
- VI. USO EN LOCALIZACIÓN AUTOMÁTICA DE
VEHÍCULOS**
- VII. CONCLUSIONES**
- VIII. BIBLIOGRAFÍA**

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las comunicaciones de todo tipo han adquirido una especial relevancia en el desarrollo y la evolución de las actividades del hombre. Ejemplos como la telefonía celular, los enlaces de microondas, los radio bips, la televisión de alta definición y en especial las comunicaciones vía satélite nos sorprenden con la forma en que agilizan muchas de nuestras actividades.



Figura 1

GOES	Una serie de satélites meteorológicos en órbita geosincrónica, el primero lanzado en Octubre de 1975, y actualmente se encuentran ya en órbita el sexto y séptimo. Dan a conocer los patrones meteorológicos alrededor del mundo de día y de noche.
INTELSAT	Grupo de satélites de comunicación global en una red internacional manejada por un consorcio de 109 naciones; el primero, El Pájaro Madrugador, fué lanzado en Abril de 1965; el último, Intelsat 5, en Mayo de 1988
LANDSAT	Grupo de satélites Norteamericanos científicos, el primero lanzado en Julio de 1972, que estudia y fotografía la superficie de la Tierra, usando técnicas de sensado remoto.
NAVSTAR	Un grupo de 24 satélites Norteamericanos de navegación. 4 prototipos de ellos fueron lanzados en 1978, diseñados para dar tiempo, posición y velocidad para navegación de barcos y aviones.
NIMBUS	Grupo de 7 satélites meteorológicos, el primero lanzado en Agosto de 1964, el último en Octubre de 1978, que toman fotos de las capas de nubes y monitorean los niveles de contaminación del aire.
OAQ	Grupo de 4 satélites científicos, el primero lanzado en Abril de 1966, el último en Agosto de 1972, que estudian objetos celestiales con detectores ultravioletas y de rayos X.
SYNCOM	Grupo de satélites de comunicaciones; los primeros 3 fueron lanzados entre Febrero de 1963 y Agosto de 1964 y demostraron la flexibilidad de la operación geosincrónica; el último, Syncom 4, fué lanzado en Septiembre de 1965.
TIROS	Grupo de satélites de órbita polar para uso meteorológico, el primero lanzado en Abril de 1960, el último (NOAA-11), en Septiembre de 1968, que transmiten imágenes de televisión de las capas de nubes, detectan tormentas, monitorean la capa de ozono y operan para búsqueda y rescate.

Figura 2

En lo correspondiente a las comunicaciones vía satélite, podemos reseñar que las primeras comunicaciones existentes fueron diseñadas para operar en modo pasivo. Esto es, en vez de transmitir activamente señales de radio, los satélites servían para únicamente reflejar señales que eran enviadas desde la tierra desde estaciones terrenas. Las señales eran reflejadas en todas direcciones, por lo que podían ser captadas por estaciones en cualquier punto alrededor del mundo.

Actualmente, las comunicaciones vía satélite utilizan únicamente sistemas activos, en los cuales cada satélite carga su propio equipo de transmisión y recepción. Cientos de satélites activos de comunicaciones existen en órbita ahora. Ellos reciben señales de una estación terrestre, las amplifican y luego las retransmiten en una frecuencia diferente a otra estación.

En la figura No. 2, se muestra una tabla con los sistemas de satélites mas comunes en la actualidad, en la que se incluye el sistema que en el presente trabajo nos ocupa: el GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

Como se puede observar en la figura 2, en el renglón correspondiente a la constelación Navstar, se habla de un sistema global de 24 satélites. Este sistema de referencia es el GPS o Sistema de Posicionamiento Global del que hablaremos, mismo que se refiere a un sistema de medición basado en las observaciones de señales de radio emitidas por este conjunto de satélites llamado Navstar (Navigation Satellite Time and Ranging) y captadas por una antena en el punto a localizar sobre la superficie de la tierra. Como debemos

imaginar, las observaciones son procesadas posteriormente para determinar su posición precisa.

En el presente trabajo hablaremos de cuales y como son los principios de operación del sistema GPS; en donde se encuentren localizados los satélites que emiten las señales correspondientes a la tierra; las partes que componen el sistema; el tipo de señales que recibimos para el cálculo de posición; los métodos de levantamiento o medición y además los detalles de un receptor comercial completo para señales de posicionamiento tipo GPS, el ASHTECH modelo P-12.

Espero también que el presente trabajo sirve para que quien lo lea, se pueda formar una idea más cercana de la teoría de operación de este sistema y pueda servir entonces como inicio para fortalecer la inquietud de lograr a través de esta gran ayuda tecnológica, el desarrollo de nuevas y diferentes aplicaciones del equipo. Como parte complementaria de la presente, exhibiremos a grandes rasgos algunas de las posibles aplicaciones comerciales que actualmente ya se encuentran a nivel comercial, como la llamada AVL (Automatic Vehicle Localization) o Localización Automática de Vehículos, que permite ubicar unidades que circulan sobre la tierra en un mapa alojado en una computadora, y todo esto es llevado a cabo en tiempo real, o como los sistemas utilizados comercialmente por la Navegación Aérea actual.

Cabe anotar que por supuesto las aplicaciones militares de este sistema fueron primero que las comerciales, por lo que suponemos que los desarrollos dentro de esta área continúan; una muestra de ello fue la gran ayuda que dio GPS durante la Guerra del Golfo Pérsico, en donde permitió que objetivos militares fueran alcanzados por misiles y otros artefactos explosivos con toda exactitud.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

GPS como siglas, significa en inglés Global Positioning System, o Sistema de Posicionamiento Global. Este es un sistema de medición basado en las observaciones de señales de radio emitidas por un conjunto de satélites llamado NAVSTAR (Navigation Satellite Time and Ranging), y captadas por una antena en el punto a posicionar sobre la superficie de la tierra. Posteriormente, las observaciones son procesadas para determinar su posición precisa.

La constelación de satélites del este sistema GPS consta de 24 de ellos orbitando la Tierra a una gran altitud (20,000 kms. aproximadamente). El sistema fue establecido y es mantenido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica. Puede dar mediciones de posición tridimensionales con una exactitud de metros (menos de 15 en aviación y hasta menos de 4 metros en móviles sobre la Tierra usando el llamado GPS diferencial). Actualmente, existen varios fabricantes de equipos electrónicos y de radiocomunicación que tienen a la venta diferentes tipos de tarjetas receptoras GPS, en donde se puede escoger la más adecuada de acuerdo a la necesidad específica. También se ha evolucionado enormemente en cuanto al tamaño de dichas tarjetas, ya que son de medidas completamente accesibles a cualquier pequeño espacio. Por dar una

referencia, una tarjeta marca Motorola, en la serie Encore de 8 canales, mide lo que un autoestereo convencional o menos.

III. COMO FUNCIONA GPS

El sistema se basa, en general y para cualquier aplicación, en calcular la posición a través de la medida de las distancias entre el objeto a localizar y varios de los satélites de la constelación. Como se muestra en la figura 3, si nosotros conocemos que la distancia al satélite A es 11,000 millas, entonces el objeto debe estar en alguna parte de una esfera imaginaria con centro en dicho satélite y teniendo un radio de 11,000 millas. Si, al mismo tiempo, la distancia del objeto al satélite B es conocida y es de 12,000 millas, entonces deberemos estar situados en el círculo en donde ambas esferas (la del satélite A y la del B) se interceptan, como se muestra.

Si además podemos conocer que estamos situados a 13,000 millas del satélite C, entonces nuestra posición se encuentra restringida únicamente a los dos puntos en el espacio donde las tres esferas se interceptan, como se muestra en la figura 4. Alguno de estos puntos es usualmente improbable (por ejemplo muy lejano en el espacio). Los receptores GPS tienen varias técnicas para distinguir el punto correcto del incorrecto. Teóricamente, estas tres mediciones son lo único que necesitamos para determinar la posición del punto o móvil.

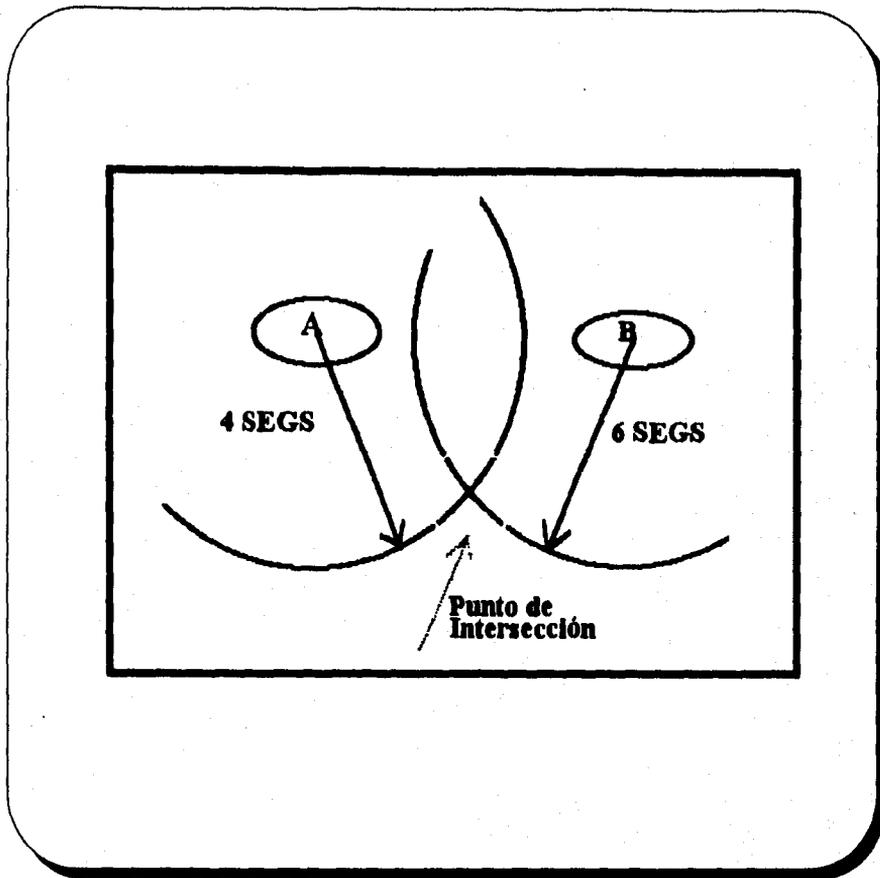


Figura 3

La idea básica detrás de la medición de distancias a un satélite es respaldada por la fórmula de velocidad, distancia y tiempo que conocemos de siempre.

El sistema GPS trabaja calculando que tanto tiempo tarda en llegar una señal de radio enviada por el satélite, y conociendo este, y sabiendo que las ondas de

radio se desplazan a la velocidad de la luz, de 186,000 millas por segundo, determinamos la distancia a el satélite en cuestión. Entonces, si podemos determinar exactamente cuando el satélite GPS inicio el envío de su señal de radio, y exactamente cuando la recibimos, podemos estimar cuanto se tardo en

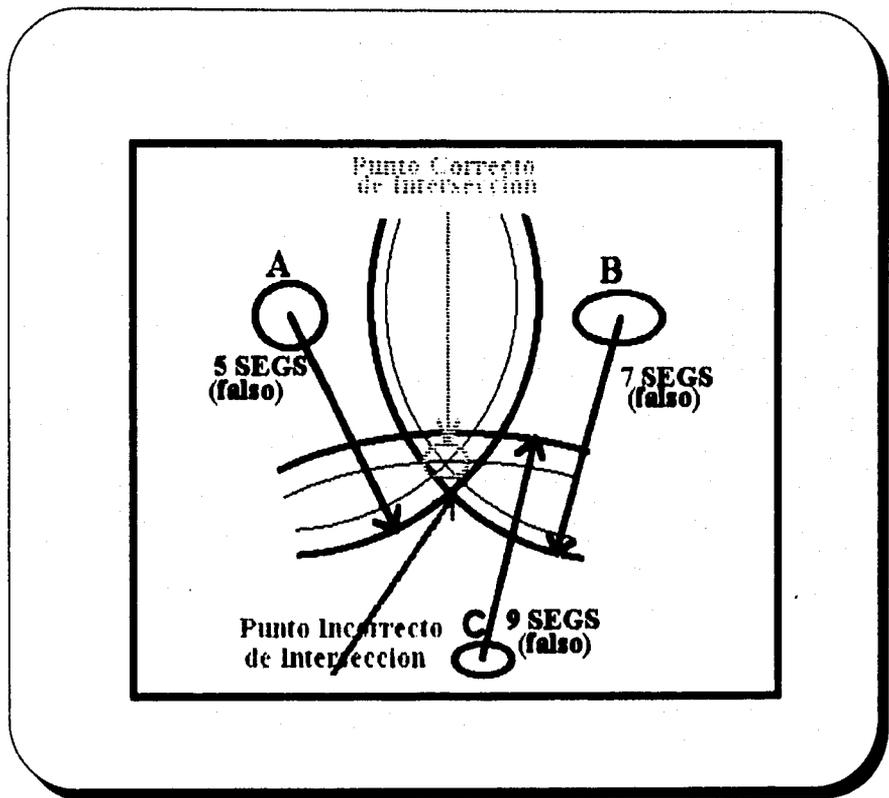


Figura 4

llegar.

Para poder saber cuando exactamente la señal salió del satélite, tanto transmisor como receptor son muy precisamente sincronizados para generar el mismo patrón de señal de radio exactamente al mismo tiempo. Este patrón o código es un complicado arreglo de pulsos que aparentemente son de tipo aleatorio, pero que realmente están cuidadosamente determinados. Dado que este código aparenta ser aleatorio (random), este es referido comúnmente como "código pseudo-aleatorio".

Cuando el receptor GPS recibe el código del satélite, este mide el tiempo que transcurrió entre que el receptor generó su propia señal y cuando recibió la misma señal proveniente del satélite, es decir, mide el defasamiento en tiempo de dos códigos idénticos, uno generado en tierra y el otro proveniente del satélite en cuestión. Aplicando la ecuación de distancia y tiempo, conoceremos entonces la distancia que no separa de ese satélite.

Por supuesto, estas mediciones deben ser sumamente precisas, hablando incluso de nanosegundos o billonésimas de segundo. Los satélites logran esta precisión a través del uso de relojes atómicos, que son exageradamente precisos. Los receptores GPS están equipados con relojes electrónicos muy precisos, pero no siempre lo suficiente. Afortunadamente, la trigonometría dice que si tres mediciones perfectas localizan un punto en tres dimensiones, entonces cuatro mediciones imperfectas pueden eliminar cualquier defasamiento

de reloj, siempre y cuando este sea consistente. Entonces, con hacer una medición extra de una señal de un satélite mas, podemos eliminar los errores por diferencias entre relojes.

Para hacer mas claros los conceptos anteriores, señalaremos un ejemplo, quitando ademas la necesidad de gráficas tridimensionales, usando solamente dos dimensiones, como puede ser el caso de un barco flotando en el mar, donde la altitud es normalmente conocida. Esto quiere decir que si nuestros relojes fueran perfectos, nosotros necesitaríamos solamente dos mediciones de distancia para podemos localizar exactamente sobre la superficie de la Tierra. La tercera medición seria nuestra medición "extra".

Viendo la figura 4, supongamos que el reloj del receptor es consistente a un segundo mas lento. Digamos también que la señal proveniente del satélite A tarda 4 segundos en llegar, mientras que la señal del satélite B llega en 6 segundos.

Entonces nosotros nos encontramos en donde las dos lineas gruesas se interceptan. Pero nuestros receptores imperfectos pueden pensar que la señal del satélite A tardo 5 segundos en llegar, y la del B tardo 7 segundos. Entonces nuestro receptor piensa que estamos localizados donde las dos lineas tenues se interceptan, punto que puede estar realmente a muchas millas de la posición real. Entonces añadimos ahora nuestra tercera medición al calculo. La señal del satélite C toma 8 segundos en llegar, y nuestro receptor piensa que tarda 9

segundos. Entonces, podemos apreciar que las tres líneas gruesas se interceptan en nuestra posición real.

Pero si ahora agregamos nuestro retardo de un segundo a la gráfica, las tres líneas tenues muestran tres posibilidades para nuestra localización, los pseudo-rangos causados por el reloj lento del receptor.

El receptor GPS, una vez recibidas estas series de puntos, asumen que el reloj está apagado. Estos aplican el álgebra para computar donde los puntos posiblemente se interceptan, y dan esta intersección como la posición real.

Existen otras fuentes de errores menores en el Sistema GPS. Ligeras variaciones pueden ocurrir en la altitud, velocidad y posición de un satélite. Estos cambios son monitoreados por el Departamento de Defensa, y las correcciones respectivas son enviadas oportunamente de vuelta al satélite en cuestión. Otras variaciones pueden ser causadas por retrasos ionosféricos y atmosféricos. Otra fuente de posible error es la llamada "Dilución Geométrica de Precisión", que significa que el punto de intersección de dos mediciones es menos preciso cuando dos satélites están muy cerca uno del otro. En un caso típico, la suma de estos errores pueden ascender a no más de 30 metros y en el peor de los casos a no más de 70 metros.

Para propósitos militares, el Departamento de Defensa puede introducir errores deliberadamente, usando un modo de operación llamado "Disponibilidad Selectiva" o S/A, en donde se da:

Mejor que 100 metros, 95% del tiempo

Mejor que 300 metros, 99% del tiempo

El otro 1% esta indeterminado. El Departamento de Defensa puede hacer estas reducciones de precisión mucho mas grandes y a voluntad.

Una forma mas sofisticada de GPS, el GPS Diferencial, permite mediciones de precisión de hasta 1 cm. Esto se hace con la ayuda de la localización de un punto fijo conocido, y encontrando las diferencias entre este y lo que nuestros receptores dicen acerca de el. Este error se introduce y se aplica a todas las mediciones efectuadas.

IV. USO EN AERONAVEGACIÓN

En esta aplicación, el equipo de receptor GPS se cataloga como un sistema de navegación aérea con una incertidumbre de hasta 15 metros error y certificado para vuelos bajo las reglas de instrumentos o IFR. El equipo funciona, como es de suponerse dadas las características del sistema GPS, a cualquier hora y bajo cualquier condición meteorológica. Presenta inmunidad a la interferencia. Funciona, como ya sabemos, a partir de calcular la posición de la aeronave en tres dimensiones: Latitud, Longitud y Altitud. El equipo GPS para aviones presenta además las siguientes características generales, variando obviamente, de acuerdo a la marca y el precio:

- * Acceso directo a datos: de aeropuertos a nivel mundial, VORs, NDBs, intersecciones y otros datos útiles para el piloto.

- * Navegación Directa: el piloto designa un destino, y con el equipo puede volar hacia él desde cualquier posición.

- * Plan de Vuelo de Navegación: el piloto puede definir un plan de vuelo con hasta 19 piemas (vectores de vuelo) o 20 puntos sobre la ruta, y así puede ser guiado automáticamente a lo largo de la ruta más apropiada.

* **Calculo de Posición:** el sistema determina la posición actual del avión en términos de latitud y longitud o de distancia y rumbo hacia cualquier punto.

* **Tiempos y Consumo de Combustible:** se puede monitorear el progreso del vuelo a manera de estimar con mucha precisión el tiempo de arribo a destino y el consumo de combustible esperado.

* **Navegación de Emergencia:** puede determinar, en caso de emergencia, el aeropuerto más cercano de la posición actual del avión, o el VOR o NDB o agencia de ayuda, con sólo presionar un botón.

* **Espacios Aéreos Controlados:** el equipo dará notificación inmediata al piloto si la aeronave se está aproximando a un espacio aéreo controlado (gracias a la base de datos de Jeppsen), o si alguna pierna o vector de la ruta de vuelo trazada o seleccionada entra o cruza un espacio aéreo controlado.

* **Planeación Previa al Vuelo:** el piloto puede, usando estos equipos, determinar previamente la distancia y rumbo a su destino, distancia y rumbo hacia cualquiera de las piernas de la ruta, distancia total planeada y otros.

* **Otras Funciones de Navegación:** se tiene acceso también a otras informaciones como tiempo total estimado, tiempo de arribo a destino, trayectoria del avión con respecto a la tierra (proyección del movimiento del avión sobre el plano), velocidad con respecto a la Tierra, altitudes mínimas de seguridad (dado que el equipo también calcula la altitud), altitudes mínimas de seguridad en la

ruta, trayectorias real y deseada (para comparar y encontrar desvíos sobre la ruta proyectada), navegación vertical, velocidad verdadera (TAS), etc.

A pesar de ser un equipo altamente confiable, no se debe perder de vista la regla fundamental de la Navegación Aérea, que dice que nunca se debe depender de un solo sistema de navegación, dado que errores o fallas pueden ocurrir.

Existen en la actualidad muchos y muy diferentes modelos de receptores GPS para la aeronavegación, tanto fijos como portátiles. Inclusive, en el caso del receptor Bendix/King KLX 100, que es portátil, se incluye también un radio transmisor-receptor manual en el mismo equipo, a pesar de que el equipo mide 7.11 X 4.57 X 19.81 cms. y pesa solamente 620 gramos.

A continuación listamos las características técnicas del receptor portátil GPS 95 XL de la marca Garmin, usado para navegación aérea:

Base de datos de Jeppesen:

 Cobertura: América o Internacional

 Aeropuertos: Identificación, ciudad/estado, país, nombre del sitio, latitud/longitud, frecuencias, sistema de medición de distancias.

 VORs: Identificación, ciudad/estado, país, nombre del sitio, latitud/longitud, frecuencias, sistema de medición de distancias.

 NDBs: mismos que el anterior

 Intersecciones: Identificador, país, coordenadas.

 Frecuencias de Comunicación: ATIS, torre, control terrestre

Pistas: Número, largo, tipo de superficie, sistemas de iluminación, configuración gráfica de pistas.

Desempeño:

Receptor: Multitrac de 8 canales, usa 8 canales para cálculo de posición.

Tiempo de obtención de datos:

Caliente: 15 segundos aprox.

Frío: 2 minutos aprox.

Autocalización: 7.5 minutos aprox.

Presición:

En posición: 15 metros

En velocidad: 0.1 nudos RMS

Dinámicas: 999 nudos de velocidad, 3 Gs.

Interfases: NMEA 180, 182, 183, unidad a unidad, PC.

Búsqueda de emergencia: Los nueve aeropuertos más cercanos, VORs, NDBs, intersecciones o aerovías del usuario.

Rutas: 20 reversibles

Temperaturas:

De operación: -15°C a +70°C

De almacenaje: -40°C a +70°C

Cubierta: Construcción a prueba de agua

Pantalla: De alto contraste, de cuarzo en matriz de punto

Teclado: Alfanumérico de baquelita.

Especificaciones Físicas:

Medidas (con módulo de baterías): 8.1 x 16.3 x 3.8 cms

Peso: 0.4 Kgs

Baterías: 4 del tipo AA

Consumo: 1.5 Watts

V. USO EN CARTOGRAFIA

Antes de que GPS fuera desarrollado por el Departamento de la Defensa Nacional de los Estados Unidos, la navegación, cartografía y geodesia apoyaban sus observaciones en las estrellas, más tarde, se utilizaron microondas y medios ópticos, todo esto para medida de ángulos y distancias. Todos estos métodos están limitados a tener visibilidad entre los puntos y a condiciones meteorológicas favorables. Por supuesto es necesario resaltar la importancia que tiene en los diferentes tipos de vehículos móviles el hecho de conocer su posición a tiempo real. Hablemos de lo que significa saber en donde se encuentra un trailer con su carga dentro de un mapa de carreteras, o en donde se localiza una patrulla específica dentro de una ciudad, o donde exactamente se encuentra una aeronave o un barco. Todo lo anterior redundo no sólo en la seguridad de los móviles sino en su eficiencia y mejor aprovechamiento. Con la aparición de NAVSTAR-GPS, se modernizaron los métodos para la navegación, y la geodesia tuvo una herramienta más para los levantamientos en general, así como la investigación y exploración tuvieron importantes avances, ya que este sistema combina los mejores atributos de los métodos ya existentes,

agregando mejor precisión, mayor rapidez y otras ventajas, logrando con esto la economía.

El sistema NAVSTAR-GPS consta de tres subsistemas o segmentos: el espacial, el de control y el del usuario. A continuación se describe cada uno de ellos.

SISTEMA ESPACIAL: esta formado por una constelación de 24 satélites colocados en 6 órbitas planas inclinadas a 55° del Ecuador, y a una altitud aproximada de 20,000 Kilómetros. Estos satélites completan su órbita alrededor de la tierra cada 12 horas. El sistema ha sido desarrollado desde 1973, lanzándose el primer satélite en 1977. Actualmente la constelación de 24 satélites permite tener 24 horas de observación con tres satélites mínimo requeridos para obtener las tres dimensiones o coordenadas X, Y y Z de un punto a localizar.

SEGMENTO DE CONTROL: esta integrado por un grupo de cuatro estaciones de monitoreo en tierra. Tres de ellas continuamente rastrean los satélites y proveen de datos a la estación principal, misma que calcula las efemérides y coeficientes de corrección del tiempo y órbitas. Esta información es mandada a las estaciones y de ahí retransmitida a cada uno de los satélites para que efectúen sus correcciones, por lo menos una vez al día, pues como se sabe, a pesar de que todo satélite tiene la facilidad de moverse de su posición ideal, existen límites de control, o sea, una caja imaginaria dentro de la cual el satélite puede desplazarse, Cuando se da alguna tendencia a abandonar este espacio, deben

aplicarse correcciones para que se vuelva a adquirir la posición adecuada del equipo.

SEGMENTO DEL USUARIO: es el que utilizan los receptores GPS. Estos receptores son usados en órbitas sobre la tierra, tanto civiles como militares, ya sea en tierra, mar o aire.

Los satélites del sistema transmiten dos señales de radio que están moduladas con tres códigos:

NOMBRE	TIPO	APLICACIÓN
P	Protegido	Uso Militar
C/A	Clear/Acquisition	Uso Civil
D	Mensaje NAV	Corrección Satélites

Además de la geodesia y la navegación, otros campo donde se aplica GPS son: control terrestre de fotogrametría tanto plana como en tres dimensiones, fotoreconocimiento, monitoreo, sistemas GIS para la topografía, estudios sísmicos, hidrografía, localización de monumentos, fotografía por satélite, redes geodésicas, proyectos de vías de comunicación y cualquier otro proyecto en general.

CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL

SEÑAL	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	CÓDIGOS
L1	1575.42 Mhz	19 cm	C/A, P y D
L2	1227.60 Mhz	24 cm	P y D

Como se puede apreciar, dadas las longitudes de onda de estas señales, se hace posible el uso de antenas pequeñas para los receptores GPS, misma ventaja que es aprovechada para los trabajos de medición en campo.

TÉCNICA DE MEDICIÓN

La técnica de la medición con GPS se basa en determinar la distancia entre el satélite y el punto observado, ya sea fijo o móvil. Esto se puede apreciar en la figura No. 1. Para conocer esta distancia, primero se obtiene el tiempo que tarda en viajar la señal emitida por los satélites hasta llegar al receptor GPS en tierra. Este tiempo es a su vez multiplicado por la velocidad de la luz (186,000 millas/segundo) a la cual viaja la señal de radio, dando esto como resultado la distancia que nos separa, esto de acuerdo a:

$$v=d/t \implies d=vt$$

donde v =velocidad de la luz o de propagación de las ondas de radio

t =tiempo que tarda en llegar la señal a la tierra

d =distancia entre el punto en cuestión y el satélite

Para hacer estas mediciones, los satélites cuentan con relojes atómicos de rubidio y cesio que es lo más estable y exacto, teniendo únicamente una variación de un segundo cada 300,000 años. El receptor GPS cuenta con su propio reloj (que no es tan exacto). Para corregir la diferencia entre los relojes del satélite y el del receptor, se utilizan métodos trigonométricos y observaciones de diferentes y varios satélites.

Además de la corrección de tiempos, hay errores en la señal causados por el viaje a través de la ionosfera, donde existe una sábana de partículas cargadas eléctricamente, y a través de la atmósfera, donde las condiciones del clima afectan la velocidad de la señal. Estos errores son corregidos mediante modelos matemáticos en el postproceso.

MÉTODOS DE LEVANTAMIENTO

Para la realización de posicionamiento con GPS existen varios métodos: estático, cinemático y pseudoestático. La aplicación de cada uno de ellos dependerá de la exactitud y características específicas que se requieran y tengan para el trabajo.

La rapidez del levantamiento de los puntos de un proyecto depende de los accesos, de una buena programación de las sesiones de observación, del mismo tiempo de observación y de la cantidad de equipos con que se cuente.

MÉTODO ESTÁTICO

El método estático es el levantamiento que requiere más tiempo de observación, pero a su vez es el que da mayor precisión.

Con este método, en el control horizontal, se puede obtener una aproximación de $5\text{mm} + 1$ parte por millón (1 ppm) de la longitud de la línea base (utilizando código "P" en L2). Entre varios puntos podemos obtener una precisión en distancia de 1:100,000 ó mejor. En control vertical la aproximación llega a ser de $1\text{cm} + 1$ ppm de la longitud de la línea base.

Para líneas con distancias de 10 kilómetros o menos y con cinco satélites a disposición, se requiere una observación mínima de 45 minutos; ahora bien, si la distancia esta comprendida entre los 10 y los 20 kilómetros, una hora de observación será suficiente, y para líneas de distancia mayor a 20 kilómetros se requerirá 1.5 horas o mas según la precisión deseada y las condiciones imperantes. A mayor tiempo y mas satélites en observación se obtiene mayor exactitud. (Ver figura No. 2).

MÉTODO CINEMÁTICO

Con el levantamiento Cinemático (en movimiento) obtenemos posicionamiento permaneciendo un mínimo de tiempo de 45 segundos en cada punto.

La precisión que se llega a obtener con este método es de entre primer y segundo orden, teniendo cinco satélites en vista constante y una buena geometría de la constelación. La aproximación con equipos de doble banda y código "P", es de $2 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$ de la longitud de la línea base, tanto en control horizontal como en vertical.

Para iniciar un levantamiento cinemático se debe ocupar una línea base conocida o crearla por medio de observación estática o por cambio de antenas (swap).

Para este último método de inicialización, un receptor GPS se debe colocar en una estación donde se conozca la posición exacta.

Una vez inicializado el levantamiento, un receptor GPS se deja fijo y otro se posiciona el tiempo requerido (45 segundos) en los diferentes puntos a reconocer.

Los receptores deben mantener al menos cuatro satélites a la vista, tanto durante la observación en el punto como durante el tránsito al siguiente punto. Si se llega a perder la señal, hay que volver al punto inmediato anterior y tomar observaciones de nuevo, para continuar después a los siguientes puntos.

Con este tipo de reconocimiento Cinemático GPS, se pueden levantar hasta 50 o más puntos con dos receptores durante una sola sesión reconocedora de 4 horas. Gran parte del éxito de una misión radica en la planeación de la misma. Por ello, es muy importante contar con una buena constelación de satélites, ya que de no existir una geometría apropiada, esto afectará la precisión del levantamiento.

En muchos casos pueden trasladarse los requerimientos para el reconocimiento estático al sistema Cinemático, pero este último lleva a restricciones adicionales, sin embargo esta técnica puede convertirse en una parte fundamental de la caja de herramientas de los reconocedores, tanto en la actualidad como en el futuro.

MÉTODO PSEUDOESTÁTICO

Por último, el levantamiento Pseudoestático que requiere, al igual que los métodos anteriores, de por lo menos dos receptores. Un receptor permanece fijo durante todo el tiempo que tome el levantamiento, mientras que el receptor móvil tendrá que estar en cada punto de 5 a 10 minutos, cuando las líneas por levantar sean de menos de 10 kilómetros. En distancias mayores se requiere más tiempo de observación. Con este tipo de reconocimiento no es necesario tener en vista 4 satélites cuando se hace el tránsito de punto a punto como se requería con el método Cinemático. Pero cada punto debe ser ocupado y observado al menos 2

veces, con un intervalo de tiempo entre observación recomendable de una hora. El procedimiento Pseudoestático depende de los cambios en la geometría de los satélites. Así, con una hora entre observaciones es suficiente para líneas cortas menores de 10 kilómetros. Para líneas mas largas se requiere mas tiempo de observaciones.

RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO

Todo levantamiento debe ser fijado a uno o varios puntos de control de la red con que se quiere referenciar o calibrar las mediciones GPS, para la obtención de resultados compatibles al datum o referencia local. Si se quieren tres dimensiones se necesita un vértice geodésico con su posición, tanto horizontal como vertical, perfectamente conocida. En su defecto, se debe hacer la liga con puntos de control de apoyo horizontal y bancos de nivel de precisión. Entre más puntos de liga se tengan, los resultados de los puntos o estaciones a reconocerse con GPS serán de calidad superior. Estos puntos de control que sirven para fijar nuestros polígonos a un datum conocido, deben ser observados mínimo dos veces para hacer más fuerte nuestro ajuste.

RESULTADOS DE LEVANTAMIENTOS

Los resultados de posicionamiento con GPS son presentados en coordenadas geodésicas, o sea: latitud, longitud y altura, usando el sistema WGS-84 (conocido como World Geodestic System). Debe tenerse precaución de no confundir la altura GPS con la elevación sobre el nivel medio del mar o NMM, dado que la altura GPS esta basada en una superficie matemática llamada Elipsoide, y las elevaciones sobre el NMM están basadas en una superficie equipotencial llamada Geoide, esto haciendo uso de los principios que rigen a la presión atmosférica. Ambas superficies son el cero para sus respectivas alturas. Por lo tanto, para convertir la altura elipsoidal GPS al NMM, es necesario conocer la diferencia de altura entre los dos sistemas. Esta diferencia no es constante, dado que cambia gradualmente de punto a punto en cualquier área. Este cambio referido es llamado Undulación Geoidal. Cabe señalar que en zonas montañosas este cambio es muy constante.

Cuando se hace un levantamiento GPS, no es necesario tener visibilidad entre los receptores, ya que entre ellos no se envían o reciben señales, pero sí de los satélites que orbitan la tierra hacia los receptores. Es por ello que las estaciones o puntos deben ser escogidos en lugares abiertos al cielo y así evitar, en lo posible, que se bloqueen las señales provenientes de los satélites respectivos. El equipo GPS hace las observaciones de los satélites cuando estos están 15° arriba del horizonte, por lo que se debe tener la visión más despejada que se

pueda en el punto para observar los satélites y que exista lo menos posible pérdida de la señal. Edificios o construcciones elevadas cerca de las estaciones pueden causar interferencia de recepción de la señal a la antena. Un edificio de un piso, por ejemplo, a 15 mts alejado del punto, ya no causa bloqueo, dado que no afecta al ángulo de recepción entre los satélites y el mencionado receptor. Habrá que cuidar además, de no estar cerca de transmisiones de televisión, radares, radios, microondas, etc., por lo menos a cuatrocientos metros de distancia. En sitios donde no haya otra opción y esté semiobstruido, los datos pueden ser aún así recolectados y corregidos en el postproceso.

DESPUÉS DEL LEVANTAMIENTO

Una vez efectuado el trabajo en campo, la información es descargada en una computadora para su postproceso. Esta descarga tarda aproximadamente un minuto por cada hora de grabación en campo. El postproceso consiste en operaciones estadísticas, donde además se eliminan distorsiones y pérdidas de ciclos de la señal. Los puntos levantados se procesan por pares, formándose vectores o líneas base que a su vez integran sesiones conformadas por los puntos que fueron levantados al mismo tiempo. Se crean pequeños polígonos por cada sesión, en donde el número de lados de cada polígono está determinado por el número de receptores. Cada sesión se va uniendo con la subsecuente,

para finalmente completar toda una cadena, formada por los vectores de cada punto en cuestión.

En todo levantamiento con GPS, al instante mismo de la medición la posición exacta del punto en cuestión es bastante cercana, sin embargo después de postprocesar la información medida, se llega a obtener una aproximación muy exacta de centímetros o mejor, dependiendo de la longitud de la línea base observada.

El último procedimiento para obtener la posición de los puntos levantados es el ajuste de toda la red que conforman todos ellos.

Una vez obtenidas las mediciones de los puntos y procesados los vectores que forman, se analiza el cierre de la poligonal general. En seguida se realiza un mínimo ajuste, donde observamos diferentes factores para conocer la precisión de los resultados, mediante eliminación de soluciones erróneas o malas que afectan la red de puntos. Se ajustan de nuevo las observaciones pudiendo ponderar unas contra otras. En este proceso se utiliza la información de los puntos de control, del datum al que referenciamos las mediciones GPS. Si se desea hacer los ajustes con base en uno o varios puntos, se ingresa la posición de ellos, realizándose solo en las coordenadas indicadas pudiendo ser X, Y y Z o cualquiera. Al término del ajuste de puntos se tiene la opción de cambiar de un datum a otro, de un sistema de coordenadas a otro y sus diferentes proyecciones, según las necesidades de información del proyecto.

Hay varios factores a cuidar para obtener una buena precisión de los resultados de un levantamiento con GPS.

- a) La altura de la antena y colocación de la misma, en un lugar donde el bloqueo de la señal sea nulo o mínimo.**
- b) Procurar que el tiempo de duración y número de satélites grabados sean los óptimos.**
- c) La geometría de la constelación de satélites**
- d) Efemérides exactas de los satélites**
- e) Correcciones a la ionosfera y condiciones atmosféricas**
- f) Transformación de los resultados GPS al datum local, con puntos de control o "liga" de buena calidad para referenciar la posición de los puntos.**

VI. USO EN SISTEMAS "AVL"

Las siglas "AVL" provienen de las palabras en Inglés "Automatic Vehicle Localization" o "Localización Automática de Vehículos". Esto es, haciendo uso del Sistema GPS, podemos localizar con una precisión de hasta 4 metros, en el caso del GPS Diferencial, vehículos que estén estáticos o en movimiento sobre la superficie de la Tierra, a cualquier hora, cualquier día y bajo las condiciones meteorológicas que sean. La importancia de la aplicación del sistema GPS en este renglón se debe a que , por ejemplo, a través de un estudio efectuado en 1986 el Departamento del Transporte de Estados Unidos, se estimaba que las pérdidas anuales por tráfico no comercial debidas a retrasos o malas rutas eran de 23,000 millones de dólares; por esto los beneficios incluyen más eficiencia, menos vehículos, menos personal, incremento en la seguridad de los oficiales en el caso de que se utilice el equipo en patrullas, etc. De esta manera, se puede hablar de beneficios generales como localizar en tiempo real a cada uno de los vehículos de una flotilla con la frecuencia que el usuario determine, controlar el despacho de una flotilla, aumentar los niveles de seguridad durante la operación de la flotilla, ya que si una unidad es robada o asaltada, conocemos inmediatamente su ubicación, optimizar rutas, lograr más eficientes operativos en el caso del uso policiaco, etc.

DIAGRAMA GENERAL DE UN SISTEMA "AVL" USANDO TECNOLOGÍA GPS

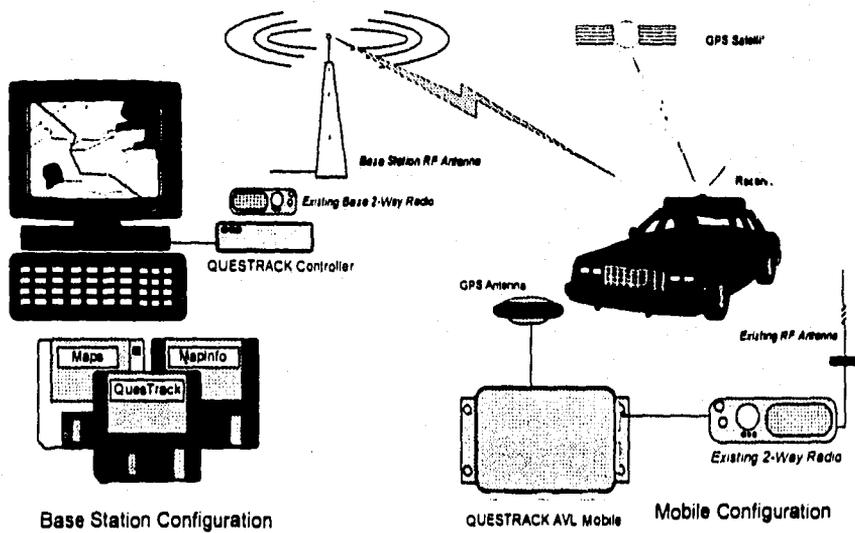


Figura 5

En una aplicación AVL, la estructura del sistema es la siguiente: en el vehículo o móvil a localizar se coloca la antena y la tarjeta receptora GPS. Se calcula con ella la posición del vehículo en función de Latitud y Longitud, como en los casos anteriores. Una vez teniendo este dato, este debe ser enviado a una base de operación. Esto puede hacerse a través de cualquier medio de comunicación, ya que se trata de información electrónica. De esta forma, podemos utilizar un transmisor-receptor vía satélite, un aparato convencional de radiocomunicación, un radiotransmisor troncalizado, un teléfono celular, etc. Si usamos por ejemplo un radiotransmisor en frecuencia VHF, lo que se hace es convertir los datos de posición a tonos y luego enviarlos a través de controlar el transmisor del radio. En la base en que se reciban, se convierten de tonos a información digital nuevamente y se introducen a una computadora a través de un puerto serial RS-232.

En la computadora que reciba los datos, se debe contener un mapa Georeferenciado de la zona de interés o por la cual circule el móvil a localizar. El hecho de que el mapa deba ser georeferenciado se trata de que estamos recibiendo desde el móvil las coordenadas geográficas del vehículo, por lo cual el mapa en cuestión debe ser real respecto a Longitud y Latitud de la zona que abarque. De esta manera, y mediante un programa de computadora, haremos que aparezcan en pantalla, sobrepuestos al mapa, los móviles localizados. Esto es, las coordenadas del vehículo deberemos ubicarlas sobre el mapa y esto

reflejarlo en la pantalla en donde el mapa este siendo mostrado. Con ello, podremos seguir inclusive la trayectoria de cada uno de los miembros de la flotilla a controlar.

Como se puede apreciar, en aplicaciones de este tipo, y relacionándolas con la operación policiaca, por mencionar alguna, si un ciudadano reporta una emergencia, en el control de la policía pueden ubicar realmente la unidad o unidades mas cercanas, y con esto, dar un mejor servicio. En las empresas de transporte de valores o en las de reparo de bienes, también es una herramienta muy útil, dado que optimiza los tiempos pues aprovechamos realmente el tiempo que la unidad se este desplazando o este en la calle.

Como en los otros casos, existen en la actualidad varias empresas tanto en Estados Unidos como en México que venden este tipo de sistemas, con variedad de accesorios y facilidades, de acuerdo al precio. Un ejemplo de ello es la empresa Omnitacks, que vende el servicio de localización de trailers y camiones de pasaje y carga a tiempo real y a lo largo de toda la República Mexicana. Con esto, se logra un transporte de carga mucho mas eficiente y seguro

VII. CONCLUSIONES

Como en muchas otras innovaciones tecnológicas, en el caso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) la desesperada carrera por lograr mejores elementos, equipos y dispositivos para la guerra, ha aportado una valiosa herramienta al ámbito del transporte en general. Esto señalado dado que el origen real del sistema se debió a la necesidad de localizar objetivos militares durante la guerra del Golfo Pérsico.

A pesar de que el Departamento de Defensa de Estados Unidos introduce señales de error al sistema con el fin de evitar que se logren localizaciones con incertidumbres menores a 4 metros, es evidente que para uso en el transporte en general, como lo son los trailers, camiones de carga, barcos, aeronaves, etc., estos errores no evitan que se obtenga una valiosa utilidad en su uso.

En la Aeronavegación, a pesar de que desde hace varios años existen muy confiables sistemas de vuelo o navegación por instrumentos, el equipo GPS se añade a la lista sobrepasando a los anteriores por eficiencia, facilidad de manejo y confiabilidad. Además, a través de económicos equipos portátiles, las aeronaves pequeñas que por costo no pueden contar con equipos completos y mayores de navegación por instrumentos, cuentan ahora con un sistema que les permite alcanzar destinos con una gran facilidad y con la seguridad de un vuelo

confiable. Gracias al alto grado de integración de los componentes electrónicos, estos equipos, fijos o portátiles, cuentan con bases de datos que dan acceso a los pilotos a toda la información necesaria para la navegación. Cabe señalar que los fabricantes de estas bases de datos, están actualizándolas constantemente, para mantener a los aviadores perfectamente enterados de nuevos aeródromos o condiciones que afecten a un vuelo.

En el área de la Cartografía o Geodesia, la herramienta GPS ha logrado simplificar enormemente los trabajos, dado que gracias a su precisión, los levantamientos son altamente confiables. De la misma manera, y como es obvio suponer, al efectuar levantamientos en campo, es complicado el acceso a los lugares de trabajo, por lo que el hecho de transportar pesados y grandes equipos es una inadecuada solución. Así, el sistema GPS, además de ser de gran utilidad, proporciona la ventaja de tamaño que hemos mencionado anteriormente, por lo que su transporte no es un problema más. Debido a la facilidad y rapidez de operación del GPS, el avance que se consigue en los levantamientos es también mucho mayor, por lo que los costos se disminuyen a cambio de tener más en menos tiempo y, por supuesto, con menos personal de campo. Finalmente, los resultados de estas tareas, son de mejor calidad.

Respecto a los Sistemas de Localización Automática de Vehículos, podemos reiterar que el GPS dominará el mercado de los accesorios para el transporte en muy poco tiempo. En este terreno, no sólo se consigue una mayor eficiencia en la

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

operación de flotillas grandes y pequeñas, sino que, considerando la grave situación de inseguridad que se vive en la actualidad, el sistema GPS aporta la herramienta que se necesita para aumentar la protección a los vehículos, así como dar también la facilidad de colocar otros accesorios que, dependiendo del tipo de flotilla, permitan un más moderno desarrollo de la actividad correspondiente. En esta área de AVL es conveniente señalar ejemplos como los siguientes:

- * Flotillas de transporte de carga y pasaje: tanto por seguridad como por eficiencia, si conocemos a tiempo real la localización de nuestros camiones, podremos informar a nuestros clientes acerca de la exacta llegada de sus mercancías. También nos permite enviar oportunamente el apoyo necesario a una unidad en caso de descompostura o asalto, evitando con esto innecesarios retrasos. Además, evitamos que las unidades sean mal utilizadas por choferes que hacen fletes por su cuenta o que simplemente se detienen en lugares no permitidos y por lapsos de tiempo no autorizados. En el caso del transporte de pasajeros, podemos evitar, por ejemplo, que los conductores se detengan a subir pasajeros en lugares no autorizados por la empresa. Utilizando programas de computadora de no mucha complejidad, podemos detectar en forma automática el momento en que alguno de los vehículos de la flotilla se desvíe de una ruta predeterminada. Como ventaja adicional, si uno de los camiones es asaltado y nos lo puede informar a través de un botón de pánico, por ejemplo, podremos

seguir a la unidad a tiempo real a lo largo de todo el recorrido que los ladrones efectúen para trasladar la unidad a donde pretendan descargarla, por lo que su captura se vuelve mucho más probable.

* Flotillas de patrullas para vigilancia y Seguridad Pública: en este rubro podemos comentar muchos puntos importantes. Para empezar, el despacho de las patrullas a lugares en donde ocurra una emergencia, se vuelve totalmente eficiente, ya que sabemos en donde está realmente cada una de las unidades, por lo que podremos mandar a los operativos a las que se encuentren más cerca, además de que validamos si efectivamente se desplazan hacia el punto de conflicto. Relacionado con lo mismo, y como es fácil apreciar, se puede diseñar el desarrollo de un operativo policiaco de gran escala desde la pantalla de la computadora, esto es, el bloqueo de calles, el "peinar" una zona, el buen manejo de una persecución, etc. Como esto se hace desde una computadora, este proceso se puede grabar, por lo que se permite el posterior estudio y análisis de los operativos, para mejorarlos o modificar estrategias. Otro punto de vital importancia es que se puede estar verificando a tiempo real que los recorridos rutinarios de patrullaje de vigilancia de las unidades policiacas efectivamente se lleve a cabo, y, al igual que en los vehículos de transporte, se pueda detectar el momento en que una unidad abandone su ruta. De esta manera la eficiencia de las flotillas de patrullas se incrementaría en porcentajes inimaginables, evitando también una gran cantidad de actos de corrupción. Como nota final en este tema,

cabe comentar que varios cuerpos policíacos en ciudades como la de México ya estudian este tipo de sistemas tratando de dar cabida a su pronta implementación.

En todas las vertientes de aplicación antes mencionada, ya existen equipos comerciales que se pueden adquirir. Como en casi todas las innovaciones tecnológicas, los precios de los sistemas GPS han ido disminuyendo al paso de los años. En la actualidad, podemos encontrar, por ejemplo, equipos portátiles de marcas tan prestigiadas en sistemas de aeronavegación como Garmin o Bendix/King, por no más de 1,200 dólares Americanos (9,400 Nuevos Pesos). En el caso de sistemas para Localización Automática de Vehículos (AVL), hay también varias marcas que en México ofrecen equipos por alrededor de 2,000 Dólares por unidad con una base de control de 7,000 Dólares aproximadamente, dependiendo de los mapas de nuestro interés que se coloquen en la computadora central de control.

Por todo lo anterior, podemos afirmar que la tecnología GPS es una sensacional herramienta para el transporte y las comunicaciones de hoy, además de estar seguros que en el aspecto económico es perfectamente accesible. Como también ya se dijo, en todas las áreas de aplicación ya se encuentra disponible en México y, estamos seguros, será tema habitual de operación de medios móviles de transporte en muy poco tiempo.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Manual del equipo navegador GPS para avión, marca Trimble, Mod. TNL 2000T
- Manual de sistema GPS para cartografía marca Ashtech Mod. P-12
- Manuales GPS portátil Garmin y Bendix/King
- Manual usuario sistema AVL "Quest Systems de México".

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL "GPS"

Glosario de Términos Técnicos

- GPS:** Sistema de Posicionamiento Global
AVL: Sistema de localización Automática de Vehículos
Pulsos: Señales secuenciales con parámetros predefinidos
Defasamiento en Tiempo: Diferencia entre el tiempo en que se emite y se recibe una señal
Reloj: Dispositivo electrónico que marca el tiempo interno de operación de un equipo
IFR: Reglas de Vuelo por Instrumentos
Latitud: Arco de meridiano medido entre el Ecuador y un punto
Longitud: Arco de Ecuador contado desde el meridiano de origen (Meridiano de Greenwich) hasta el meridiano del lugar
Altitud: Distancia vertical desde el nivel del mar hasta el punto referido
VOR: Radioayuda para la navegación aérea llamada Faro Omnidireccional de Hiperfrecuencia
NDB: Radioayuda para la navegación aérea llamada Radiobaliza no direccional
Datum: Línea de referencia para mediciones
Vector: Elemento matemático para representar dirección, magnitud y sentido
VHF: Banda de Muy Alta Frecuencia