



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA LIDAR DE BAJO
COSTO PARA GENERACIÓN DE MAPAS
TOPOGRÁFICOS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO
P R E S E N T A :

JESÚS LEOPOLDO VENEGAS VILLANUEVA

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. JORGE PRADO MOLINA



CD. UNIVERSITARIA MÉXICO DF

ENERO 2005



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.

DEDICATORIAS

A mis padres por darme la vida y, no conformes con esto, haberme apoyado siempre en todo lo que me he propuesto. A José Venegas, mi padre, que me levantaba en las mañanas aunque yo no quisiera y Yolanda Villanueva, mi madre, que siempre salió a la puerta a despedirme y desearme buen día.

A Yola porque siempre que me veía haciendo tarea en las noches me decía “Ya duérmete” y yo le hacía caso.

A Faby por su apoyo para sentir que podía hacer cien tesis y por desvelarme solo lo suficiente para poder acabar esta.

A mis amigos de la Facultad que sin darnos cuenta y cuando menos lo pensamos ¡acabamos!

A Ricardo Ramírez, Antonio Guerrero y Javier Ramírez que me enseñaron a trabajar y nunca decir “no se puede”.

A Dios por poner a todas estas personas en mi paso por la vida y cumplirme esa frase que dice mi papá: “Algún día en algún lugar”.

RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme el espacio y el tiempo no solo para poder estudiar sino para formarme como persona.

A la Facultad de Ingeniería por los conocimientos compartidos conmigo y con sus alumnos, todos aquellos invaluableles.

Al Instituto de Geografía de la UNAM por todo el apoyo brindado para la realización de esta tesis.

A mi director de tesis Jorge Prado Molina por toda su guía.

A todos mis profesores porque su labor es poco reconocida pero vital para la Universidad.

ÍNDICE

Dedicatorias	i
Reconocimientos	ii
Índice	iii
Resumen	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Percepción remota	2
1.1.1. Fotografía aérea e imágenes de satélite	2
1.1.1.1. Fotogrametría y métodos de interpretación	3
1.1.1.2. Toma física de las fotografías	4
1.1.2. Videografía y fotografía de pequeño formato	5
1.2. LIDAR	6
1.2.1. Funcionamiento	7
1.2.2. Aplicaciones	8
1.3. Sistemas Láser	8
1.4. Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)	9
1.4.1. GPS Diferencial	10
1.4.2. WAAS	11
1.5. Sistemas de Navegación Inercial	13
1.5.1. Principios de funcionamiento	14
1.5.2. Plataformas aéreas	15
2. PARTES QUE COMPONEN UN SISTEMA LIDAR	19
2.1. Escáner láser	19
2.1.1. Principios básicos de láser	19
2.1.2. Tipos de láser	21
2.1.3. Clasificación y seguridad en los equipos láser	21
2.1.4. Medición de distancia con luz láser en un LIDAR	22
2.2. Sistema GPS	23
2.2.1. Organización del Sistema de Posicionamiento Global	24
2.2.1.1. Segmento Espacial	24
2.2.1.2. Segmento de control	24
2.2.1.3. Segmento de usuario	24
2.2.2. Triangulación y posicionamiento	25
2.2.3. Sistemas de coordenadas geodésicas	26

2.2.4. Señales manejadas por el GPS	26
2.2.5. El código NMEA	27
2.3. Sistema de Navegación Inercial (SNI)	28
2.3.1. Marco inercial y sistema de coordenadas fijo a la plataforma	28
2.3.2. Sensores inerciales	29
2.3.2.1. Acelerómetros	29
2.3.2.2. Acelerómetros de estado sólido	30
2.3.2.2. Giróscopos	30
2.3.2.2.1. Giroscopio vertical	32
2.3.2.2.2. Giroscopio de estado sólido	32
2.3.2.2.3. Giroscopio láser	34
3. DISEÑO DE UN LIDAR PARA OBTENCIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS	37
3.1. Sistemas láser	39
3.1.1. Sistema RIEGL LMS-Q280	39
3.1.2. Sistema RIEGL LMS-Q140	41
3.2. Sistemas de Posicionamiento Global	42
3.2.1. Sistema Trimble AgGPS 132	42
3.2.2. Sistema NovAtel ProPack-G2	43
3.3. Sistema de Navegación Inercial	44
3.3.1. Sistema de referencia de la vertical	44
3.3.2. Sistema NovAtel Black Diamond	46
3.3.3. Sistemas Pos AV 310, 410 y 510 de Applanix	47
3.4. Computadora de abordó	48
3.5. Plataforma estabilizada	49
3.6. Esquemas de diseño del sistema LIDAR	49
4. CÁLCULOS DE LA PRECISIÓN TOTAL DEL SISTEMA	53
4.1. Fuentes de error en un sistema LIDAR	54
4.1.1. Errores del escáner láser	55
4.1.1.1. Divergencia del láser	55
4.1.2. Errores del GPS	56
4.1.2.1. Retrasos atmosféricos	56
4.1.2.2. Dilución de la precisión (DOP)	57
4.1.2.3. Disponibilidad selectiva y “anti-spoofing”	58
4.1.2.4. Otras fuentes de error	58
4.1.3. Errores del Sistema de Navegación Inercial (SNI)	59

4.2. Precisión del escáner láser	60
4.3. Precisión del GPS	64
4.4. Precisión del sistema Inercial	64
4.5. Precisión total	65
4.6. Ejemplo de cálculo de la precisión de un sistema LIDAR	69
5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	75
5.1. Resultados	75
5.1.1. Plataforma estabilizada	76
5.1.2. Localización de la antena del GPS	77
5.1.3. Comparación de los diez sistemas considerados	77
5.1.4. Discusión sobre la precisión	78
5.1.4.1. Estimación de precisión por comparación de sistemas comerciales	78
5.2. Conclusiones y recomendaciones	80
5.2.1. Conclusiones	81
5.2.2. Recomendaciones	81
Apéndice A	83
Apéndice B	86
Bibliografía	89

RESUMEN

Una necesidad muy importante en nuestro país, es la generación de cartografía actualizada para la realización de una gran diversidad de estudios del territorio Nacional.

Para generar o actualizar un mapa, además de la obtención de imágenes aéreas, es necesario contar con los modelos de elevación del terreno, ya que éstos permiten obtener una escala uniforme a lo largo de toda la carta. Los métodos tradicionales para generar dichos modelos, consisten en llevar a cabo levantamientos topográficos para ir obteniendo las curvas de nivel correspondientes. Otra manera de obtener esta información es utilizar métodos fotogramétricos, que a través del establecimiento de una serie de puntos conocidos en el terreno (puntos de control), se van obteniendo las curvas de nivel, basándose en triangulaciones.

Existe una tecnología novedosa llamada LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) que permite la obtención de los modelos topográficos del terreno, de una manera más sencilla y rápida, con respecto a los métodos mencionados, aunque a precios muy elevados, debido al alto costo de adquisición de esta clase de equipos (más de 1 millón de dólares). El LIDAR es un sistema aeroportado que utiliza la medición del tiempo que tarda un rayo LASER en retornar, una vez que ha impactado con el terreno, obteniendo una medida de altitud. El sistema genera un barrido lateral, al mismo tiempo que la aeronave va avanzando, logrando un cubrimiento de todo el terreno. Un sistema de localización GPS facilita la ubicación geográfica de la nave en todo momento y un sistema de navegación inercial, proporciona los tres ángulos de desviación con respecto a un sistema de ejes fijos en Tierra. De esta manera es posible reconstruir, en post-proceso, el mapa de elevaciones del terreno bajo estudio.

Esta tesis trata sobre el diseño de un sistema LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) de bajo costo, cuyo propósito principal es el de generar modelos digitales de elevación del terreno. Éstos son utilizados, principalmente, para producir mapas, modelos tridimensionales y para corregir las diferencias de escala, debidas al relieve, en las fotografías aéreas (generación de ortofotos). El LIDAR es un sistema aero-transportado rápido y confiable que captura gran cantidad de datos de elevaciones, permitiendo una alta precisión y densidad de información, sobre una determinada zona.

El sistema LIDAR consiste de un equipo láser que emite pulsos desde una aeronave y los detecta de regreso, mide el tiempo que tardan en viajar y calcula las distancias hacia el terreno. Los datos de distancia se combinan con la información de localización y orientación en tres ejes, proporcionada por un sistema de posicionamiento global y de navegación inercial, para obtener, en post-proceso, las coordenadas x, y, z de cada uno de los elementos del terreno.

Se hace una descripción del diseño, equipos y análisis de precisión elaborados y se explican los procedimientos que deben ser seguidos para la integración de un sistema LIDAR para la generación de mapas de elevación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La elaboración de planos detallados de la superficie terrestre ha sido siempre una tarea necesaria para el hombre desde que comenzó a explorar el planeta en que vivía. Muy al principio de la historia, en las culturas China y Egipcia esta actividad se reducía a elaborar simples croquis que únicamente podían dar rumbo y posición poco confiables. Fueron los egipcios los que establecieron la cartografía como ciencia y fueron otras culturas como la fenicia y la griega quienes le dieron auge. Sin embargo, fue el desarrollo de las técnicas de navegación marítima, aérea y espacial, así como la irrupción de los sensores de estado sólido y el control computarizado, lo que nos ha llevado a los avances que hoy conocemos, teniendo en la cumbre de este desarrollo al Sistema de Posicionamiento Global o GPS.

Hoy en día, la observación y medición precisa de la tierra está en su plenitud como actividad económica. Las generaciones anteriores a 1950 medían distancias y tomaban fotografías utilizando dispositivos ópticos que captaban la radiación electromagnética proveniente del sol y que era reflejada por los objetos. Dicha radiación podía estar en la banda de la luz visible, infrarrojo y ultravioleta, estos dispositivos se conocen como pasivos, es decir, que no emiten radiación. Actualmente, se han construido dispositivos que emiten radiación (activos), con la ventaja que es posible tener actividad sin importar el grado de iluminación de la zona de interés. Entre otras ventajas, permiten trabajar de noche o en un día nublado, cosa que resulta imposible con instrumentos pasivos convencionales. Los ejemplos típicos de estos equipos son el RADAR y el LIDAR, los cuales se han utilizado en Geodesia para reducir significativamente tiempos y, por supuesto, también los costos.

En este trabajo de tesis se diseña un sistema LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) o medición de distancias por medio de la detección de la Luz, para obtención de mapas topográficos. Este proyecto se lleva a cabo en el Instituto de Geografía de la UNAM, donde se desarrolla tecnología alternativa de percepción remota, sustituyendo a las tradicionales técnicas

fotogramétricas y de elaboración de Modelos Digitales de Terreno (MDT). Esta tecnología combina un GPS, un sistema de navegación inercial independiente de la aeronave y un escáner láser. Bajo la mayoría de las condiciones este sistema provee mayor precisión que las técnicas topográficas tradicionales, en tiempos significativamente menores.

1.1. PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota, también llamada teledetección, puede definirse como la ciencia y arte de obtener información de un objeto, analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto. Al leer estas líneas, usted ejecuta un acto de percepción remota: un ente físico, la luz, que llega reflejada desde *el objeto*, en este caso la hoja de papel, atraviesa cierta distancia hasta que es capturada por un *sensor*, sus ojos, que la envían a un *procesador*, su cerebro.

La historia de la percepción remota comenzó hace unos 600 millones de años, cuando alguna forma inferior de vida animal diferenció algunas de sus células, volviéndolas sensibles a diferentes tipos de fenómenos físicos, entre dichas células había algunas que eran fotosensibles. Durante millones de años dicho rudimento fotosensible evolucionó convirtiéndose en un poderoso y sofisticado sensor: el ojo humano. Con el avance de la ciencia hubo la tendencia de imitarlo; actualmente conocemos un equivalente artificial, la cámara fotográfica, que hizo su aparición hace algo más de un siglo y fue mejorada de manera importante durante la década de 1930 para ser aplicada en la fotografía aérea con fines militares. La Segunda Guerra Mundial dio un gran impulso a la fotografía aérea, así como a otras formas de percepción remota. El paso a la modernidad se dio en la década de 1960 cuando las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas y los sensores electrónicos multispectrales, acoplados a computadoras, reemplazaron las cámaras fotográficas.

Las aplicaciones de la percepción remota incluyen el reconocimiento estratégico de instalaciones y posiciones, evaluación de recursos naturales, planeación de caminos y otras obras civiles, crecimiento urbano, etc., es por ello que cada día se exige mayor precisión en las mediciones y la técnica LIDAR cumple muy bien en este proceso, como será explicado más adelante.

1.1.1. Fotografía aérea e imágenes de satélite

La fotografía aérea ha ayudado en los últimos tiempos a planear carreteras, prevenir inundaciones, reconocer y separar tierras, encontrar recursos naturales, evaluar tasas de deforestación, entre otras, es por ello que los procesos relacionados con ella se han ido modernizando en respuesta a las exigencias del medio. Las técnicas de fotografía aérea se han desarrollado enormemente desde de la década de 1950 con la creación de la fotogrametría, el resto del trabajo había sido simplificado y mejorado gracias al desarrollo de modernos teodolitos, niveles e instrumentos electrónicos para la medición de distancias.

Hasta 1946 la percepción remota se efectuaba fundamentalmente desde aviones o globos, en ese año se tomaron las primeras fotografías desde cohetes V-2 capturados a los alemanes y tales experiencias fueron decisivas para ilustrar el valor potencial de la fotografía desde alturas

orbitales. Dicho potencial se volvió más aparente en las misiones espaciales a partir de 1961: Mercury, Gemini y Apolo.

El esquema operativo de un *satélite de observación* se representa en forma muy simplificada, en la figura 1.1. Los objetos terrestres, iluminados por la radiación solar, la reflejan luego de introducir en ella modificaciones inducidas por la misma estructura y composición de dichos objetos. La radiación reflejada es capturada por los sensores del satélite, siendo parcialmente procesada a bordo de éste y retransmitida a estaciones receptoras terrestres para su posterior procesamiento y análisis.

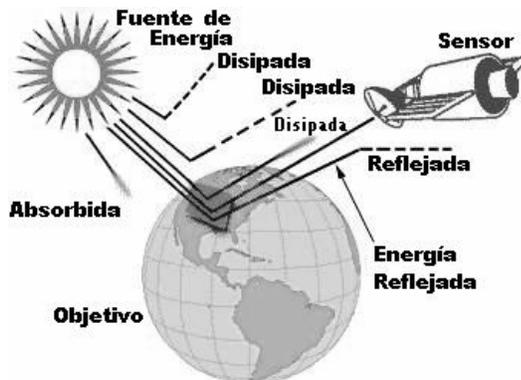


Fig. 1.1. Sistema de percepción remota satelital.

La percepción remota utilizando satélites es muy cara, por ello se vio la ventaja de seguir utilizando técnicas aéreas, pero ayudados por cámara fotográficas digitales; que han probado tener eficacia aunque a costos todavía elevados.

1.1.1.1. Fotogrametría y métodos de interpretación

La fotogrametría es un método utilizado para obtener información fidedigna y precisa de objetos físicos y su entorno por medio de procesos de registro, medida e interpretación de imágenes y modelos fotográficos. Para lograr información sobre las características geométricas de un objeto, se sustituye la medición directa por medición en fotografías, o en modelos fotográficos.

En la fotogrametría existen dos áreas de estudio específicas, la métrica y la interpretativa. La métrica consiste en la ejecución de medidas precisas de las fotos y otras fuentes de información que determinan la localización de puntos específicos en el terreno, sus medidas físicas, distancias y volúmenes. Esta ciencia tiene multitud de aplicaciones entre las que destacan notoriamente los levantamientos topográficos y la cartografía, áreas en las que ha mostrado su capacidad y potencial.

El proceso que se sigue en la aplicación de esta ciencia es básicamente el siguiente:

- 1- **Fotografía aérea:** Es el principal insumo para la elaboración de mapas cartográficos. Las fotografías deben cumplir con estándares geométricos para poder realizar mapas, además deben cubrir lateral y longitudinalmente todas las zonas del terreno secuencialmente con el propósito de que no queden huecos.
- 2- **Clasificación de campo:** Este consiste en identificar los elementos del terreno que se encuentran en la fotografía y escribir sobre la misma, los nombres de cada uno de los elementos geográficos; como ríos, poblaciones, carreteras, veredas etc.
- 3- **Mediciones de campo:** Para la elaboración de los mapas también es necesario hacer mediciones en terreno con equipos topográficos especiales, los cuales nos ayudan a determinar áreas, desniveles del terreno y coordenadas, con el fin de darle una orientación a todos los componentes de los mapas.
- 4- **Cálculos:** Después de los procesos realizados con instrumentos de topografía en campo, se procede a calcular los datos obtenidos, mediante programas de computadora, con el fin de obtener datos numéricos de la ubicación geográfica del mapa dentro de su País o región.
- 5- **Restitución o captura de información:** En esta etapa se adquiere información geográfica como vías, ríos, poblaciones o bosques, contenida en fotografías aéreas utilizando equipos llamados restituidores. Se utilizan dos fotografías secuenciales con un traslape del 60 %, en un estereoscopio, para reconstruir tridimensionalmente el terreno y extraer la información que interesa.
- 6- **Edición y salidas finales:** En este proceso se colocan los nombres obtenidos en campo de todos los sitios de interés de la región y se añaden líneas de coordenadas, escala y otra información que haga más comprensible y útil el mapa.
- 7- **Control de calidad:** Se encarga de hacer la revisión de todos los mapas, para que se cumplan las normas o especificaciones técnicas definidas para cada uno de los procesos. Los mapas son muy importantes porque son la base para muchos trabajos y con ellos se pueden producir otro tipo de productos que se conocen como cartas temáticas.

Para evitar en gran medida las dificultades que pueda ocasionar la interpretación de los mapas, en la actualidad se están elaborando mapas-imagen que no necesitan de convenciones para ser interpretados, estos son conocidos como Ortofotos, los cuales son obtenidos por fotografías aéreas corregidas geoméricamente y compensadas, cumpliendo con la característica de tener una escala uniforme en toda su extensión. Para generar una ortofoto, se necesita la ubicación precisa de cada toma (normalmente esto se logra con un GPS), exige de apoyo en campo (que ubica puntos bien conocidos sobre el terreno que luego son comparados para corregir errores) y finalmente, requiere de un modelo digital de elevación, para compensar las diferencias de escala debidas al relieve en el terreno.

1.1.1.2. Toma física de las fotografías



Figura 1.2. Toma de la fotografía aérea.

Esta consiste en cubrir el área de estudio con líneas de vuelo, orientadas con respecto al terreno de tal manera que se obtengan fotografías traslapadas del terreno, sobreponiéndose una sobre el área de la anterior entre un 50 y un 65% aproximadamente y entre líneas de vuelo un 30%, esto permite generar los estereopares indispensables para la interpretación de los objetos del terreno. Para realizar este procedimiento el eje de la cámara no puede estar desviado mas de 3 grados, ya que si esto sucede el cambio de escala dentro de la misma fotografía resulta demasiado elevado y ésta es inútil.

1.1.2. Videografía y fotografía digital de pequeño formato

La aparición de las cámaras de video y posteriormente las de fotografía digital; equipadas con sensores de estado sólido, abren una nueva perspectiva en teledetección. La combinación de este tipo de cámaras, en conjunto con filtros de interferencia en sectores bien delimitados del espectro electromagnético, dieron lugar a nuevas tecnologías llamadas *videografía* y *fotografía digital de pequeño formato*. La primera de ellas ha caído en desuso, de manera generalizada, debido a la baja resolución que ofrece, mientras que la segunda, continúa en crecimiento en

FILTRO	λ (nm)	ANCHO DE BANDA (nm)	TRASMITANCIA (%)
Azul	452	110	70
Verde	550	100	66
Rojo	655	150	56

Tabla 1.1. Algunos de los filtros de interferencia más utilizados.

varios países, aún en los más avanzados. En México, esta tecnología ha sido ampliamente desarrollada y utilizada, siendo el Laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología

Avanzada del Instituto de Geografía de la UNAM, pionero y principal proveedor de este tipo de imágenes en nuestro país.

Para cada misión es necesario realizar pruebas preliminares para determinar cuales son los filtros mas adecuados, dependiendo del problema específico que se quiera abordar. Los filtros más usados en nuestro Laboratorio para tomas de video, colocados frente al sistema óptico, se muestran en la tabla 1.1. Otros filtros manejados son los del infrarrojo cercano, con centros en los 750 y en los 850 nanómetros.

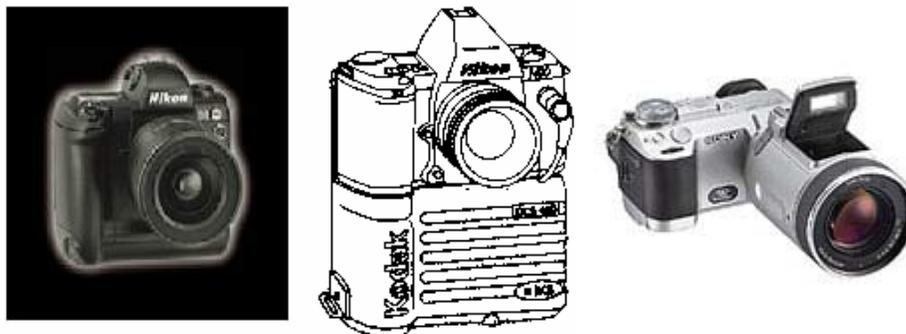


Figura 1.3. Cámaras digitales utilizadas para los levantamientos aéreos.

En el caso de la fotografía digital de pequeño formato, la separación de bandas ha sido a partir de la imagen en color (rojo, verde y azul). Y se han utilizado cámaras modificadas monocromáticas y de color, a las que se les han retirado los filtros que bloquean el IR para tener acceso a esta banda, cuyo centro se encuentra en 1.1 micras.

1.2. LIDAR

LIDAR es un acrónimo para Light detección And Ranging o detección de luz para medición de distancias. Este sistema utiliza luz láser a diferencia del RADAR (Radio Detección And Ranging) que utiliza ondas de radio para medir distancias. LIDAR es un método de percepción remota que se puede utilizar para crear modelos digitales de un terreno en estudio.

Los sistemas láser e incluso los sistemas aéreos láser, se han usado desde tiempo atrás, esto no es nada nuevo; el hombre se ha valido del espectro electromagnético por casi cincuenta años, solo que en los últimos tiempos los avances han hecho mucho más accesible este tipo de tecnología. El problema surge al darse cuenta que aunque un láser localizado en tierra firme puede asegurar precisiones de hasta un centímetro, una vez montado en un avión la posición de éste se convierte en un factor limitante y la confiabilidad de las mediciones hechas decrece. Con un sistema LIDAR este problema se intenta solucionar asociando al láser con tecnologías que lo hacen mucho mas preciso.

Esta tecnología antiguamente utilizada para atrapar conductores ebrios en la carretera se ha convertido en la nueva promesa de la cartografía para la obtención de Modelos Digitales del Terreno (MDT) de alta resolución y gran formato, a un costo significativamente menor.

1.2.1. Funcionamiento

Un LIDAR, también llamado sistema aéreo de medición láser, está constituido por la integración de tres tecnologías diferentes:

- Un **receptor GPS**, proporciona la posición global (coordenadas de posición X, Y, Z) de un objeto con precisión de menos de 1 m por medio de un sistema satelital.
- Un **Sistema de Navegación Inercial (SNI)**, proporciona en este caso la orientación de un objeto con respecto a un marco de referencia inercial utilizando acelerómetros y giróscopos.
- Un **escáner láser** de alta velocidad, mide la distancia desde el escáner hasta un punto distante.

Además, una computadora sincroniza, procesa y almacena la información de estos tres elementos, de tal manera que para cada pulso de láser se tiene totalmente conocida la posición exacta del punto que éste golpeó en el suelo. Juntando toda esta información se obtiene una colección de puntos digitales que describen el terreno en estudio, a partir de esta colección se puede construir un Modelo Digital de Elevación (MDE).

Si cada elemento de un LIDAR ofrece por si solo una precisión grande, trabajando todos juntos crean un sistema muy exacto. Podemos asegurar que bajo ciertas condiciones el láser genera resultados con una precisión de menos de tres centímetros. Los sistemas inerciales pueden generar orientación del orden de 0.1° o menores. Los sistemas GPS utilizados y operados adecuadamente pueden arrojar resultados en el rango de los 5 a 10 cm, cuando se suman todos estos componentes en realidad se obtendrá una precisión de alrededor de 15 cm, lo cual es muy aceptable en aplicaciones topográficas.

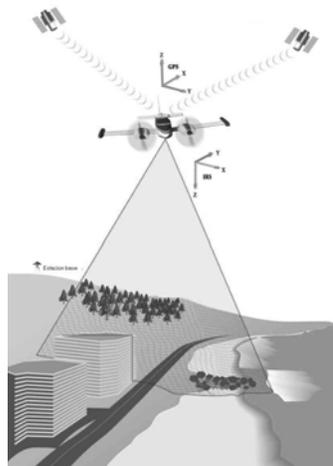


Figura 1.4. Esquema de funcionamiento de un sistema LIDAR.

LIDAR ofrece ventajas sobre la fotogrametría en algunas áreas de aplicación, dado que crea MDE de alta densidad con una alta precisión, registra regresos múltiples del láser y reconoce el dosel y el suelo en un bosque, además de que se pueden tomar imágenes durante el mismo vuelo y orto-rectificarlas usando los modelos digitales de elevación generados con el propio

sistema láser. Aún con todo esto, su característica más importante es que el procesamiento de los datos es automatizado y muy rápido, como ejemplo, un levantamiento topográfico completo puede tardar en promedio un mes, con un sistema LIDAR este toma máximo una semana.

1.2.2. Aplicaciones

La exploración aérea con láser es una tecnología joven que compite fuertemente con la aerofotogrametría, además ha encontrado aplicaciones en aquellas áreas donde la exploración en campo es prácticamente imposible, entre algunas de ellas están:

- **Líneas eléctricas de potencia.** En la fotogrametría tradicional se requiere un gran número de puntos de control y es complicado el tema de las catenarias. El trabajo en campo resulta muy caro y toma mucho tiempo, en tanto que una exploración aérea con láser localiza puntos tanto del suelo como de las líneas, además un programa automáticamente separa los tipos de puntos (líneas o campo).
- **Litorales.** Las franjas litorales en la orilla del mar son difíciles de seguir y de cartografiar con fotogrametría tradicional, un sistema LIDAR lo puede hacer en un solo vuelo.
- **Zonas forestales.** Con la técnica láser es posible explorar el suelo y recibir los retornos múltiples de los diferentes niveles del dosel, esto permite al sistema dos cosas: medir al mismo tiempo plantas y terreno, y discriminar entre ellos para presentarlos juntos o separados según los requerimientos; este tipo de exploración no es posible con la fotogrametría.
- **Pantanos y zonas minadas.** En estas áreas los puntos de control son difíciles y peligrosos de obtener, con un sistema láser el modelo digital de elevación o DEM es generado automáticamente y no son necesarios puntos de control salvo para la estación terrestre de GPS.
- **Modelos urbanos.** Con fotogrametría resulta difícil medir o calcular las alturas de los edificios en ciudades con gran densidad de construcciones, sin embargo, esto es fácil con sistemas láser.
- **Batimetría.** Utilizando láser con diferentes longitudes de onda (color), se puede estudiar el fondo de lagos o zonas inundadas, generalmente se utiliza de color verde porque penetra mejor en el agua.

Con su tiempo de procesamiento tan corto, su flexibilidad y la eliminación de cobertura con estereo-imágenes, el sistema LIDAR tiene ventajas sobre la fotogrametría en las aplicaciones arriba descritas, además, con el desarrollo de programas para nuevas aplicaciones, el mercado se incrementará en los próximos años.

1.3. SISTEMAS LÁSER

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es un tipo de luz utilizada cada vez más en aplicaciones comerciales, después de ser ampliamente utilizada en la milicia, principalmente para fijación de blancos, control de direccionamiento de misiles, entrenamiento y control de fuego. En el terreno comercial se está utilizando en comunicaciones, radares láser (LIDAR), sistemas automáticos de aterrizaje, apuntadores láser, sistemas de navegación automáticos, escáneres, corte de metales, fotografía, holografía y medicina.

Las longitudes de onda de la radiación láser incluyen las regiones ultravioleta, visible e infrarroja del espectro. El ultravioleta se encuentra entre los 180 y 400 [nm], la región visible comprende longitudes de onda entre 400 y 700 [nm], y la infrarroja esta entre los 700 [nm] y 1 [mm]. Los efectos de este tipo de luz en el cuerpo humano cambian dependiendo del tipo de rayo y pueden ser fotoquímicos, térmicos o mecánicos; en la región ultravioleta la acción es principalmente fotoquímica, en la región infrarroja la acción es térmica, en la región visible se presentan ambos fenómenos, lo que interesa en la normatividad es que si la intensidad de la radiación es suficiente alta, podría provocar daños en el tejido expuesto, este es un punto a tener en cuenta al diseñar y utilizar un LIDAR.

Los sistemas LIDAR utilizan un escáner láser que emite un pulso de luz hacia el suelo que es detectado por un sensor y almacenado después de reflejarse al golpear un objeto en el suelo; la velocidad de la luz es tal que el receptor capta el retorno antes de que el próximo pulso sea emitido. El tiempo que le toma a la señal viajar de ida y vuelta multiplicado por la velocidad de la luz y dividido entre dos (por ser de ida y vuelta) es la distancia desde el escáner hasta el objeto que golpeo el pulso.

Un rayo láser tiene la peculiaridad de tener una divergencia muy baja, lo que significa conservar el ancho de pulso constante por mas tiempo que la luz tradicional, esto permite que la potencia del rayo se conserve por más tiempo, por ello es útil para emitir rayos y después recibirlos con mayor eficacia.

1.4. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

El hecho de saber donde se encuentra localizado un móvil sobre la tierra y que rumbo lleva, es probablemente una de las preocupaciones más viejas del hombre. La navegación y el posicionamiento son cruciales para tantas actividades, que siempre se ha buscado que el proceso sea lo más cómodo, transportable y compatible posible.

A través de los años todas las clases de tecnologías habían tratado de simplificar la tarea, pero cada una había tenido alguna desventaja. Fue hasta 1978 que el departamento de defensa de los Estados Unidos decidió que los militares debían tener una forma precisa de posicionamiento mundial e invirtieron 12 mil millones de dólares en desarrollar un sistema que permitiera localizar y rescatar a soldados perdidos en el campo enemigo. El resultado fue el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), un método que definitivamente cambió la navegación para siempre.

El GPS es un sistema mundial de radionavegación formado por una constelación de 24 satélites que sirven como puntos de referencia para calcular posiciones exactas, con precisión de metros, aunque algunas configuraciones avanzadas de GPS pueden hacer medidas con menos de un centímetro de precisión.

Los actuales receptores GPS están compuestos por unos cuantos circuitos integrados por lo que se han vuelto muy económicos y accesibles a prácticamente cualquier usuario. Hoy en día el GPS está teniendo aplicaciones en automóviles, barcos, aviones, equipos de construcción, cinematografía, maquinaria pesada, agricultura, etc.

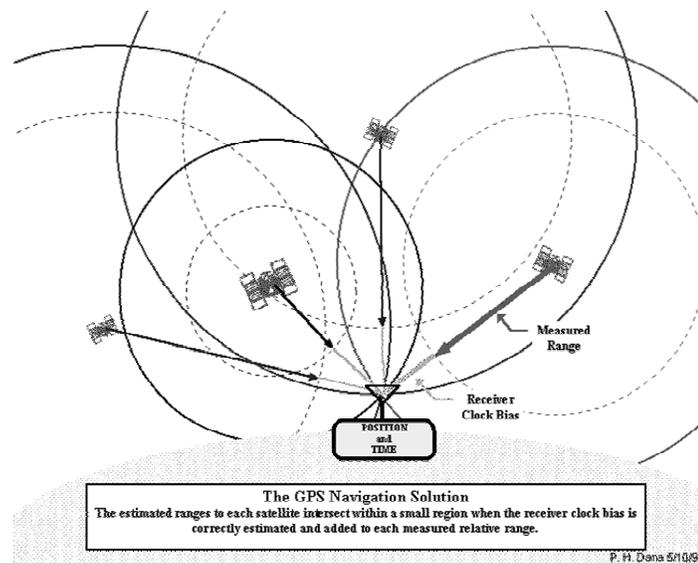


Fig. 1.5. Localización sobre la Tierra, por medio de 4 satélites de un sistema GPS.

1.3.1. GPS Diferencial

Las primeras aplicaciones del GPS en el área civil, fueron en la navegación. La precisión manejada no permitía creer que pasaría de ahí, utilizando este modo de posicionamiento absoluto. Sin embargo, la precisión del GPS se fue mejorando y utilizando en aplicaciones de gran exactitud. Se ideó el sistema GPS Diferencial, un modo de corregir los errores existentes en el sistema GPS básico, elevando significativamente su precisión. GPS Diferencial o DGPS puede lograr mediciones dentro de un metro en aplicaciones móviles y de unos centímetros en situaciones estacionarias.

El GPS diferencial ha influido en la utilización de este recurso, convirtiéndolo en más que un sistema de navegación para pequeños botes o avionetas, sino en un sistema universal de navegación capaz de posicionar pequeños objetos con gran precisión y capaz de hacer aterrizar un Boeing 747 justo por el centro de la pista. El GPS diferencial se vale de la utilización de dos receptores: el de referencia y el móvil, el primero es estacionario y se conoce exactamente su posición, el segundo es propiamente el receptor del cual se quiere saber la posición. La clave está en el receptor estacionario, que compara las mediciones de los satélites contra su posición exacta, y genera una señal de corrección.

Recordemos que los receptores GPS reciben señales de sincronización de al menos cuatro satélites para establecer una posición, cada una de esas señales va a tener un pequeño retraso dependiendo de los obstáculos que encuentre para llegar a la Tierra. Dado que cada una de las señales de sincronización tiene un pequeño error, la posición calculada con ellas tendrá una composición de esos errores. Básicamente, la idea de GPS Diferencial es que tenemos un receptor de referencia que mide los errores de sincronización y luego transmite mensajes de corrección hacia todos los receptores de los alrededores, donde es válida esta corrección.

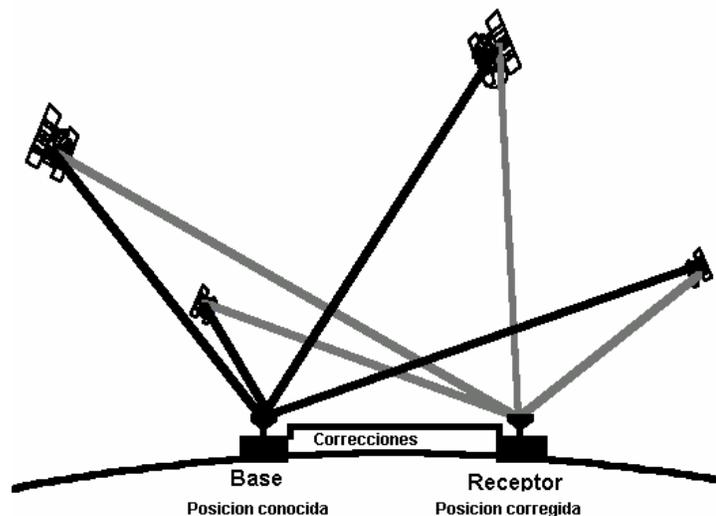


Fig. 1.6. Principio de funcionamiento del GPS diferencial.

Como los satélites están tan lejos en el espacio, las pequeñas distancias que viajamos aquí en la Tierra son insignificantes, por lo tanto, si dos receptores están a unos cuantos cientos de kilómetros de distancia, las señales que alcancen a ambos tendrán los mismos retrasos y errores.

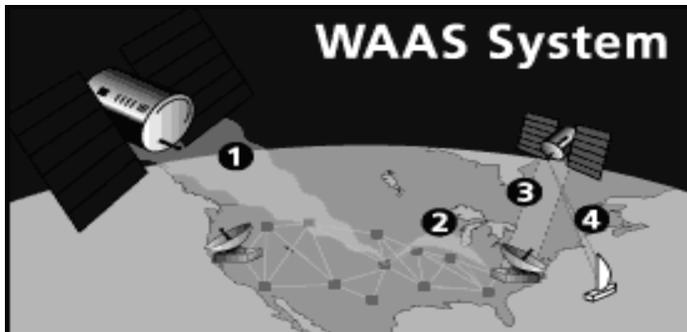
La estación de referencia recibe la misma información que los receptores de usuario pero a diferencia de éstos, ataca el problema de manera inversa; en lugar de usar las señales de sincronización para calcular su posición, utiliza su posición ya conocida para calcular la sincronización de las señales que recibe. La estación estima cual debería ser el tiempo de viaje de las señales y lo compara con el que está midiendo, la diferencia en tiempo da pie al cálculo de un mensaje de corrección, que es luego transmitida hacia los posibles receptores en movimiento para corregir sus mediciones.

1.3.2. WAAS

El WAAS (Wide Área Augmentation System) o Sistema de Aumentación de Gran Área es un sistema de satélites y estaciones terrestres que proveen correcciones a la señal GPS, mejorando hasta cinco veces la precisión de la posición calculada. Un receptor dotado de WAAS puede dar una precisión en la posición de menos de tres metros 95% del tiempo y no requiere compra de equipo adicional ni pago de cuotas extras por el servicio.

La Administración Federal de la Aviación (FAA, Federal Aviation Administration) y el Departamento de Transporte (DOT, Department Of Transportation) de los Estados Unidos desarrollaron el programa WAAS para usarlo en vuelos de precisión ya que, por si solo, GPS no llenaba los requerimientos de navegación de la FAA en precisión, integridad y disponibilidad. WAAS corrigió los errores de las señales GPS causadas por la ionosfera, sincronización y errores orbitales, además que provee integridad a la información sin importar la condición del

satélite, aunque WAAS no ha sido aprobado todavía para la aviación, el sistema esta disponible para pruebas y uso civil.



1. Transmisión satélite NAVSTAR de GPS → estación terrestre.
2. Transmisión estación terrestre → estación maestra.
3. Transmisión estación maestra → satélite geoestacionario.
4. Transmisión satélite geoestacionario → equipo usuario.

Figura 1.7. Esquema de corrección empleado en el sistema WASS.

WAAS consiste de aproximadamente 25 estaciones terrestres de referencia (ver figura 1.7) localizadas a través de Estados Unidos que monitorean la información de los satélites GPS. Dos estaciones maestras, localizadas en cada costa de EE.UU., colectan información de las estaciones terrestres y crean una señal de corrección. Ésta se transmite por un satélite geoestacionario. La información es compatible con la estructura básica de GPS, lo que significa que cualquier receptor puede leer la señal WAAS. Actualmente la cobertura satelital WAAS está disponible en América Central y Norteamérica debido a la huella de cobertura del satélite geoestacionario.

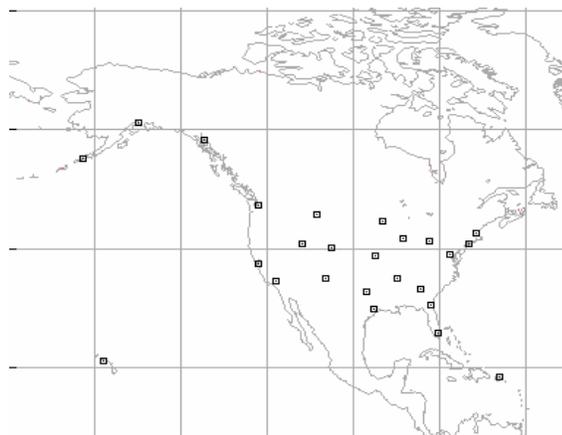


Figura 1.8. Cobertura del sistema WASS en América.

Otros gobiernos están desarrollando sistemas de mejoramiento de la precisión parecidos a WAAS; en Asia se tiene el Sistema Japonés de Aumentación Satelital Multifuncional (MSAS, Multi-functional Satellite Augmentation System), mientras que en Europa está el Servicio de Cobertura para Navegación Euro-Geoestacionario (EGNOS, Euro-Geostationary Navigation Overlay Service).

Eventualmente todos los usuarios de GPS alrededor del mundo tendrán acceso a un posicionamiento muy preciso usando sistemas como este.

100 m	Precisión original del sistema GPS, sujeto a degradación de precisión por el programa de Disponibilidad Selectiva del gobierno (SA, Selective Availability).
15 m	Precisión de posición típica sin SA.
3-5 m	Precisión diferencial típica GPS (DGPS).
< 3 m	Precisión típica con sistema WAAS.

Tabla 1.2. Comparativo de posicionamiento con GPS.

1.5. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INERCIAL (SNI)

Se define la navegación como el proceso de dirigir el movimiento de un vehículo de un punto a otro. Para navegar, sea por mar, aire o tierra, necesitamos saber dos cosas en casi cualquier momento: la posición y la velocidad del vehículo para conocer el rumbo y modificarlo de acuerdo a las necesidades que se tienen para finalmente llegar al punto deseado. Para esto nos valemos de instrumentos de apoyo para el cálculo de las diferentes variables dinámicas, estos instrumentos normalmente miden únicamente la aceleración dado que por medio de integración y condiciones iniciales se puede obtener tanto velocidad como posición; hay que considerar que cuando se habla de un sistema de navegación inercial electrónico se debe tener en cuenta que los sensores deben transformar su respuesta a una variable eléctrica que luego será procesada para obtener de ella la información requerida para el control del vehículo.

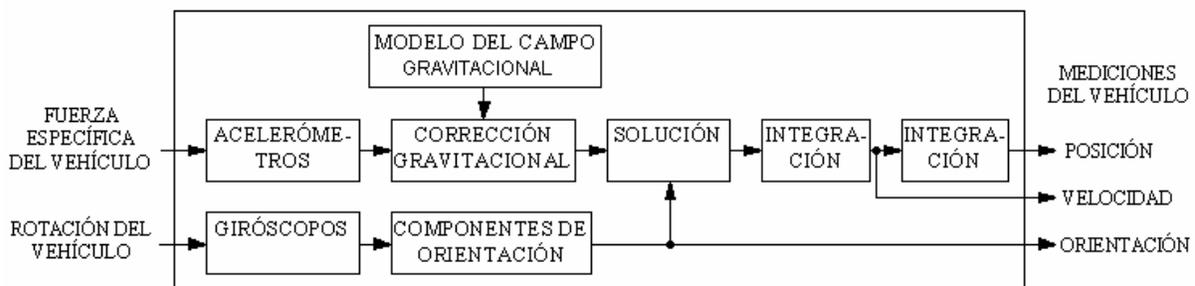


Figura 1.9. Diagrama de bloques simplificado de un sistema de navegación inercial.

Los sensores utilizados en la navegación inercial son básicamente acelerómetros y giróscopos, los cuales miden aceleración lineal y angular, respectivamente, a lo largo de un eje sensitivo. La combinación de estos dispositivos en arreglos en un sistema de ejes fijo al cuerpo del vehículo, brinda la posibilidad de establecer un esquema de control con respecto a un marco de

referencia inercialmente fijo en Tierra. A diferencia de otros tipos de sistemas de navegación, los inerciales son totalmente autónomos, en el sentido de que no necesitan ninguna señal externa para su funcionamiento, el siguiente diagrama de bloques ejemplifica un sistema de navegación inercial.

En general, se necesita determinar la posición del vehículo con respecto a un marco de referencia tridimensional, consecuentemente, se necesitarán tres giróscopos para proporcionar la medición de variación angular del vehículo alrededor de tres ejes distintos, al mismo tiempo que tres acelerómetros proporcionan las componentes de aceleración que el vehículo experimenta a lo largo de estos mismos ejes. Por conveniencia y precisión, los tres ejes usualmente son mutuamente perpendiculares y son coincidentes con los ejes del vehículo, usualmente llamado el juego de ejes fijos al cuerpo. Es muy importante recalcar la necesidad de multiplicar los valores de orientación obtenidos a partir de las mediciones de los sensores montados en el vehículo, por una matriz de rotación; para de esta manera obtener la orientación del vehículo con respecto a un marco de referencia inercial.

1.5.1. Principios de funcionamiento

Un trompo girando en el suelo tendrá un eje de giro vertical, si se le golpea en su parte superior este se desviará un poco pero intentará volver recobrar el eje de giro que tenía antes de ser impactado. Los sensores inerciales hacen uso de los principios físicos descritos por las leyes de Newton, es decir, que los objetos que se encuentran moviéndose en una dirección, tienden a permanecer moviéndose en dicha dirección y los que están girando, tienden a mantener el mismo eje de rotación en el espacio.

El giróscopo consiste de una carcasa con una masa giratoria en su interior. Debido a los efectos de la gravedad, los cuerpos que giran cerca de la vertical se orientarán hacia la vertical verdadera, este fenómeno provee un dato con el cual trabajar, dado el eje de giro vertical, si el vehículo en el que está fijo el giróscopo se inclina (como sucede cuando uno se ladea al dar vuelta en un avión) la carcasa del sensor se moverá junto con el vehículo, pero la masa giratoria permanecerá vertical, es en ese momento cuando se puede medir la velocidad angular en ese eje en particular.

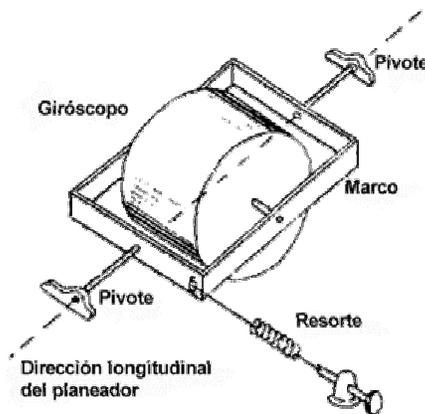


Figura 1.10. Giróscopo con partes móviles.

La otra parte del sistema inercial es un dispositivo conocido como acelerómetro, con el cual se pueden medir los efectos de la aceleración. Para imaginar un acelerómetro, piense en un vagón de tren con un peso colgando del techo a través de una cuerda. Si el vagón está detenido y comienza a avanzar el peso se moverá en sentido contrario al del vagón, la distancia que se mueve el peso depende de la aceleración del tren, si podemos medir esa distancia y cronometrarla de manera precisa, podemos calcular el valor de la aceleración y de ahí la velocidad y la posición. Acoplando el acelerómetro y el giróscopo, nuestro sistema inercial puede decirnos que tan lejos, rápido y en que dirección nos estamos moviendo en relación con el punto de partida.

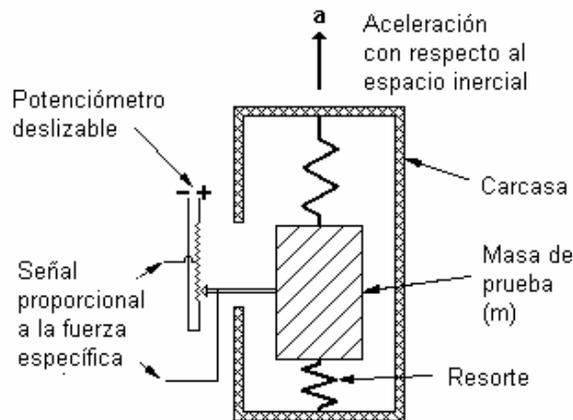


Figura 1.11. Diagrama de un acelerómetro simple.

Mientras que la teoría básica de éstos sensores es bastante simple, llevarla a la práctica para obtener información con una buena precisión es muy difícil; los sistemas inerciales están limitados por dos fenómenos en particular: uno es, que tan exactas se pueden hacer las mediciones de la aceleración y de la inclinación (físicamente significa que tan bien se puede medir un cambio en ángulo y describir el arco formado), y dos, que tan bien se puede medir el tiempo. Naturalmente mientras más pequeña sea la masa giratoria, más pequeño será el giróscopo, pero se vuelven más críticas las mediciones pequeñas, así que, como en cualquier equipo técnico, la miniaturización trae sus propios problemas de fabricación.

Asumamos que los fabricantes han desarrollado equipos muy precisos, sin embargo, los sensores comenzarán a crear errores y a acumularlos, de tal manera que el sistema puede llegar a perder el sentido de donde está. Después de muchas horas se pueden acumular tantos errores que el sistema sea inservible.

1.5.2. Plataformas aéreas

Las fotografías se han tomado desde el aire, casi desde los comienzos del invento del proceso fotográfico. La primera foto aérea conocida se hizo en Francia en 1856, desde la cesta de un globo y a partir de 1909 desde aviones, tanto en Francia como en Estados Unidos. En 1862, en Richmond Virginia, el ejército federal estadounidense envió un fotógrafo en un globo, sujeto al

suelo con una larga cuerda, hacia las alturas para que obtuviera fotografías de las posiciones enemigas.

En Gran Bretaña, J.T.C. Moore Brabazon, fotógrafo encargado del equipo de reconocimiento aéreo del ejército británico; experimentó la toma de imágenes primero con cámaras de fuelle, pero pronto se percató de que no tenía la posibilidad de mantenerlas fijas y exentas de vibraciones en la corriente de aire generada por el vuelo de un avión que avanzara a 120 [km/h]. Por tanto, proyectó una cámara para ser instalada en el suelo del aeroplano: aquí aparece por primera vez la idea de crear una plataforma para una cámara fotográfica.

Idealmente, el eje focal de la cámara al adquirir las imágenes en un vuelo, es normal al plano del terreno para que la escala sea la misma en toda la foto y no haya que aplicar correcciones o incluso desechar la foto, sin embargo, en la práctica esto es difícil de lograr dadas las perturbaciones que sufre un avión al volar. Dichas perturbaciones desvían el eje focal de la cámara de la vertical. Dado lo anterior, se vio la necesidad de una plataforma autónoma en la que fuera montado el dispositivo de captura que mantuviera el eje de la cámara normal al terreno sin que importaran los movimientos del avión, con el fin de aumentar significativamente el número de fotografías útiles durante un vuelo fotogramétrico.

Las plataformas aéreas para cámaras fotográficas son el mecanismo usado para unir la cámara fotográfica al avión. Tiene dispositivos de amortiguamiento que evitan que las vibraciones del avión sean transmitidas a la cámara fotográfica. También están diseñadas para que la cámara pueda rotar en el azimut y así corregir la deriva (fenómeno es causado por los vientos laterales).

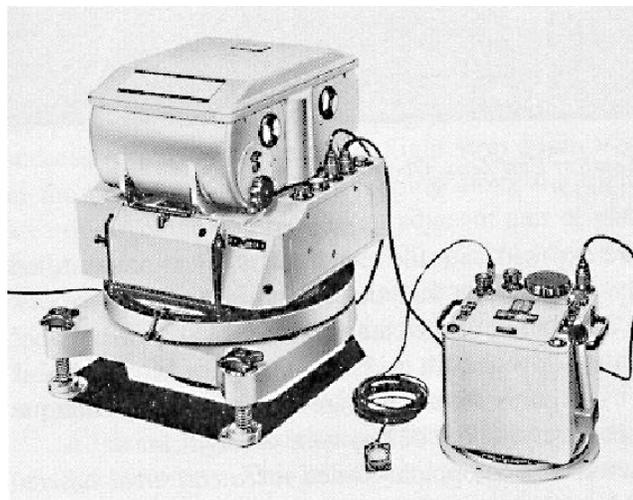


Figura 1.12. Cámara fotográfica, plataforma giro-estabilizada RMK-TOP con intervalómetro.

Estas plataformas son sumamente complejas, la tecnología con la que son construidas es de punta, los resultados que se obtienen son excelentes, pero debido a esta y otras características tienen costos altísimos. Otro inconveniente es que son sumamente pesadas, generalmente arriba de 120 Kilogramos, y por tanto sus dimensiones son grandes.

Las plataformas son utilizadas para estabilizar cámaras analógicas o digitales de gran formato, pero igual se utilizan para una cámara digital de pequeño formato, un sistema LIDAR o cualquier otro sensor que necesite mantenerse apuntado continuamente hacia nadir.

Las perturbaciones no compensadas durante el vuelo pueden causar el efecto indeseable de reducir la cobertura de la imagen, con las consecuentes pérdidas de tiempo y dinero. Es muy deseable compensar para evitar deformaciones significativas en las imágenes, no obstante, lo más importante es medir los ángulos exactamente en el momento de la adquisición de las imágenes, para poder efectuar la corrección geométrica reconstruyendo los parámetros de orientación de la cámara en el momento de la toma. En nuestro caso debemos capturar la información proporcionada por el sistema de navegación inercial en los tres ejes de rotación, para saber exactamente hacia adonde se encontraba apuntando la aeronave al momento de que el láser emitió un pulso determinado y así poder reconstruir la forma del terreno bajo estudio. Desde luego que también el dato de la ubicación geográfica, obtenido del GPS es crucial para saber donde localizar el punto en cuestión.

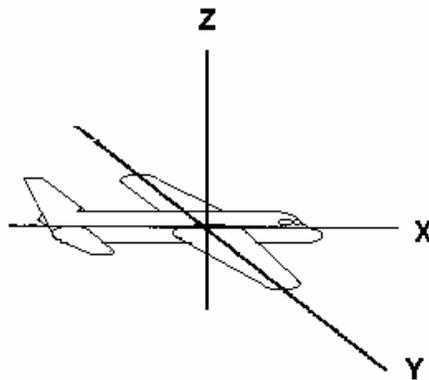


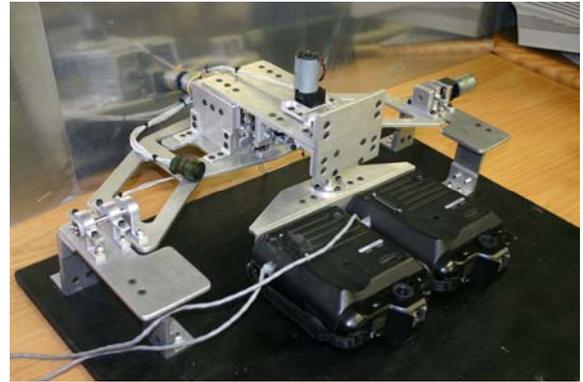
Figura 1.13. Ejes de referencia de una aeronave.

En el Laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada del Instituto de Geografía de la UNAM, se han desarrollado algunas plataformas para adquisición de imágenes aéreas, para su utilización con cámaras de formato pequeño. Sus dimensiones son reducidas y son de bajo costo. Algunas se pueden montar afuera de la aeronave y no cuentan con ningún sistema de estabilización, mientras que otras son estabilizadas y basan su método de control en un Sistema de Referencia de la Vertical, utilizando sensores inerciales por las ventajas que proporcionan, para mantener constantemente estabilizada la plataforma.

Para este proyecto de desarrollo de un sistema LIDAR, será necesario diseñar y construir una plataforma estabilizada de bajo costo que cumpla con la necesidad de mantener el láser apuntado hacia nadir.



(a)



(b)

Figura 1.14. Plataformas para cámaras de formato pequeño. (a) Plataforma no estabilizada para montura exterior en avionetas. (b) Plataforma aérea estabilizada, con capacidad de soportar dos cámaras de pequeño formato.

CAPÍTULO 2

PARTES QUE COMPONEN UN SISTEMA LIDAR

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, LIDAR es un acrónimo para Detección y Medición de Distancia con Luz (Light Detection And Ranging), este es un equipo de percepción remota utilizado para generar Modelos Digitales de Terreno (MDT) con gran precisión y alta densidad de puntos. El sistema está compuesto por tres diferentes tecnologías trabajando juntas con un objetivo primordial y bajo una premisa: sincronía.

Sabemos que un sistema LIDAR para propósitos topográficos está compuesto por un receptor GPS, un Sistema de Navegación Inercial o SNI y un escáner láser de alta velocidad; los cuales trabajan al unísono para obtener un conjunto de puntos que describen de manera muy precisa el relieve de la Tierra, cubriendo porciones de ésta en poco tiempo gracias a la ayuda de un avión o un helicóptero. Además, como la información es digital y se almacena en computadora, el procesamiento de los datos es automatizado y muy rápido.

En este capítulo se hace una descripción detallada de cada uno de los tres componentes básicos de este sistema.

2.1. ESCÁNER LÁSER

LÁSER, al igual que LIDAR es un acrónimo para Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Al hacer pasar una frecuencia específica de luz a través de un material determinado, se puede concentrar de tal manera un rayo, que una fuente de luz relativamente débil puede viajar una gran distancia con poca pérdida de potencia y baja dispersión.

2.1.1. Principios básicos de láser

Un átomo siempre está en movimiento y posee una cantidad de energía que depende de su estado de excitación. Cuando se le aplica una cantidad determinada de energía, éste es llevado desde su estado base a un estado excitado. Cuando esto sucede, los electrones que giran alrededor del núcleo absorben energía y la utilizan para pasar a niveles de energía más altos y alejados del núcleo. Sin embargo, no pueden permanecer ahí todo el tiempo, así que eventualmente regresan a su estado normal y emiten la energía que habían absorbido, en forma de pequeños paquetes de luz llamados fotones. La longitud de onda de estos fotones determina el color de la luz, bajo la premisa de que es el número de electrones en estado excitado lo que determina la longitud de onda que se emitirá y si se tienen dos átomos idénticos con iguales estados de excitación emitirán fotones con la misma longitud de onda.

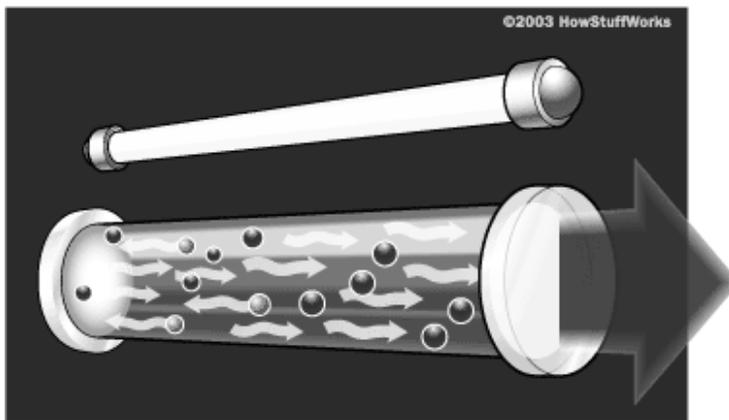


Figura 2.1. Cavidad resonante en un láser.

A diferencia de la luz que vemos normalmente, que consiste de una mezcla de diferentes longitudes de onda, en la luz láser los átomos pueden ser disparados o estimulados en fase por un fotón que posee una energía específica. Para lograr esto se hace uso de la Emisión Estimulada, donde la longitud de onda que emite un átomo depende de la diferencia de energía entre el estado básico y el estado de excitación en que se encuentre. Si un átomo emite un fotón y éste fotón encuentra otro átomo con el mismo estado de excitación, entonces el segundo átomo emitirá un fotón con la misma longitud de onda, fase y dirección que el incidente, a eso se le llama Emisión Estimulada.

La luz láser es llamada luz coherente y aquí están algunas de sus características:

- Es monocromática, debido a que todos los fotones emitidos tienen la misma longitud de onda.
- Es coherente, dado que todos los frentes de onda están en fase; no se interfieren.
- Es muy direccional, la luz láser está contenida en un rayo estrecho y es muy fuerte porque la energía se concentra en un punto reducido.

Esta característica de coherencia hace el uso del láser muy atractivo en el sistema LIDAR, ya que el ancho del rayo se mantiene casi del mismo tamaño durante su recorrido, es decir, que su divergencia es muy baja, esto ayuda a asegurar que el rayo ha golpeado un punto pequeño del terreno, mientras más pequeño sea el punto en el suelo, más confiable será la medida de distancia.

2.1.2. Tipos de láser

Hay muchos tipos de láser dependiendo del medio que utilicen para generar la luz, pueden ser sólidos, gaseosos, líquidos o semiconductores, y suelen designarse por el material que utilizan:

- **Estado sólido.** Usa el material distribuido en forma matricial, e.g. láser Nd:YAG (Neodymium:Yttrium-Aluminum-Garnet) que emite luz infrarroja de 1,064 nm, y láser de rubí que emite en los 694nm.
- **Gas.** Tienen una salida primaria de luz roja visible y algunos como el de CO₂ emiten además en el infrarrojo lejano y se utilizan para cortar metales, e.g. He, Ne, y HeNe.
- **Excimer** (de *excited* y *dimer*). Utilizan gases reactivos como cloruros y fluoruros mezclados con gases inertes como argón, kriptón y xenón. Cuando se les excita eléctricamente se produce una pseudomolécula (dimer) que emite luz ultravioleta.
- **De Tinta.** Utilizan tintas orgánicas, como Rodamina 6G, en solución líquida o suspensión, se pueden sintonizar en varias longitudes de onda.
- **Semiconductores.** También llamados diodos láser, no son de estado sólido. Son muy pequeños y de baja potencia, como en los apuntadores tipo pluma, pero pueden construirse arreglos más grandes como en las impresoras láser.

Los equipos LIDAR generalmente utilizan láser de estado sólido Nd:YAG, emitiendo luz infrarroja de 1064nm; para aplicaciones de altimetría, y de color verde, para aplicaciones de batimetría.

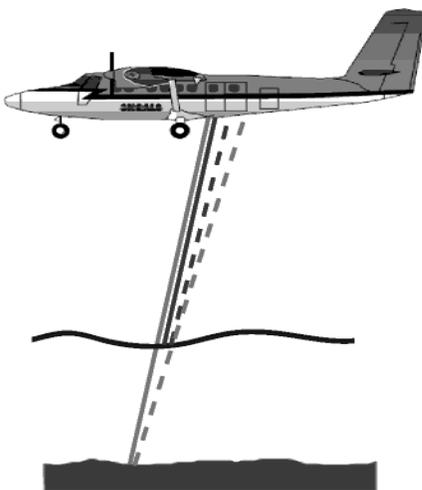


Fig. 2.2. Altimetría y batimetría con láser.

2.1.3. Clasificación y seguridad en los equipos láser

Debido a su alto contenido de energía un área muy pequeña, un láser puede ser dañino para la salud de un ser vivo, si éste es expuesto a su radiación durante un tiempo prolongado. Es por ello que se clasifican los equipos de acuerdo al daño que podrían ocasionar a un humano y se les denota con el siguiente símbolo:

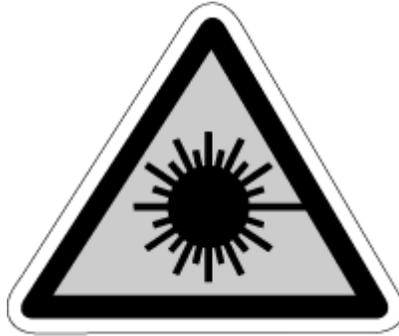


Figura 2.3. Símbolo que advierte de la presencia de luz láser.

- **Clase I.** Estos equipos no emiten radiación en niveles que sean considerados peligrosos.
- **Clase IA.** Esta es una clasificación especial que se aplica a equipos que no están planeados para fines visuales, como los escáneres en los supermercados. Su potencia máxima es de 4mW.
- **Clase II.** Son equipos láser en el visible, de baja potencia, que emiten más que un Clase I pero a una potencia radiante menor de 1mW.
- **Clase IIIA.** Son de potencia intermedia (1-5mW) que son peligrosos solo si ocurre visión directa, la mayoría de los apuntadores tipo pluma están en esta clase.
- **Clase IIIB.** Son de potencia moderada.
- **Clase IVB.** Son de alta potencia, (500mW, pulsados: 10J/cm²) peligrosos bajo cualquier condición (visión directa o parcialmente reflejado) y pueden incendiar objetos o quemar la piel. Se requiere control especial para su operación.

En los equipos LIDAR debe de tenerse en cuenta que éstos se utilizan en exteriores y muy probablemente en áreas habitadas o forestales, es por ello que debe cuidarse el aspecto de seguridad dada la potencia que se maneja.

2.1.4. Medición de distancia con luz láser en un LIDAR

Los sistemas LIDAR utilizan un escáner láser para medir distancias. Se generan pulsos cortos que son emitidos en una sola dirección proyectándolos contra un espejo o prisma que al girar realiza un barrido angular en el terreno. Cada pulso de luz es reflejado al golpear un objeto: el suelo, un árbol, un edificio, etc., después el pulso de retorno es detectado por un fotosensor y almacenado en memoria. La información de salida de un escáner, para cada pulso, debe incluir la distancia y el ángulo del rayo en el momento del pulso.

La manera en que se mide la distancia es usando la fórmula:

$$R = v \cdot t_L \quad \dots(2.1)$$

- donde: v → velocidad de la luz, 3×10^8 [m/s]
 R → distancia que nos interesa medir
 t_L → tiempo que tarda el pulso en llegar al objetivo

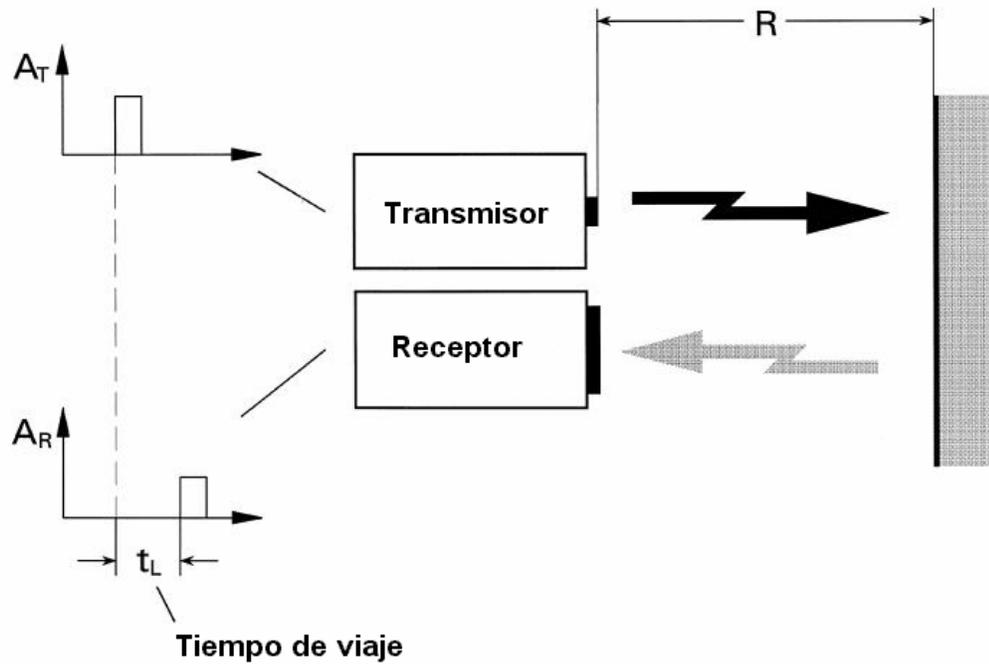


Fig. 2.4. Medición de distancia con luz láser.

Cada pulso tarda $3.33 \text{ } [\mu\text{s}]$ en recorrer 1 [km] , aproximadamente. Suponiendo que esta es la altura máxima a la que se va a volar, entonces el tiempo máximo que toma un pulso en bajar a la tierra y volver a subir al avión es de $6.66 \text{ } [\mu\text{s}]$. Siendo este el tiempo máximo para que un pulso se emita y regrese, antes de que otro pulso se emita y lo interfiera, esto representa una frecuencia máxima de 150 [kHz] para esa altura en particular. Normalmente los equipos LIDAR manejan una frecuencia alrededor de los 15 [kHz] , lo que asegura que no se interfieran los pulsos; siempre que éstos sean de corta duración.

Hasta este punto solo contamos con una simple distancia que no sirve de mucho, sólo al conocer la posición en el espacio de la cabeza del escáner (GPS) y la orientación de la misma proporcionada por el sistema inercial, podemos calcular la posición exacta del punto que golpeamos con el pulso usando simple geometría y geodesia.

2.2. SISTEMA GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) permite el cálculo de coordenadas tridimensionales que pueden ser usadas en navegación o, mediante el uso de métodos adecuados, para determinación de mediciones de precisión. Permite obtener en tiempo real la posición de un punto en cualquier lugar de la tierra. Este sistema surgió debido a las limitaciones del sistema TRANSIT que en la década de los 70 proporcionaba posicionamiento usando el efecto Doppler, y cuya principal desventaja era la no disponibilidad de satélites las 24 horas del día.

El GPS proporciona las coordenadas de posición X (latitud), Y (longitud) y Z (altitud) del punto de interés, específicamente donde se encuentra localizada la antena receptora. No todos los equipos resuelven el problema de sincronización de la misma forma, y usan diferentes métodos para procesar la información recibida de los satélites, de ahí la diferencia en la precisión. Ésta no afecta demasiado cuando se trata de un punto fijo en Tierra o un automóvil, sin embargo, en un avión que se desplaza a 60 [m/s], una diferencia de sincronización de unas cuantas centésimas de segundo pueden representar un error de varios metros en la posición, de ahí la importancia de la sincronización de los datos en un equipo LIDAR.

2.2.1. Organización del Sistema de Posicionamiento Global

Para su organización el sistema GPS está dividido en tres segmentos: espacial, de control y de usuario. El espacial lo conforman los satélites, el de control las estaciones terrestres y el de usuario, son los receptores.

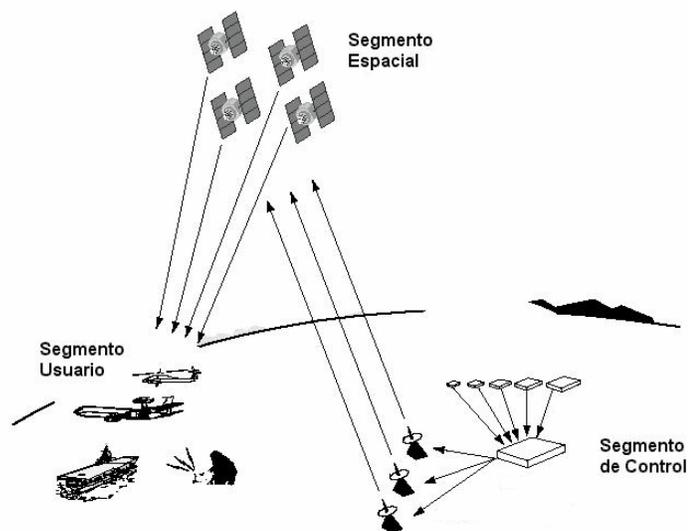


Figura 2.5. Segmentos que componen el sistema GPS.

2.2.1.1. Segmento Espacial

Esta formado por la constelación de 24 satélites NAVSTAR, 21 en operación y 3 en reserva, colocados en órbitas circulares aproximadamente a 20,200 [km] sobre la Tierra, y ordenados en seis planos orbitales, todo ello para cubrir la mayor parte del planeta y asegurar que en cualquier punto de la tierra y a cualquier hora se vean al menos cuatro satélites, aunque solo se necesitan tres para hacer un posicionamiento; el tener cuatro como mínimo aumenta la precisión del sistema. Los satélites cuentan con antenas de tipo helicoidal con 700 [W] de potencia y relojes atómicos muy precisos.

El Departamento de Defensa de EE.UU. no puede arriesgarse a que su propio sistema se vuelva contra él, así que, creó dos métodos para degradar la información GPS para su conveniencia. El objetivo de ambas es negar a los usuarios el uso apropiado del sistema: *Selective Availability (SA)* y *Anti-Spoofing (AS)*.

2.2.1.2 Segmento de Control

Este segmento está formado por una red de puntos terrestres que permiten controlar y realimentar el sistema de satélites. Esto se logra mediante su constante monitoreo desde estaciones convenientemente ubicadas alrededor de la tierra. Existe una estación maestra ubicada en Colorado Springs. En ella se reúne la información de las estaciones de monitoreo y con estos datos se calculan las orbitas de los satélites y correcciones a los relojes haciendo uso de técnicas de filtrado Kahlman.

Las estaciones de monitoreo son cinco y se encuentran localizadas en Hawaii, Colorado Springs, Isla Ascensión en el Océano Atlántico Sur, Diego García en el Mar Índico y Kwajalein en el Océano Pacífico Norte. Están equipadas con relojes de Cesio y receptores del código P que constantemente monitorean todos los satélites sobre el horizonte. Determinan las efemérides y establecen las correcciones a las órbitas y relojes; de esta manera se controla la información que recibe cada satélite acerca de su propia posición y la de los otros satélites.

2.2.1.3 Segmento de Usuario

Este segmento se refiere a los distintos tipos de receptores que existen en el mercado. Con el paso del tiempo se han encontrado nuevas aplicaciones y ha sido necesario desarrollar equipos con características específicas para adaptarse a las necesidades de los usuarios.

El receptor a usar dependerá del tipo de observaciones y de la disponibilidad de códigos. Los receptores GPS pueden ser clasificados de acuerdo a sus características de la siguiente manera:

- Código C/A
- Código C/A + fase portadora L1
- Código C/A + fase portadora L1 + fase portadora L2
- Código C/A + código P + fases portadoras L1, L2

Otra forma de clasificar los receptores es por el tipo de usuarios y estos pueden ser militares, civiles, para navegación o geodésicos.

2.2.2. Triangulación y posicionamiento

La idea detrás del GPS es usar satélites como referencia para localizar puntos en la tierra, midiendo de manera precisa las distancias a por lo menos tres de ellos, para triangular la posición que nos interesa.

Supongamos que medimos nuestra distancia a un satélite y resulta ser de 25,000 [km], el receptor elimina todas las posibles localizaciones afuera de una esfera centrada en dicho satélite y que tiene un radio de 25,000 [km]. Después, medimos la distancia hasta otro satélite y encontramos que es de 15,000 [km], esto nos dice que además de estar localizados en la superficie de la primera esfera de radio 25,000 [km], estamos también dentro de la superficie de otra esfera de 15,000 [km] de radio centrada en el segundo satélite, es decir, estamos en algún lugar en la semi-circunferencia resultante de la intersección de dichas esferas. Ahora, si medimos nuestra distancia hasta un tercer satélite y encontramos que es de 12,000 [km], nuestra posible ubicación se reduce a solo dos puntos resultado de la intersección de la esfera de radio 12,000 [km] centrada en el tercer satélite y el semi-circulo que es la intersección de las primeras dos esferas. De esta manera, con solo tres satélites, se puede reducir la localización a solo dos puntos en el espacio, normalmente uno de ellos estará fuera de la Tierra y puede ser eliminado sin problemas, a este proceso se le llama triangulación satelital.

Una vez hecha la triangulación se sabe a que distancia está el receptor de los satélites, pero aún es necesario que la distancia calculada esté relacionada con un marco de referencia terrestre. Es aquí donde entran en juego las orbitas de los satélites, las cuales se tienen muy bien calculadas, de manera que se conoce la ubicación precisa de cada satélite GPS con respecto a la Tierra, y la distancia del usuario a los satélites, así que el procesador interno del receptor realiza las operaciones necesarias y despliega la posición correcta en la pantalla.

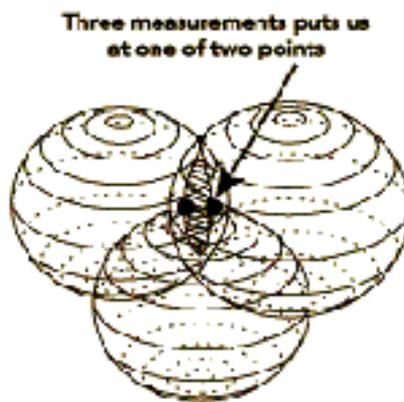


Figura. 2.6. Intersección de tres esferas.

2.2.3. Sistema de coordenadas geodésicas

Un sistema GPS entrega sus resultados en un sistema geodésico de coordenadas. Existen diferentes definiciones de modelos elipsoidales utilizados para representar la forma de la Tierra

y el usuario puede referir una posición geodésica con un modelo elipsoidal en particular. Como ejemplo, existe el WGS-84 del Comité para el Sistema geodésico Mundial que se definió en 1984, el elipsoide de Clark, etc. Hay que tener en cuenta en que modelo elipsoidal se está trabajando, para evitar errores de interpretación en los datos.

2.2.4. Señales manejadas por el GPS

Los osciladores que hay a bordo de los satélites GPS generan una señal con una frecuencia fundamental f_0 con estabilidad en el rango de 10^{-13} , y dos señales portadoras en la banda L, comprendida entre 1 y 2 [GHz], llamadas L1 y L2, que se generan mediante la multiplicación entera de f_0 de la siguiente manera:

- $f_0 = 10.23$ [MHz]
- Portadora L1 = $154 \cdot f_0 = 1575.42$ [MHz] @ 19 [cm]
- Portadora L2 = $120 \cdot f_0 = 1227.60$ [MHz] @ 24.4 [cm]

Para lograr obtener las lecturas de los relojes, se hace uso de dos códigos, éstos se caracterizan por contener en ellos un ruido pseudoaleatorio (PRN, Pseudo Random Noise). El primero es el llamado código C/A (Coarse Acquisition) o S (Standard) que es generado con una frecuencia igual a $f_0/10$, el cual se repite cada milisegundo. Este código es el que ofrece menor precisión y se utiliza en el llamado SPS (Standard Positioning System) de uso civil, se transmite solo en L1. El segundo es el código P (Precise) generado mediante la frecuencia fundamental f_0 . Ofrece mayor precisión y se utiliza en el PPS (Precise Positioning Service) - de uso militar hasta hace algunos años -, se transmite sobre las portadoras L1 y L2.

- Código P: $f_0 = 10.23$ [MHz] en L1 y L2
- Código S ó C/A: $f_0 / 10 = 1.023$ [MHz] en L1

Los satélites emiten dos portadoras a la misma frecuencia, moduladas en fase (BPSK) por diferentes códigos pseudoaleatorios. El receptor GPS calcula la correlación entre el código recibido y el código del satélite cuya señal pretende detectar, de esta forma se pueden separar las señales de los diferentes satélites y se obtiene un retardo temporal del cual se derivara la distancia.

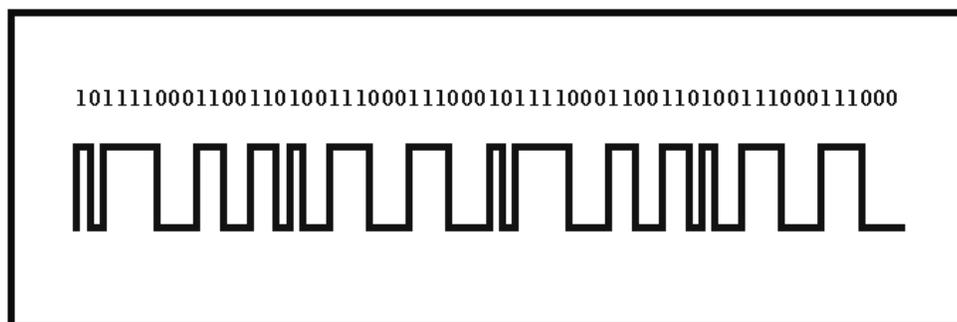


Figura 2.7. Señal pseudoaleatoria manejada por el GPS.

2.2.5. El código NMEA

NMEA es un protocolo que se usa para la navegación tanto marítima, como aérea y terrestre.. Por medio del NMEA se envía una serie de enunciados de información que contienen: posicionamiento, puntos de destino (waypoints), satélites que están proporcionando la información, intensidad de las señales, velocidad, etc.

Para poder comprender dichos enunciados es necesario saber como se componen y cuales son sus funciones principales. A continuación se da un ejemplo donde se explica el contenido de un enunciado. Para ello se toma la lectura de un archivo, que puede ser editado con cualquier procesador de texto.

```
$GPGGA,161555,4321.1752,N,00823.0447,W,2,08,02.3,0009,M,-053,M,02,0508*4F
```

El significado es:

\$GPGGA.....	"Talker" (GPS). Identifica el enunciado, ya que hay muchos otros diferentes.
\$.....	Identificador de inicio del enunciado.
161555.....	Horas, minutos y segundos.
4321.1752, N.....	Latitud Norte
00823.0447, W.....	Longitud Oeste
2.....	Calidad de la posición
08.....	Número de satélites captados por el receptor.
2.3.....	Degradación horizontal de la posición.
0009,M.....	Altitud en metros sobre el nivel medio del mar
-053,M.....	Altura del Geoide sobre el elipsoide WGS84
02.....	Intervalo en segundos desde la última posición
0508.....	Número de identificación de la estación GPS (Finisterre)

Figura 2.8. Ejemplo de una sentencia NMEA.

La anterior es un solo enunciado de los casi cuarenta que proporciona el protocolo NMEA cada segundo.

2.3. SISTEMA DE NAVEGACIÓN INERCIAL (SNI)

El Sistema de Navegación Inercial o SNI provee información sobre la orientación instantánea de la nave, así como su aceleración, velocidad y posición. Este es un dispositivo muy crítico para obtener buena precisión en un sistema LIDAR, dado que las diferentes tecnologías que utiliza son las más difíciles de calibrar y mantener en funcionamiento óptimo. Estos dispositivos están disponibles de distintos fabricantes, con cualidades diferentes entre sí, estando la precisión directamente ligada al costo. Para dar una idea del precio, la compañía Optech, una de las mayores fabricantes y proveedoras de componentes y servicios de LIDAR, ofrece un sistema inercial por un cuarto de millón de dólares. Aunque existen otras opciones de menor costo, como se verá en el siguiente capítulo.

2.3.1. Marco inercial y sistema de coordenadas fijo a la plataforma

El proceso de navegación se define dentro de un marco de referencia conocido, usualmente esta referencia se define como un sistema coordenado fijo o marco de referencia inercial. Las mediciones de los sensores son referidas a un sistema coordenado particular fijo al cuerpo del vehículo. Cuando los marcos de referencia no coinciden, es necesario transformar cantidades vectoriales entre sistemas coordenados.

Un marco inercial es un marco de referencia o conjunto de ejes en el que las leyes de Newton son válidas y debe tener un origen y ejes fijos. Un marco inercial no es acelerado, pero puede ser un marco cuyos ejes tienen una dirección fija mientras su origen se mueve a lo largo de una línea recta con rapidez constante. El origen del sistema coordenado inercial es arbitrario y los ejes mutuamente perpendiculares pueden apuntar en cualquier dirección. Todos los sensores inerciales producen mediciones relativas a un marco inercial, pero miden solo a lo largo de su eje sensitivo.

Para propósitos de discusión es conveniente en algunos casos definir un marco inercial que coincida con el centro de masa de la Tierra, los ejes inerciales x , z apuntan hacia el equinoccio de primavera y a lo largo del eje de giro de la tierra respectivamente, y el eje y se define ortogonal a los dos anteriores para completar el sistema de coordenadas.

2.3.2. Sensores inerciales

Un sensor inercial es aquel que produce mediciones relativas a un marco de referencia inercial a lo largo de un eje sensitivo; magnetómetros, giróscopos y acelerómetros, son ejemplos de sensores inerciales.

2.3.2.1. Acelerómetros

Un requisito fundamental en el diseño y operación de sistemas aeroespaciales es la determinación de la aceleración del vehículo con respecto al espacio inercial. Para la medición de esta variable se utilizan acelerómetros, éstos dispositivos detectan cambios de velocidad por unidad de tiempo y normalmente se emplean para medir movimientos traslacionales; en contraste con el giróscopo, el cual mide movimientos rotacionales. Ambos basan su funcionamiento en los principios de las leyes de Newton y frecuentemente se hace referencia a ellos como sensores de fuerza específica (SFE). Ésta se denota por el vector \vec{a} , y es la fuerza Newtoniana F , que actúa sobre el vehículo dividida entre su masa M , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{M} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \dots(2.2)$$

\vec{a} está comúnmente ligada a cada uno de los ejes del cuerpo del vehículo x , y , z , de tal forma que $\vec{a} \cong [a_x, a_y, a_z]^T$.

Se utiliza el término sensor de fuerza específica (SFE), debido a que estos dispositivos no realizan en realidad la medición de la aceleración. Esto se puede ver si consideramos un vehículo en caída libre equipado con un sensor de este tipo. Si bien, claramente puede apreciarse que la aceleración del vehículo es de $g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$, el SFE registrará una aceleración nula. La razón, por supuesto, es que la fuerza de atracción gravitacional actúa de igual forma sobre cada partícula de masa del SFE, de tal manera que no existe ni tiene lugar ningún desplazamiento relativo entre la masa de prueba m y la carcasa del sensor. Para poder llevar a cabo una lectura en este tipo de sensores, debemos identificar únicamente las fuerzas inerciales (Newtonianas), sin tomar en consideración las fuerzas gravitacionales o las proyecciones causadas por la inclinación del vehículo con respecto a la horizontal local. En los vehículos aeroespaciales, dichas fuerzas inerciales incluyen el empuje, la elevación aerodinámica o resistencia al avance, las fuerzas centrípetas (presentes en trayectorias de vuelo curvas), o fuerzas de reacción de D’Alambert actuando verticalmente ascendentes en reacción contra la atracción gravitacional, estas fuerzas se manifiestan por sí mismas como $-g$ y pueden ser registradas por el SFE.

2.3.2.1.1. Acelerómetros de estado sólido

En los años recientes, ha habido un avance significativo en el desarrollo de sensores de estado sólido que emplean las características básicas de los materiales piezoeléctricos. Éstos producen una carga eléctrica cuando son sujetos a una fuerza de compresión mecánica; del mismo modo los materiales piezoresistivos producen un cambio en su resistencia. Éstos principios fundamentales de operación son usados hoy en día en la gran mayoría de los acelerómetros de estado sólido.

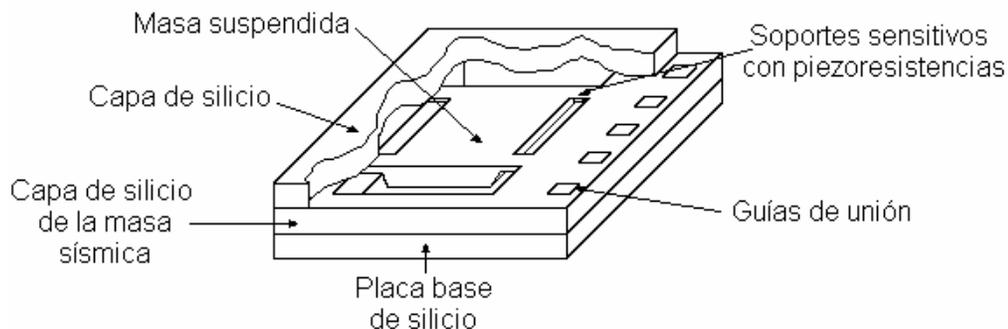


Figura 2.9. Acelerómetro de silicio micromaquinado.

Esta tecnología también incluye el movimiento de una masa que se forma en una placa de silicio sostenida por vigas del mismo material. Como las vigas se curvan en respuesta a las fuerzas de aceleración debido a la inercia de la masa; el material se comprime, ejerciendo presión en cuatro elementos piezoresistivos. Estas piezoresistencias se encuentran conectadas en una configuración de puente de Wheatstone; dos de las resistencias disminuyen su magnitud cuando hay una aceleración en un sentido, debido a la fuerza que ejerce la masa móvil sobre ellas, y viceversa cuando existe una aceleración en sentido opuesto.

Este tipo de sensores se logran construir con una técnica llamada *micromaquinado*, que utiliza procesos de fotolitografía a partir de una estructura de silicio. La figura 2.9 muestra un acelerómetro de silicio micromaquinado.

2.3.2.2. Giróscopos

Los giróscopos tienen la capacidad de sensar desplazamientos angulares alrededor de algún eje definido. Son usados para proveer velocidad angular y posición de referencia para determinación de orientación en los sistemas de guía. Sus principales aplicaciones se encuentran en estabilización de ruta de vuelo, pilotos automáticos, estabilización de plataformas y navegación asistida por computadora.

Un giroscopio hace uso de las propiedades inerciales de una rueda girando a gran velocidad. Esta tiende a mantener la dirección de su eje de giro en el espacio, en virtud de su vector de momento angular, que es el producto de su inercia por su velocidad de giro; para de esta manera definir una dirección de referencia.

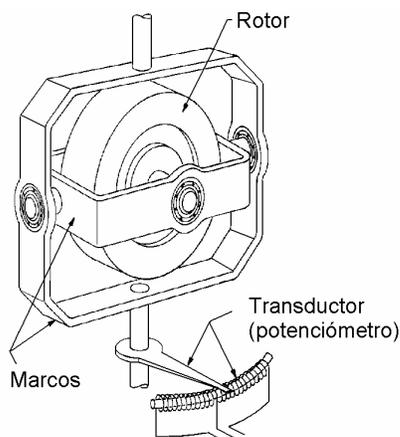


Figura 2.10. Partes principales de un giroscopio.

Los primeros giróscopos mecánicos consistían de un rotor suspendido sobre una serie de monturas, las cuales le permiten tener dos grados de libertad en relación con la base sobre la cual está montado todo el conjunto. Una forma común de este tipo de montura, es aquella que consta de dos anillos basculantes formando una suspensión similar a la de una unión universal. Para fines de análisis se supone que no existe fricción entre los baleros de los anillos, ni en el transductor y que todas las partes están perfectamente balanceadas.

Una vez que el rotor se pone en marcha con el eje de giro en una dirección arbitraria, éste permanecerá en esa dirección aunque el marco exterior esté girando o trasladándose en relación con el rotor giratorio. Éste permanecerá en su orientación inicial en el espacio inercial, hasta que algún par externo sea aplicado, de manera perpendicular al eje de giro. Este par provocará que el rotor gire en cuadratura alrededor de un tercer eje, o como es más comúnmente conocido; el rotor precesará.

Existen varios factores de los cuales depende la correcta operación de un giróscopo de masa giratoria. En condiciones reales, existe fricción y desbalanceo en el rotor y los rodamientos de los anillos, y estas características cambian con el desgaste, con la temperatura y con otros factores ambientales. En un giróscopo práctico, similar al mostrado anteriormente, los pares resultantes producidos por estas fuentes de error indeseables, producen una precesión del eje de giro del orden de alguna fracción de grado sobre minuto. Esta precesión no deseada sobre el eje de giro, es generalmente conocida como deriva; que es la falla principal de los giróscopos.

Este tipo de dispositivos son comúnmente usados como giróscopos direccionales o verticales en aeronaves, o como giróscopos de orientación para sistemas de misiles. En cualquier caso, pueden proveer una salida eléctrica hacia el sistema de piloto automático y una referencia visual de orientación por medio de un horizonte artificial. Esta referencia necesita ser recalibrada o restablecida (por el problema de deriva), a través de alguna fuente externa, tal como el Norte magnético, la vertical gravitacional, o una dirección radio-transmitida.

No debemos perder de vista que la precisión lograda finalmente en un sistema de guía inercial, está limitada de una manera muy importante por los errores inherentes y la sensibilidad de los instrumentos inerciales de medición.

2.3.2.2.1. Giróscopo vertical

La manera obvia para forzar la dirección de la vertical local, alrededor del eje de giro, es poniendo a trabajar la fuerza de atracción gravitacional de la tierra. El método más simple y barato, consiste en colocar una pequeña masa sujeta al marco interno G_1 , esto introduce intencionalmente un desequilibrio. Obviamente, esto causa que el giroscopio se vuelva sensible a las componentes horizontales de la aceleración y pueda, por lo tanto, causar una precesión no amortiguada del eje de giro y llevar a desviaciones importantes de la vertical local. El marco interno, se equipa con dos inclinómetros o sensores de nivel perpendiculares entre sí; sus correspondientes salidas son alimentadas a dos amplificadores que a su vez controlan a sus ejes correspondientes a través de dos motores; de esta manera se corrige la precesión hasta reducirla a cero. Este tipo de mecanización determina la verticalidad en dos ejes, a partir de la fuerza de gravedad.

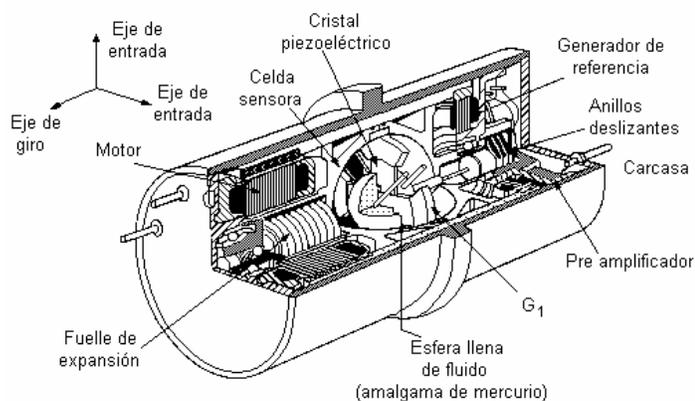


Figura 2.11. Giróscopo vertical.

2.3.2.2.1. Giróscopos de estado sólido

El uso de elementos vibratorios para la medición de velocidad rotacional empleando el efecto Coriolis, es un concepto que data de alrededor de 1950. En realidad, la idea ya había sido desarrollada desde hace tiempo, a partir de la observación de que ciertas especies de moscas utilizan un par de antenas vibrantes para estabilizar su vuelo. Esta técnica de medición ha concretizado un término práctico: Sensor de velocidad angular de cuarzo o QRS de sus siglas en inglés (Quartz Rate Sensor). Para entender como funciona el QRS, es necesario familiarizarse con el principio de Coriolis. Dicho de una manera sencilla: el movimiento lineal dentro de un marco de referencia giratorio, posee una componente de velocidad que es perpendicular a dicho movimiento lineal.

Un ejemplo del efecto Coriolis, es el que se muestra por medio de los patrones de viento en la atmósfera de la tierra. Las células de convección en la atmósfera establecen un flujo de viento desde los Polos hacia el Ecuador (con una orientación Norte-Sur). La rotación de la tierra causa que estos flujos lineales desarrollen una componente ortogonal al movimiento, desviando el viento hacia una dirección Este-Oeste. Es el efecto Coriolis también responsable de las espirales de nubes que se observan desde satélites.

Ahora aplicaremos este principio a nuestro sensor de rotación. En la figura 2.12 se puede ver que el QRS está dividido en dos partes: excitador y transductor.

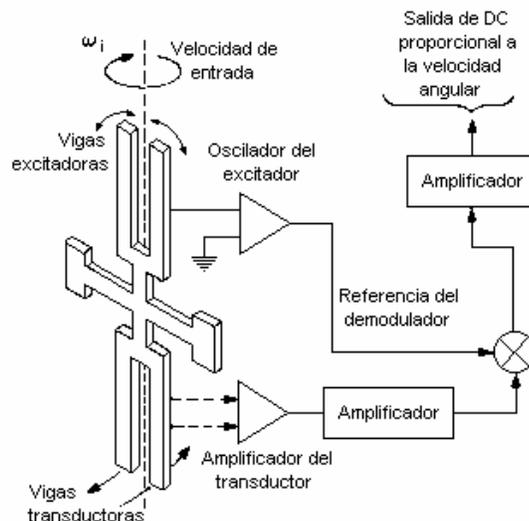


Fig. 2.12. Sensor de cuarzo para medición angular.

El excitador funciona igual que un tenedor sintonizable sencillo. Debido a que las vigas del tenedor están construidas de cristal de cuarzo, es posible hacerlo resonar eléctricamente. Cada viga del tenedor tiene una masa y una velocidad radial instantánea que cambia sinusoidalmente conforme la viga se mueve hacia atrás y hacia adelante. Debido a que la base del tenedor es estacionaria, los momentos de las dos vigas se cancelan mutuamente y no hay transferencia de energía de las vigas hacia la base. En realidad, solo se usan 6 $[\mu\text{W}]$ para mantener la resonancia del tenedor.

Tan pronto como el tenedor sintonizable es girado alrededor de su eje de simetría, el principio de Coriolis ejerce una influencia sobre su comportamiento. Por convención (la regla de la mano derecha), el vector rotacional ω_i es descrito por una flecha que se alinea con el eje de rotación. La velocidad radial instantánea de cada una de las vigas, debido al efecto Coriolis, generan un vector producto-cruz con este vector de rotación. El efecto neto es que cada viga generará una fuerza perpendicular a la fuerza de entrada y a la velocidad radial instantánea de cada una de las otras vigas:

$$F = 2m\omega_i V_r \quad \dots(2.3)$$

donde:

m	=	masa de la viga
ω_i	=	velocidad de giro
V_r	=	velocidad radial

Hay que notar que esta fuerza es directamente proporcional a la velocidad de rotación, y como la velocidad radial de las vigas es sinusoidal, la fuerza resultante sobre cada viga es también sinusoidal. Debido a que las velocidades radiales de las dos vigas son iguales y opuestas, las fuerzas de Coriolis son iguales y opuestas, produciendo un par oscilante en la base de la viga excitadora del tenedor, que es proporcional a la velocidad angular de entrada.

Es ahora cuando el transductor del QRS entra en juego. La variación sinusoidal del par de entrada causa que las vigas de la parte transductora empiecen a moverse de manera tangencial a la rotación y con la misma frecuencia de vibración del excitador. Las fuerzas que causan que las vigas transductoras se muevan, son directamente proporcionales a la velocidad de rotación; si no hay rotación, las vigas transductoras no se moverán. De esta forma un QRS puede detectar también una entrada con rotación cero.

Una vez que las vigas transductoras se encuentran en movimiento, resulta muy sencillo amplificar su señal de salida y demodularla usando la frecuencia del excitador como referencia. Una etapa adicional de amplificación permite acondicionar la señal y producir una señal de salida de DC, que es directamente proporcional a la velocidad angular de entrada. Toda la electrónica es muy sencilla y puede estar contenida dentro del mismo encapsulado del sensor.

El QRS es fabricado de una oblea de cristal de cuarzo crecido de forma sintética. Las propiedades piezoeléctricas del material son particularmente estables, tanto a la temperatura, como al tiempo. El cuarzo presenta un alto módulo de elasticidad y debido a ello puede resonar de una forma muy precisa con una alta Q (factor de calidad). Además, el cuarzo puede ser trabajado usando líquidos químicos convencionales, por lo que su técnica de fabricación es similar a la usada para la fabricación de semiconductores de silicio.

2.3.2.2.2. Giróscopos láser

Los giróscopos tradicionales son relativamente sencillos de entender y de fabricar pero tienen varios problemas: partes móviles, secesión, deriva y el desgaste natural provocado por la fricción entre los componentes. Una alternativa que ya está ganando la aceptación es la de los giróscopos láser que no tienen partes móviles, alta estabilidad en tiempo y temperatura, confiabilidad y baja sensibilidad a factores ambientales como vibración, choque y aceleración.

Existen varios tipos de giróscopos láser en desarrollo, pero uno de los más difundidos en aplicaciones militares y comerciales es el Giróscopo de Fibra Óptica (FOG). Estos dispositivos trabajan utilizando un anillo de fibra óptica y un láser de estado sólido valiéndose del efecto Sagnac descubierto en 1913. Éste descubrió que la luz enviada a través de una trayectoria cerrada (anillo) en dos direcciones opuestas mostrara una diferencia en fase cuando dicha trayectoria sea rotada. Una vez descubierto el dicho efecto lo que hacía falta solo era encontrar la manera de medir la diferencia en fase de las dos ondas y relacionarla con la tasa de giro del anillo y, por consiguiente, del cuerpo pegado a este.

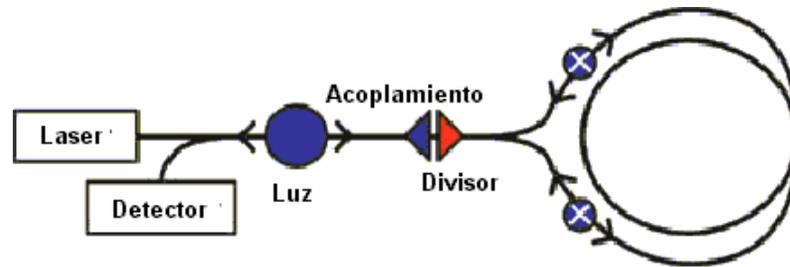


Figura 2.13. Esquema de un giróscopo de fibra óptica.

El láser provee una fuente de luz que esta completamente en fase, un dispositivo óptico divide le rayo en dos (divisor) y cada haz es introducido por cada una de las aberturas de la fibra óptica. Al salir los dos rayos de luz y recombinarlos se obtendrá un patrón de interferencia, si ambos están en fase la interferencia será constructiva y la luz tendrá mayor intensidad, si no están en fase habrá interferencia destructiva y la luz tendrá menor intensidad.

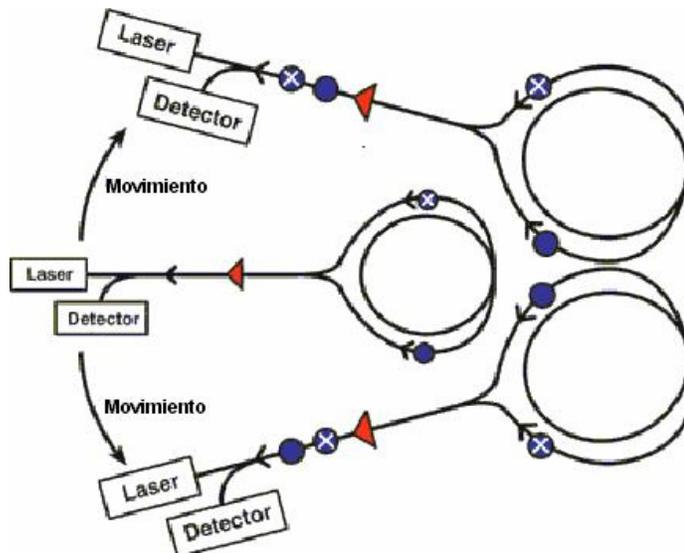


Figura 2.14. Funcionamiento de un Giróscopo de Fibra Óptica.

La causa de la diferencia de fase en el FOG se debe las diferentes trayectorias que recorren los dos rayos de luz al pasar por la fibra óptica, al girar el FOG en determinada dirección uno de los rayos de luz viaja una distancia mayor que el otro.

El uso de estos FOG se está dando actualmente en robótica de alta precisión, tecnología espacial, militar, especialmente naval. Esto se debe principalmente a la casi ausencia de deriva que presentan estos dispositivos la cual llega a ser de 0.0012 [$^{\circ}/\text{hr}$], mientras que la deriva de un giróscopo mecánico es máximo de 0.1 [$^{\circ}/\text{hr}$] y su uso es principalmente para aplicaciones militares no estando disponibles para cualquiera.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE UN LIDAR PARA OBTENCIÓN DE MAPAS TOPOGRÁFICOS

No debemos perder de vista el hecho de que nuestro sistema LIDAR debe ser de bajo costo, por lo tanto, todos los elementos que lo componen, incluyendo el SNI y la plataforma estabilizada también deben serlo. En este capítulo se hace una descripción del criterio de selección de componentes y se propone su integración en un diseño presentado al final de este capítulo.

Los sistemas láser exploran el terreno siguiendo el siguiente esquema:

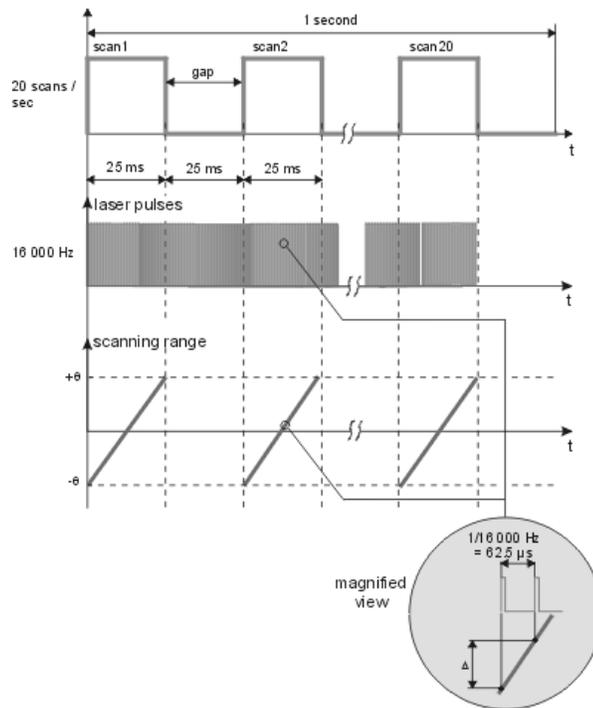


Figura 3.1. Forma de barrido utilizada por un sistema LIDAR.

Como se puede observar, mientras que en la segunda mitad de cada ciclo de barrido (GAP) no se realiza ninguna acción, en la primera mitad (SCAN) tiene lugar todo un conjunto de operaciones: durante los 25 [ms] que dura un SCAN se emiten un promedio de 400 pulsos cortos cada 62.5 [μ s], cada pulso tiene una duración aproximada de 10 [μ s]. Esto deja aproximadamente 50 μ s para recibir el pulso y procesarlo antes de emitir el siguiente.

Durante el vuelo el sistema LIDAR obtiene las tres coordenadas geodésicas básicas de cualquier punto en la tierra: latitud, longitud y altitud, el proceso se repite a lo largo del terreno para generar la información del mapa correspondiente. Es aquí donde los problemas de sincronización entran en juego; las unidades GPS más modernas pueden enviar información a una tasa de hasta 20 datos por segundo como máximo. Una aeronave vuela a 200 [km] por hora, recorriendo cerca de 61 metros en un segundo, durante este tiempo el láser va haciendo un barrido, del mismo modo la información proveniente del SNI, con los ángulos en los que está la nave en cualquier punto, son calculados cada segundo o menos. Esto obliga a que cualquier posición y ángulo en cualquier otro momento del intervalo, deba ser obtenido mediante interpolación para muchos de los pulsos.

Otro aspecto que debe cuidarse es que la estación terrestre GPS, que se localiza en un punto conocido en Tierra, se encuentre cerca de la zona de vuelo. La razón de esto es simple, cualquier anomalía que afecte al sistema aéreo afectará al sistema terrestre en la misma medida si este se encuentra lo suficientemente cerca; dado que la distancia del satélite al sistema aéreo es casi la misma que del satélite a la estación terrestre se pueden aplicar las correcciones necesarias para cancelar efectivamente los errores.

Asumamos que hemos solucionado el problema del GPS, todavía falta considerar la unidad de medición inercial. Este sistema debe garantizar que el eje focal del láser es conocido perfectamente y de preferencia que es vertical. El procedimiento más simple es probar el sistema en Tierra y completar la calibración en vuelo, por lo que se necesita un área de prueba en la que todas las características sean bien conocidas, el sistema LIDAR puede ahora volar por dicha área para reunir los datos del caso, haciendo una sencilla prueba: Se vuela en la dirección opuesta a la de la primera pasada, y después se giran 90 grados las direcciones de vuelo anteriores para tener cuatro vuelos formando una cruz, se deben obtener idénticos resultados del área en cuestión. Si no es así, pero hay una variación consistente entre las cuatro diferentes direcciones, entonces lo más probable es que exista un desajuste que puede ser removido matemáticamente.

El asunto de los retornos del rayo resulta interesante, cuando el pulso láser no golpea de lleno un obstáculo, una parte del rayo se refleja y otra sigue su viaje, la parte reflejada es llamada regreso y es captado por el sistema LIDAR, la parte del rayo que continua su viaje, así que puede golpear otro objeto y generar otro regreso, así que se pueden conocer las altitudes de varios objetos con la misma latitud y longitud, esto generaría, para un solo pulso, uno o más regresos que el sistema debe ser capaz de capturar y almacenar. Si el rayo golpea un árbol, entonces dependiendo del sistema, del tamaño del rayo y específicamente que golpea –sea una hoja, una rama o el tronco- se registrara un primer regreso, varios regresos intermedios de las ramas inferiores y tal vez un ultimo regreso del suelo, si queda suficiente potencia para cuando llega ahí.

Un punto a considerar es el volumen de información que se genera después de un vuelo LIDAR, el cual depende mucho de la aplicación, pero que de cualquier modo es una cosa que sorprende a casi todos los nuevos usuarios. Es necesario darse cuenta de que se está capturando un punto cada tres metros, esto implica que se tienen unos 722,300 puntos por

kilómetro cuadrado, esto no suena tan mal, pero no hay que olvidar que cada punto puede estar compuesto de once dígitos con punto decimal para la Longitud, diez dígitos con punto decimal para la Latitud, así como siete dígitos con punto decimal para la elevación. Estos son muchos bytes de información y los archivos en bruto del sistema LIDAR son del orden de Gigabytes.

En el siguiente capítulo se hace un análisis de la precisión que es posible obtener dependiendo de los componentes que se integren al sistema LIDAR.

3.1. SISTEMAS LÁSER

Existen en la actualidad, muy pocos proveedores de dispositivos láser, dedicados a su integración en sistemas LIDAR. La única opción encontrada en la búsqueda correspondiente es de la empresa RIEGL, quien ofrece dos tipos de escáneres el **LMS-Q140i** y el **LMS-Q280**. La diferencia principal entre ellos es la potencia que manejan, mientras que el primero se utiliza a 600 metros sobre el terreno, el segundo puede volar hasta 1200 metros de altura.

3.1.1. Sistema RIEGL LMS-Q280

El LMS-Q280 mide distancias con una precisión de ± 50 [mm] a una distancia máxima de 1.2 [km]. Cuenta con una salida de datos de puerto paralelo compatible con ECP (Enhanced Capability Port) a través del cual puede proporcionar la siguiente información:

DATO	LONGITUD [bytes]
Distancia	3
Amplitud del pulso de retorno	1
Angulo del espejo	3
Calidad	1
Hora de la medición	3
Información sobre color verdadero (RGB)	6

Tabla 3.1. Datos de salida del escáner LMS-Q280.



Figura 3.2. Vista general del escáner láser RIEGL LMS-Q280.

Todos estos dato deben de ser almacenados durante el levantamiento, siendo por supuesto los más importantes los de: Distancia, ángulo del espejo, calidad y hora de la medición.

Este sistema puede explorar el suelo emitiendo pulsos con una tasa fija utilizando un espejo poligonal rotatorio que cubre un ángulo de $\pm 22.5 [^\circ]$ del que solo se toman las mediciones que resultan ser las más precisas, la densidad de puntos puede variarse realizando el barrido desde 5 hasta 80 veces por segundo. Adicionalmente el LMS-Q280 cuenta con una entrada para señal de sincronización con lo que puede configurarse para recibir la señal de reloj de un GPS (1 pps). A continuación se presenta una tabla con las principales características del LMS-Q280:

Escáner láser LMS-Q280	
Máxima distancia	1200m
Precisión	$\pm 50\text{mm}$
Tasa de medición	8000 [puntos / s]
Longitud de onda del láser	Infrarrojo cercano a 904 [nm] (NIR)
Divergencia del rayo	0.8 [mrad]
Seguridad visual	Clase I
Tasa de barrido	5 a 80 [barridos / s]
Ancho de barrido	$\pm 22.5 [^\circ]$ (45 $^\circ$ totales)
Precisión angular	0.0025 $^\circ$
Interfaz de salida	ECP (Enhanced Capability Port)

Tabla 3.2. Características principales del escáner láser RIEGL LMS-Q280.

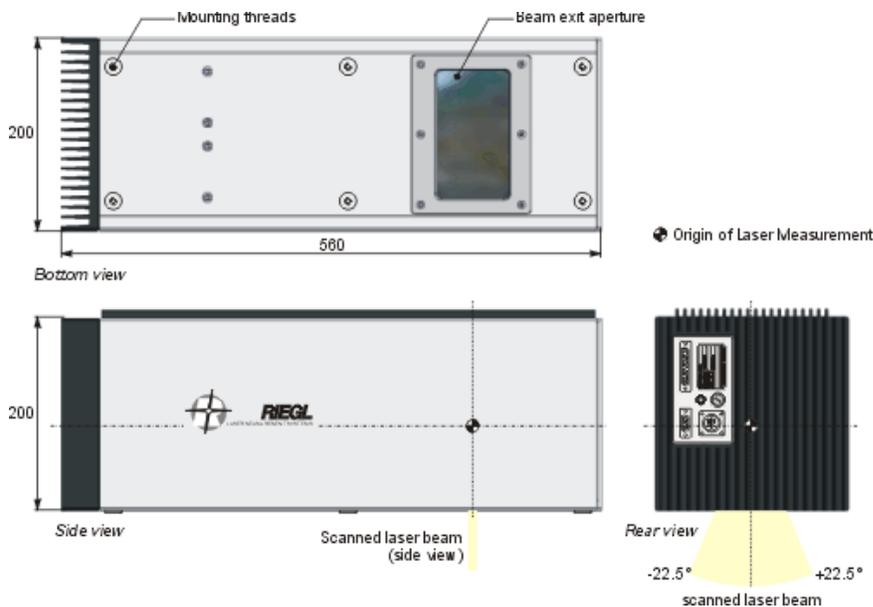


Figura 3.3. Dimensiones del escáner LMS-Q280.

El sistema tiene un peso de 20kg y mide 20x20x56 [cm] por lo que requiere un montaje firme a la plataforma estabilizada con el fin de evitar algún problema de esfuerzo excesivo o desviación durante el vuelo, en la figura 3.3 se pueden observar las dimensiones físicas de la unidad láser.

Un asunto muy importante a considerar, es el hecho de que un GPS proporciona la posición geográfica de la antena y no del receptor. Es entonces necesario considerar el punto de origen de la medición, que para fines prácticos es el lugar en donde se debe colocar la antena GPS.

3.1.2. Sistema RIEGL LMS-Q140i

Este escáner funciona bajo los mismos principios que el Q280 pero con algunas diferencias en la potencia que maneja, lo cual repercute directamente en la máxima distancia y obviamente en el precio. En la tabla 3.3 se presentan sus principales características.

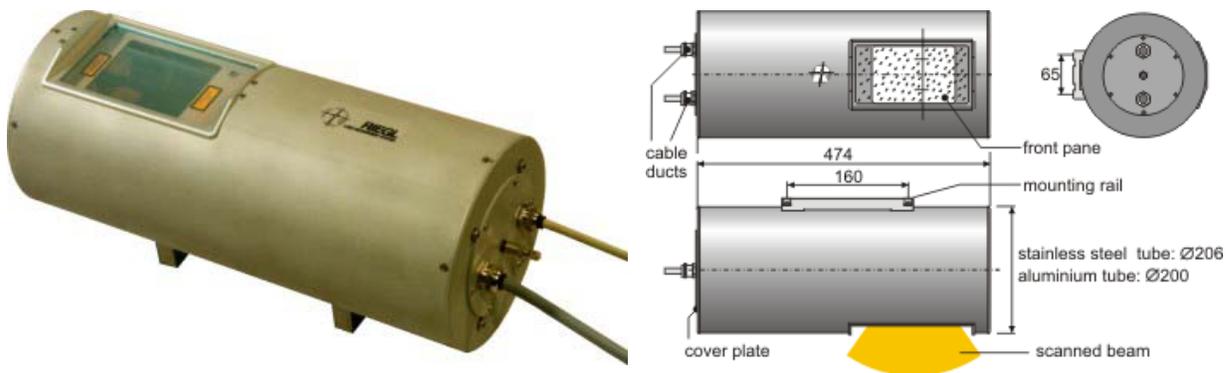


Figura 3.4. Vista general del RIEGL LMS-Q140i.

Escáner láser LMS-Q140i	
Máxima distancia	Según el objetivo hasta 700 m @ 50mm de resolución
Mínima distancia	2m
Precisión	±25mm
Tasa de medición	10,000 puntos / s
Longitud de onda del láser	Infrarrojo cercano a 904nm (NIR)
Divergencia del rayo	3mrad
Seguridad visual	Clase I
Tasa de barrido	1 a 50 barridos / s
Ancho de barrido	±30° (60° totales)
Precisión angular	0.005°
Interfaz de salida	ECP (Enhanced Capability Port)

Tabla 3.3. Características del sistema RIEGL LMS-Q140i.

Este sistema es apto para aplicaciones a baja altura, ya que no permite mediciones a más de 700 [m]. Aunque la precisión de la medición es mayor que la del Q280, la precisión final se parece mucho a la de este último debido a que tiene una divergencia mucho mayor (de 0.2 a 3 [mrad]).

3.2. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

Los receptores GPS han proliferado enormemente debido principalmente a los avances tecnológicos que han permitido el aumento en la precisión, al mismo tiempo que los costos han disminuido. En esta sección se describen las características principales de aquellos dispositivos que fueron considerados para su integración a nuestro sistema LIDAR.

3.2.1. Sistema Trimble AgGPS 132

El AgGPS 132 de la marca Trimble fue el primer equipo que se tomó en cuenta para el diseño porque se tenía por experiencias previas dentro del Instituto de Geografía comprobada su calidad y precisión. Este equipo es de uso agrícola y está diseñado especialmente para aplicaciones de GPS Diferencial (DGPS), además ofrece una precisión de menos de un metro y una salida de señal de 1 pps (pulso por segundo) usada para sincronizar aparatos externos (como un escáner láser).



Figura 3.5. Vista general del Trimble AgGPS 132.

Con el AgGPS se obtiene una precisión de menos de:

$$p < 1m + (10 ppm)(D_{ET})$$

donde:

p → Precisión
 D_{ET} → Distancia entre el receptor y la estación terrestre (Diferencial) más cercana.

Trimble asegura esta precisión siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Número de satélites usados: >5
- PDOP: <4
- SNR (Relación señal-ruido): >6
- Máscara de elevación de satélite: >7.5
- Ambiente con bajo multidireccionamiento
- Acceso a transmisiones de corrección RTCM o compatibles (Servicio GPS Diferencial)

Este sistema puede manejar los mensajes de entrada / salida en varios formatos incluyendo el estándar NMEA-0183, y el TSIP (Trimble Standard Interface Protocol) que es un protocolo propietario de Trimble. En la tabla 3.4 se muestran las principales características del sistema AgGPS 132. Este cuenta con sus propios programas para manejo de los datos y del propio receptor a través de un interprete o *talker*, en este caso se trata del TSIP Talker, a través de este programa se pueden mostrar en la pantalla una serie de datos que se obtienen de las sentencias que proporciona el receptor.

AgGPS Trimble®	
Canales de búsqueda	12 (Código C/A)
Filtrado	Fase-portadora
Precisión	<1m (RMS)
Tasa de actualización	1Hz estándar, 10Hz opcional
Tiempo del primer posicionamiento	<30 segundos típico
Interfaz de comunicación	Serial RS-232
Puertos de comunicación	2 (A y B)
Formatos de salida	NMEA-0183, RTCM SC-104, TSIP
Formatos de entrada	RTCM SC-104, TSIP

Tabla 3.4. Principales características del AgGPS de Trimble®.

3.2.2. Sistema Novatel Propack-G2

Novatel es una compañía canadiense que maneja receptores GPS y otras aplicaciones de posicionamiento, tiene en el mercado varios sistemas con puertos USB, procesadores Intel y tasas de readquisición de 20Hz. Para esta aplicación se consideró la utilización del receptor Pro-Pack-G2, que se muestra en la siguiente figura.



Figura 3.6. Vista general del Novatel ProPack – G2.

Uno de los atractivos de este sistema es la posibilidad de programación con la Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) totalmente compatible con el lenguaje C/C++.

La precisión que asegura el fabricante depende del modo en el que se use el equipo, así que en modo diferencial llega a ser de 0.45 [m]. En la siguiente tabla se muestran sus principales características:

Novatel Propack-G2	
Canales de búsqueda	24 en L1/L2
Filtrado	Fase-portadora
Precisión	0.45 [m]
Tasa de actualización	20 [Hz]
Tiempo del primer posicionamiento	30 segundos típico
Interfaz de comunicación	RS-232 y RS-422
Puertos de comunicación	3 (COM1, 2 y 3)

Tabla 3.5. Principales características del Novatel ProPack – G2.

Este sistema tiene la gran ventaja de proporcionar hasta 20 datos de posicionamiento por segundo, lo que nos permite ahorrar en interpolaciones.

3.3. SISTEMA DE NAVEGACIÓN INERCIAL

Como ya hemos mencionado, el sistema de navegación inercial servirá para proporcionar información sobre la orientación del escáner láser, durante la campaña de vuelo con LIDAR. El SNI es un componente muy crítico, en cuanto que en él recae gran parte de la precisión del sistema y el costo total del mismo.

En nuestro caso el SNI servirá solamente para obtener información sobre la orientación, desechándose los demás datos, que no son pertinentes para esta aplicación. El lector interesado puede consultar la referencia 1, que muestra el desarrollo de las ecuaciones de Euler para el movimiento de un cuerpo rígido, donde se puede apreciar como los datos de giróscopos y acelerómetros son convertidos en una medida de la orientación. Esta información será usada con un doble propósito: para controlar el apuntamiento de la plataforma donde se encuentra colocado el barredor láser, y para compensar y corregir la localización de cada punto o distancia obtenida por el escáner.

3.3.1. Sistema de referencia de la vertical

Se ha considerado la utilización de un sistema de medición inercial, previamente desarrollado en el Laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada del Instituto de Geografía de la UNAM, con el propósito de estabilizar una plataforma aérea que controla el apuntamiento de cámaras digitales de formato pequeño.

Este sistema permite obtener una referencia de la orientación en los ejes X, Y mientras que el eje Z es determinado de manera independiente con una brújula electrónica. El sistema inercial basa su operación en la lectura de tres giróscopos y dos acelerómetros en un esquema de filtrado complementario, donde los giróscopos proporcionan la orientación, mientras que los acelerómetros corrigen la deriva de los primeros. El diagrama de bloques se muestra en la figura 3.7.

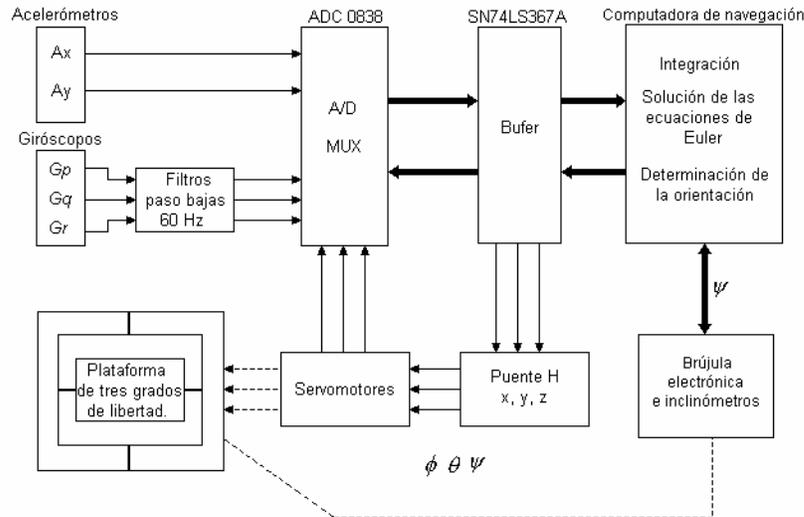


Figura 3.7. Diagrama de bloques del sistema de orientación.

La precisión que maneja este sistema es de ± 1 [°] en los ejes X, Y así como de ± 0.5 [°] en el eje Z. Una de sus principales ventajas es de ser de bajo costo, sin embargo su principal característica es el hecho de que la deriva de los giróscopos es cancelada por la referencia de la vertical que proporcionan en todo momento los acelerómetros. Convirtiéndolo en un equipo adecuado para mantener una referencia de la horizontal en todo momento.

Los sensores inerciales que utiliza este sistema, son: Acelerómetros fabricados con silicio micromaquinado que contienen módulos de amplificación, acondicionamiento de señal y compensación de temperatura de -20 a 85 [C]. Proporcionan una salida analógica de 0 a 5 [V], teniendo 2.5 [V] de salida para aceleración cero. Su intervalo de medición de aceleración es de ± 2 [g]. Incorpora giróscopos piezoeléctricos, con electrónica integrada que entrega a su salida un intervalo de voltaje de 0 a 5 [V], proporcional a la velocidad angular instantánea (15 [mV/°/s]). Es de tamaño reducido ($6.8 \times 2.5 \times 2.5$ [cm]) y de bajo peso (100 [gr]). Su ancho de banda es de 0 a 50 [Hz] y su intervalo de medición es de ± 100 [°/s].

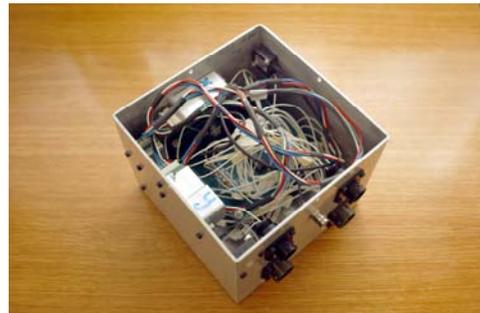
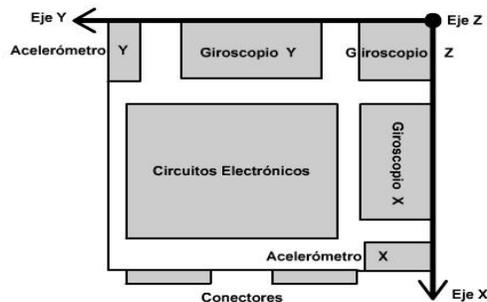


Figura 3.8. Distribución de sensores y tarjetas electrónicas dentro de su contenedor.

3.3.2. Sistema Novatel Black Diamond

Otra opción que se consideró como viable en este proyecto, fue la inclusión de un sistema GPS/Inercial integrado llamado Sistema Black Diamond de la compañía Novatel. Puede calcular posición, velocidad y orientación, todo en un solo instrumento y con una alta precisión.



Figura 3.9. Vista general del sistema Black Diamond.

Las principales características se describen a continuación:

NOVATEL BLACK DIAMOND SYSTEM	
GPS	
Canales de búsqueda	24 (12 en L1 y 12 en L2)
Filtrado	Fase portadora
Precisión posición	0.25 [m] (modo Diferencial) 0.02[m] (postprocesado)
Precisión RMS en velocidad	0.02 [m/s]
Precisión RMS en aceleración	0.03 [m/s ²]
Precisión del reloj	50 [ns]
Tiempo al primer posicionamiento	120 [s]
Tasa de actualización	100 [Hz]
Interfaz de comunicación	RS-232
Puertos de comunicación	3 (COM1, 2, 3)
INS	
Intervalo de medición de giróscopos	±1000 [°/s]
Deriva de los giróscopos	1 [°/hr]
Intervalo de medición de los acelerómetros	±50 [g]
Error de los acelerómetros	±0.001 [g]
Precisión RMS en orientación	0.015[°] pitch, 0.015 [°] roll, 0.05 [°] azimuth
Tasa de actualización	100 [Hz]

Tabla 3.6. Características del Novatel Black Diamond System.

El sistema consiste de:

- **Controlador BDS.** Receptor GPS con procesamiento Inercial integrado de alta precisión y disponible a altas tasas de información, con memoria interna para almacenamiento de datos.
- **Sensor BDS.** Unidad de Medición Inercial (IMU) con 3 acelerómetros y 3 giróscopos.
- **Software de procesamiento BDS.** Programa que permite procesar la información obtenida en bruto por el sistema y por la estación base GPS para resolver una orientación.

La ventaja de este sistema es que incluye en un solo instrumento una respuesta sincronizada de posición y orientación geo-referenciada con una alta precisión, lo cual reduce los errores de sincronización únicamente a los producidos con el escáner. Este tipo de sistemas se están presentando cada vez más en las aplicaciones de posicionamiento, dado que pueden proporcionar información aunque se interrumpa momentáneamente la recepción GPS.

El sistema Novatel BDS resulta una buena opción y su precio está dentro de las posibilidades de un sistema de bajo costo. Cuenta con salida de señal de sincronización de 1pps, filtrado de tipo Khalman para la solución de la orientación y 128MB de memoria interna para almacenamiento de información.

Las dimensiones del sistema son:

- **Controlador BDS** → 28 x 22.8 x 3.5 cm (con conectores)
- **Sensor BDS** → 16 x 16 x 10 cm

El peso total del sistema es de ~6kg.

3.3.3. Sistemas Pos AV 310, 410 y 510 de Applanix



Figura 3.10. Sistema de orientación inercial Pos AV de la compañía Applanix.

Estos también son sistemas combinados de GPS/SNI. Que tienen las siguientes características:

Pos AV 310	C/A GPS	DGPS	Postproceso
Posición [m]	4.0-6-0	0.5-2	0.05-0.3
Velocidad [m/s]	0.05	0.05	0.075
Cabeceo y rotación [grados]	0.03	0.03	0.015
Norte verdadero [grados]	0.10	0.08	0.035
Ruido [$^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$] 0.15	Deriva [$^{\circ}/\text{hr}$] 0.5		

Tabla 3.7. Sistema Applanix Pos AV-310.

Pos AV 410	C/A GPS	DGPS	Postproceso
Posición [m]	4.0-6-0	0.5-2	0.05-0.3
Velocidad [m/s]	0.05	0.05	0.005
Cabeceo y rotación [grados]	0.015	0.015	0.008
Norte verdadero [grados]	0.08	0.05	0.015
Ruido [$^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$] 0.07	Deriva [$^{\circ}/\text{hr}$] 0.5		

Tabla 3.8. Sistema Applanix Pos AV-410.

Pos AV 510	C/A GPS	DGPS	Postproceso
Posición [m]	4.0-6-0	0.5-2	0.05-0.3
Velocidad [m/s]	0.05	0.05	0.005
Cabeceo y rotación [grados]	0.015	0.015	0.008
Norte verdadero [grados]	0.08	0.05	0.015
Ruido [$^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$] 0.02	Deriva [$^{\circ}/\text{hr}$] 0.1		

Tabla 3.9. Sistema Applanix Pos AV- 510.

Como se ha mencionado con anterioridad, el parámetro más importante en un sistema de navegación inercial es la deriva. En estos sistemas estamos hablando del orden de 0.5 a 0.1 grados sobre hora. Lo que nos coloca con una exactitud inicial de 5 a 10 veces mejor que los sistemas vistos anteriormente, obviamente el precio también cambia en esa misma proporción.

La tasa de actualización de la unidad de medición inercial es de 200 [hz] y el GPS de 10 ciclos por segundo. También maneja el protocolo NMEA.

3.4. COMPUTADORA DE ABORDO

La computadora de abordaje tiene la función de almacenar toda la serie de datos que se generan durante el vuelo del sistema LIDAR. Ayuda en labores de sincronización mediante la interconexión de los equipos a través de sus puertos. Un sistema operativo Windows (XP, 2000, ME, 9X) será adecuado dado que los programas de manejo de los diferentes instrumentos están en esta plataforma, así como muchos de los programas de post-procesamiento. Se debe tener acceso a un puerto paralelo ECP para el escáner RIEGL, además del tradicional puerto LPT de impresora y 1 o 2 puertos seriales dependiendo del diseño. En cuanto a la memoria del disco duro deberá tener alrededor de 40 GB de espacio libre. Para fines de operación y fácil transporte, se requiere el uso de una computadora Laptop.

El diseño que incluye el sistema de referencia de la vertical desarrollado en el Instituto y el sistema AgGPS necesita de una computadora adicional trabajando al mismo tiempo, para efectuar labores de control de orientación de la plataforma.

3.5. PLATAFORMA ESTABILIZADA

Para el mejor funcionamiento del sistema LIDAR, es muy recomendable colocar el escáner láser en una plataforma estabilizada. Esto servirá en gran medida para evitar que el barrido se salga demasiado de la zona del levantamiento. A su vez esto disminuirá el error al momento de llevar a cabo el mapeo de la zona.

La mayoría de las aeronaves llevan como parte de sus sistemas de guía y control un juego de sensores inerciales, sin embargo, no es posible pensar en utilizar estas señales de orientación de la nave; la plataforma debe tener su propia instrumentación para que funcione de manera autónoma.

En el caso del sistema LIDAR es necesario diseñar y construir una plataforma que sea capaz de soportar el peso del sistema y compensar las desviaciones que sufre la nave durante su recorrido.

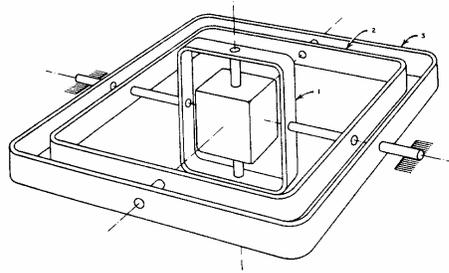


Figura 3.11. Forma general de una plataforma pivoteada.

3.6. ESQUEMAS DE DISEÑO DEL SISTEMA LIDAR

En esta sección se toman en consideración todos los componentes mencionados anteriormente, para obtener diferentes opciones de diseño del sistema LIDAR. Los barredores láser LMS-Q240 y LMS-Q280 son las dos alternativas que se tomaron en cuenta, y aunque el primero de ellos es más económico, el segundo proporciona mayor precisión. Se presentan todas las configuraciones consideradas y su costo. En el siguiente capítulo se hace un análisis de la precisión que se obtiene para cada uno de los sistemas. Se proponen los siguientes esquemas:

	LASER	GPS	SNI
OPCIÓN 1	Q140	PROPACK	IGg
OPCIÓN 2	Q280	PROPACK	IGg
OPCIÓN 3	Q140	NOVATEL BDS	
OPCIÓN 4	Q280	NOVATEL BDS	
OPCIÓN 5	Q140	Pos AV- 310	
OPCIÓN 6	Q140	Pos AV- 410	
OPCIÓN 7	Q140	Pos AV- 510	
OPCIÓN 8	Q280	Pos AV- 310	
OPCIÓN 9	Q280	Pos AV- 410	
OPCIÓN 10	Q280	Pos AV- 510	

Tabla 3.10. Opciones propuestas de sistemas LIDAR.

Los sistemas que incorporan el láser RIEGL® **LMS-Q280®** permiten realizar vuelos más elevados y tienen una mayor precisión, aunque resultan ser las opciones más caras debido al costo de este elemento, sin embargo, es crucial contar con la precisión que este aparato ofrece en la medición de distancias. El sistema Novatel® Black Diamond® proporciona datos de orientación con una precisión muy respetable, una frecuencia de actualización de 100 [Hz] y la ventaja de ofrecer un sistema de posición-orientación en un solo paquete, sin problemas de sincronización entre ellos, facilitando la comunicación con los demás elementos. Los equipos que utilizan el sistema de referencia de la vertical, desarrollado en el Instituto de Geografía de la UNAM, tienen la ventaja de no presentar el problema de la deriva, inherente a todos los sistemas inerciales, en este caso el sistema Novatel-BDS tiene una desviación de 1 [°/hr], esto significa un error en el apuntamiento del orden de 10.47 [m] al paso de 60 minutos y que se sigue acumulando con el tiempo. Otra ventaja importante que presenta este sistema, es el hecho de tener ya la circuitería y la programación necesarias para estabilizar una plataforma aérea.

Por otra parte, los sistemas Pos AV tienen la ventaja de presentar menor deriva, sin embargo, son más caros. A continuación se presenta una tabla de costos tomando en consideración los equipos mencionados:

	PLATAFORMA	LASER	GPS	SNI	PC	TOTAL
Opción 1	3,000	75,000	3,000	5,000	3,000	89,000
Opción 2	3,000	225,000	3,000	5,000	3,000	239,000
Opción 3	3,000	75,000	20,000		3,000	101,000
Opción 4	3,000	225,000	20,000		3,000	271,000
Opción 5	3,000	75,000	90,000		3,000	171,000
Opción 6	3,000	75,000	170,000		3,000	251,000
Opción 7	3,000	75,000	197,000		3,000	278,000
Opción 8	3,000	225,000	90,000		3,000	321,000
Opción 9	3,000	225,000	170,000		3,000	401,000
Opción 10	3,000	225,000	197,000		3,000	428,000

Tabla 3.11. cotización de los sistemas LIDAR propuestos (en USD).

Como se puede ver fácilmente, existe una variación importante en cuanto a costos, solamente algunas opciones de sistemas son de mucho menor precio que los equipos comerciales, lo que los ubica comparativamente, dentro de los sistemas de bajo costo. Sin embargo, es indispensable llevar a cabo un análisis para conocer la precisión que puede proporcionar cada uno de ellos y saber si cumplen con las características exigidas para la generación de mapas topográficos a una escala adecuada. En el siguiente capítulo se efectúan los cálculos de precisión para los diez sistemas.

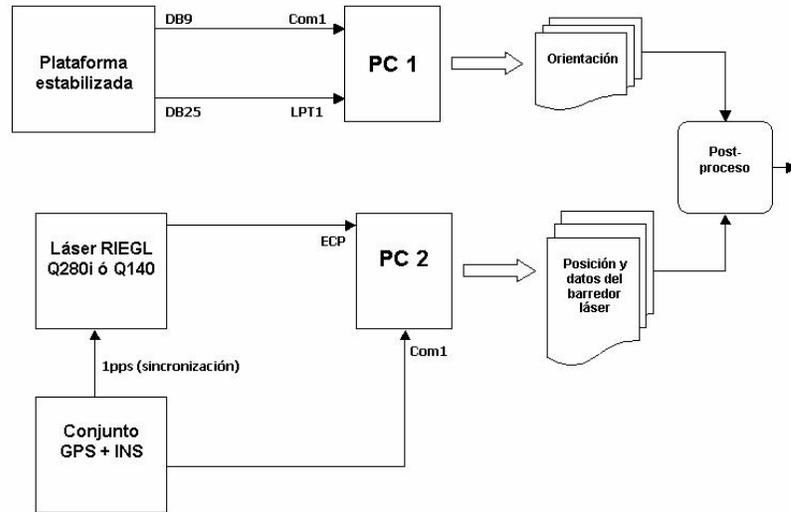


Figura 3.12. Diagrama de bloques de un sistema LIDAR que utiliza el sistema de referencia inercial desarrollado en el Instituto de Geografía de la UNAM.

Se muestran tres diagramas de bloques de sistemas LIDAR. Todos ellos hacen uso de una plataforma estabilizada y alguno de los dos tipos de barredores láser: LMS- Q240 o el LMS-Q280. Tienen diferentes sistemas de orientación inerciales. En la figura 3.12 se muestra una opción que utiliza como sistema inercial, aquel desarrollado en el Instituto de Geografía, donde una computadora (PC 1) realiza el control de la plataforma y almacena la información de orientación. Por otro lado la PC 2 recibe y almacena la información del láser y del GPS (sincronizados por la señal de 1pps). La información se guarda en archivos de bases de datos para ser analizada más tarde en post-proceso.

En la opción mostrada en la figura 3.13, se utiliza la plataforma para estabilizar el barredor láser, pero la información de orientación es almacenada en el conjunto GPS/SNI - Láser, con la ventaja de que la sincronización se hace entre dos sistemas únicamente: el Láser y el conjunto GPS/SNI. Esto aumenta la confianza en los datos obtenidos, los cuales también se procesarán posteriormente.

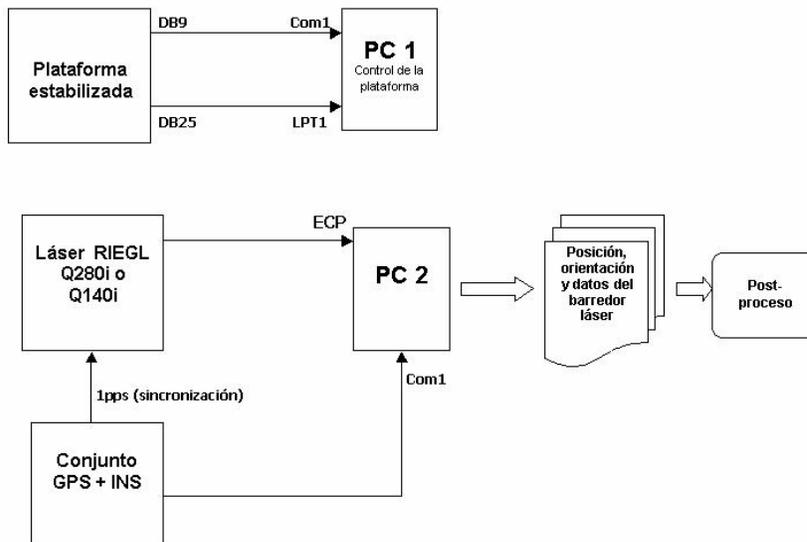


Figura 3.13. Diagrama de bloques de un sistema LIDAR, donde la estabilización la efectúa un sistema y el almacenamiento de datos lo lleva a cabo una segunda PC.

En la última opción, que se muestra en la figura 3.14, se utiliza una sola computadora con dos puertos serie, un paralelo y un ECP, la capacidad de memoria en disco duro debe ser un poco mayor. Presenta la ventaja de tener poco volumen ocupado dentro de la aeronave.

En este último esquema, tanto el conjunto GPS/SNI (posición y orientación) como el escáner láser están conectados a la computadora central por el puerto serial y el ECP, respectivamente, para descargar los datos de posición, orientación y distancia. Por otro lado la adquisición de los datos está sincronizada por el pulso 1pps proveniente del GPS/SNI, el cual alimenta al láser por una entrada especial y a la computadora por uno de los puertos seriales, este genera una interrupción y por medio de un programa, facilitado por el fabricante del láser, todo el proceso de adquisición de datos es sincronizado.

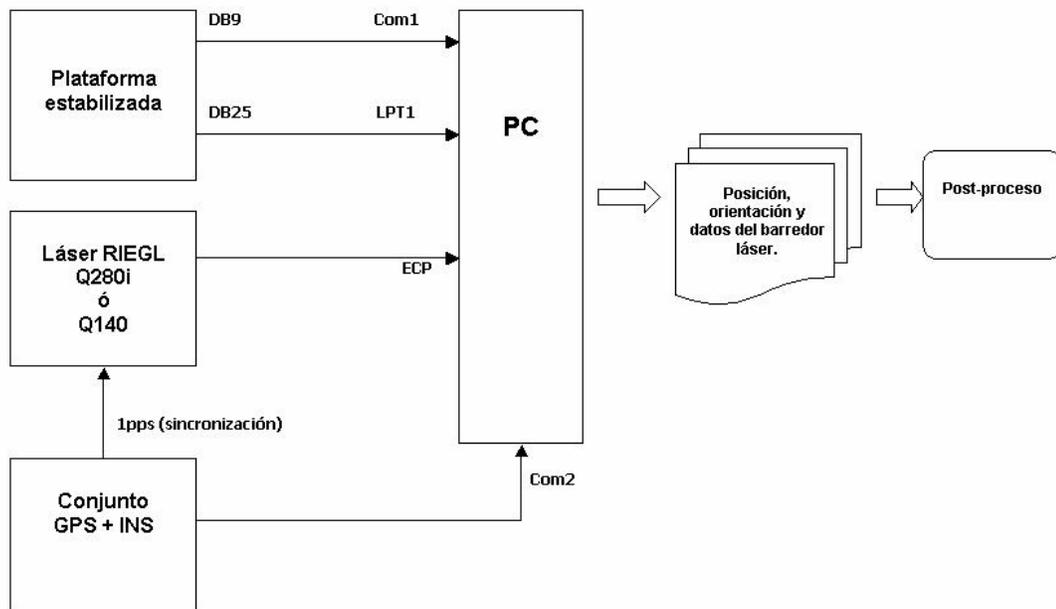


Figura 3.14. Sistema LIDAR con una sola PC, encargada de llevar a cabo el control de estabilización y de almacenar los archivos de datos del levantamiento.

Todos los esquemas requieren de una tarjeta especial para el puerto ECP (Enhanced Capability Port) que es un puerto paralelo modificado bidireccional y cuya descripción detallada se muestra en el apéndice A.

CAPÍTULO 4

CÁLCULOS DE LA PRECISIÓN TOTAL DEL SISTEMA

La precisión es un tema fundamental en general en cualquier equipo de que se trate y en particular en nuestra aplicación topográfica. Los errores permitidos en esta disciplina, utilizando técnicas tradicionales de fotogrametría, se encuentran en algunos casos muy por debajo del metro, no obstante, el sistema LIDAR tiene el compromiso y la capacidad de reducir dicho error. Esta intolerancia a los errores es debida a la finalidad que tienen los mosaicos ortorectificados, que es medir distancias y tamaños reales directamente del mapa. Y utilizando escalas en el orden de 1:50,000 cualquier error pequeño se amplifica tanto, que puede hacer aterrizar a un avión en la sala de espera del aeropuerto, o conducirnos a una isla inexistente; aunque esos son escenarios fatales, lo que puede suceder es que al delimitar predios en un terreno se dé a una persona una parte del terreno de otra y por sencillo que parezca esto puede ser bastante grave en nuestro país.

Para calcular la precisión total del sistema LIDAR, se deben tener en cuenta las precisiones de sus elementos. El error total se da principalmente por la distancia medida por el láser, y las soluciones de posición y de orientación del GPS y del SNI, respectivamente. Las contribuciones al error incluyen tan diversos factores como: el error de apuntamiento inherente del láser, imprecisiones en el tiempo de respuesta de los circuitos electrónicos, desajuste de alineación entre la óptica de transmisión y recepción, errores en el montaje del sensor –que son los desalineamientos mínimos entre el marco de referencia del láser y del SNI-, imprecisiones en el alineamiento de la antena GPS con el centro del sensor láser –normalmente alineada con el centro del espejo- y el error inherente en la medición del ángulo del espejo en el momento de generar el pulso.

La precisión es la principal preocupación a la hora de utilizar un método alternativo como LIDAR y es necesario considerar lo siguiente:

- Las especificaciones nominales de fábrica, se derivan de muestreos estadísticos de la información obtenida de un LIDAR y generalmente se da dentro de 1 sigma (σ), lo que significa que ~68% de la información caerá dentro de este límite, 1.6 sigma (90%) y 2 sigma (95%) casi no se mencionan.
- La precisión es medida a lo largo de todo el ancho de barrido, cuando es bien sabido que el error se incrementa en los extremos.
- Generalmente se calcula la precisión tomando la referencia del GPS, sin tomar en cuenta los errores del modelado del Geoide.
- Casi cualquier precisión calculada se compara con puntos de control terrestres obtenidos con métodos tradicionales, pero los detalles de cómo se obtuvo la posición de dichos puntos no siempre está disponible.

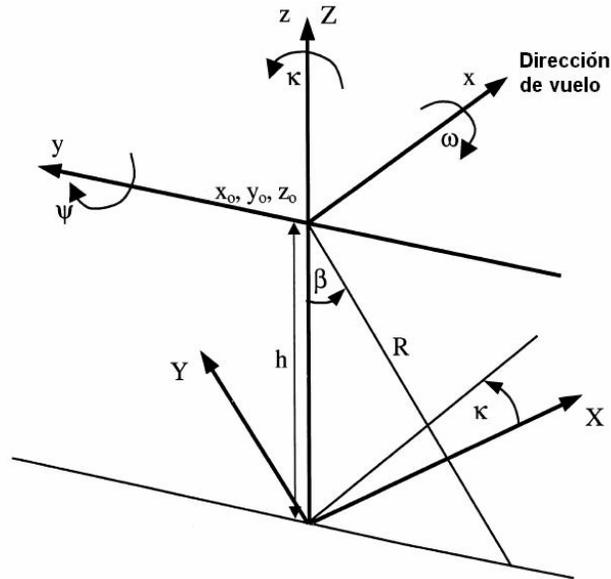


Figura 4.1. Juego de ejes que intervienen en la precisión de un LIDAR.

El tema de la precisión es estudiado por diferentes sociedades cartográficas y de percepción remota, como la ASPRS que formó un Subcomité LIDAR con la finalidad de establecer estándares de calibración, así como unificar definiciones y criterios que permitan una caracterización más formal de estos equipos.

4.1. Fuentes de error en un sistema LIDAR

En la evaluación de los errores en un LIDAR es importante saber que existe un compromiso en el balance de las contribuciones de los componentes, contra el desempeño final del sistema, para eliminar discrepancias costo/desempeño, por ejemplo: un láser con precisión de menos de un centímetro no mejorará la precisión total del sistema si el GPS no está dotado con corrección diferencial, así como un SNI de muy alta precisión no asegurará alta calidad en el apuntamiento, si las mediciones del ángulo del escáner láser están por debajo de una precisión de 0.5 [°].

4.1.1. Errores del escáner láser

Los escáneres láser son una tecnología ya bastante madura y sus alcances son conocidos en todo el mundo. La mayoría de los escáneres actuales son de estado sólido con anchos de pulso en el orden de 10 [ns] y tiempos de levantamiento de hasta 1 [ns]. Bajo condiciones normales de operación, estos dispositivos alcanzan precisiones del orden de 5-7 [cm] independientemente de la altitud. Sin embargo una calibración adecuada del escáner requiere tomar en cuenta el tiempo de respuesta de los circuitos electrónicos, el método para relacionar la posición de emisión del pulso y la de recepción, y la imprecisión en la distancia, debida a la dispersión excesiva del pulso.

Adicionalmente, los factores atmosféricos pueden afectar la precisión de la distancia y tienden a ser mas críticos a mayores altitudes, es por ello que se necesitan modelos adecuados para compensar las mediciones. La razón por la cual vemos el cielo color azul tiene sus bases en efectos atmosféricos sobre la luz, de ello se deduce que la atmósfera tiene una respuesta variable en frecuencia o en longitud de onda, así que es necesario tener un modelo preciso para calcular la corrección atmosférica. Marini y Murray (1973) desarrollaron uno de alcance esférico que debe ser calculado tanto en el avión como en el suelo, también se tienen modelos atmosféricos precisos como parte de los paquetes de post-procesamiento que ofrecen los fabricantes de los barredores láser.

Con todos los problemas que pudiera tener y siempre obedeciendo a un buen diseño, el escáner láser es el dispositivo más preciso y el que menos afecta al desempeño de un sistema LIDAR.

4.1.1.1. Divergencia del láser

Es el error más significativo que introduce el escáner, representando la dispersión física que sufre el rayo a medida que se propaga por el espacio, por dar un ejemplo, un rayo que se emite con un ancho de 0.1 [cm] y que tiene una divergencia de 0.25 [mrad] iluminará un punto de ~25 [cm] en el suelo a una altitud de 1 [km] y uno de ~50 [cm] a 2 [km]. Esta es una medida de la dispersión y de la incoherencia del rayo láser y afecta directamente a la precisión de la medida de la distancia en un sistema LIDAR, porque introduce una incertidumbre del lugar dónde el rayo golpea al suelo dentro de un círculo de cierto diámetro llamado “*huella del láser*”.

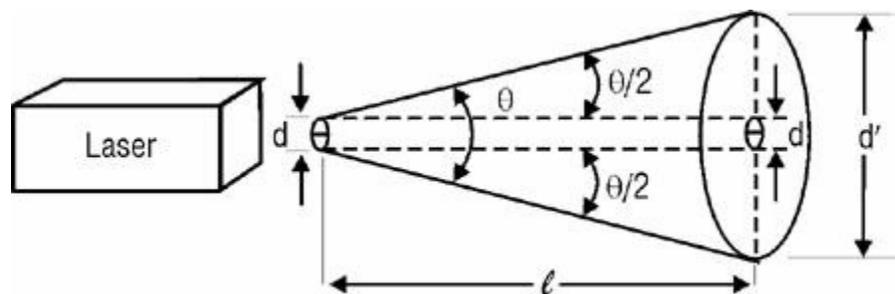


Figura 4.2. Divergencia de un rayo láser.

En la actualidad, este inconveniente puede ser superado parcialmente utilizando un sistema óptico para la emisión de los pulsos. Los valores típicos de divergencia en los equipos láser comerciales van de 0.25 a 5 [mrad].

La señal de retorno proveniente de la superficie será entonces función de la distribución de su energía sobre dicha superficie, ponderada con el perfil de reflectividad dentro de la huella del láser. Si el terreno cuenta con una pendiente pronunciada, la situación se vuelve más complicada que si se tratara con una superficie plana; en general, los blancos que no son uniformes con cambios en reflectividad y pendientes pronunciadas arrojarán datos con una mayor incertidumbre en X, Y. Obviamente este efecto se reduce dramáticamente utilizando un láser con la menor divergencia posible y por consiguiente con menor huella en el piso.

4.1.2. Errores del GPS

Los errores de un GPS caen en dos grandes categorías: posicionamiento de fase-portadora y de red o control terrestre. Un posicionamiento fase-portadora diferencial tiene una precisión del orden de un centímetro y un posicionamiento de código diferencial da una precisión del orden de un metro. Las fuentes de error comunes son la geometría de los satélites (PDOP), el número de los mismos, las desviaciones orbitales, el multidireccionamiento de las señales, el modelado del centro de fase de la antena, la resolución, y factores atmosféricos, que pueden ser ionosféricos o troposféricos.

4.1.2.1. Retrasos atmosféricos

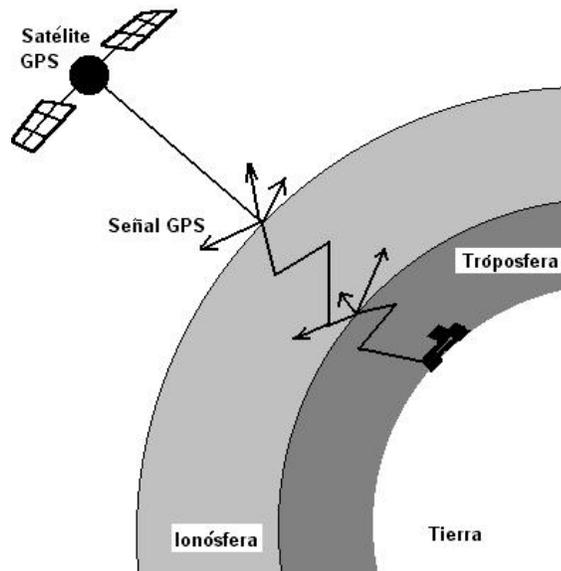


Figura 4.3. Capas atmosféricas que afectan la señal GPS.

Dado que GPS utiliza ondas de radio emitidas en el espacio y captadas por un receptor localizado en la superficie de la tierra, dichas ondas deben atravesar sucesivamente el vacío, la ionosfera y la troposfera. Las señales electromagnéticas viajan a una velocidad constante de 300,000 [km/s], pero eso es en el vacío, al pasar por algún otro medio sufren un pequeño retraso que, por pequeño que parezca, afecta los cálculos de la posición en un sistema GPS.

El principal problema se encuentra en la ionosfera, situada entre los 100 y los 1000 [km] de altura, en la que las moléculas de gas se encuentran ionizadas por acción de la radiación solar, liberando electrones en el proceso, estos electrones son los que retrasan las señales emitidas por los satélites GPS. Este problema se resuelve como sigue, los estudios sobre la ionosfera han concluido que el retraso que ésta produce sobre las ondas es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la señal, o sea que cuanto menor sea la frecuencia de las señales, (o mayor su longitud de onda), menor será el retraso que sufran; al emitir dos señales con frecuencias distintas es posible determinar con bastante exactitud, el desfase que han sufrido dos partes de dichas señales que teóricamente deberían haber llegado al mismo tiempo, y así, se calcula el retraso ionosférico. Esta es la razón de que existan dos frecuencias portadoras, las cuales recibieron el nombre de L1 y L2, y los receptores capaces de captarlas se les llama de "doble frecuencia".

Una vez atravesada la ionosfera, todavía queda la troposfera, en donde las mayores perturbaciones a las señales, son causadas por la variación de la temperatura y la presencia de vapor de agua, la primera tiene el 90% de efecto sobre el error troposférico, pero es sencillo obtener el gradiente térmico de la capa, por lo que no es gran complicación, por el contrario la última, que aporta el 10% del error, es altamente difícil de modelar y por tanto también difícil de corregir.

4.1.2.2. Dilución de la posición (DOP)

La precisión obtenida de un receptor GPS depende no solamente del número de satélites que se tengan a la vista, sino de la disposición geométrica que tengan éstos en el espacio. Debido a

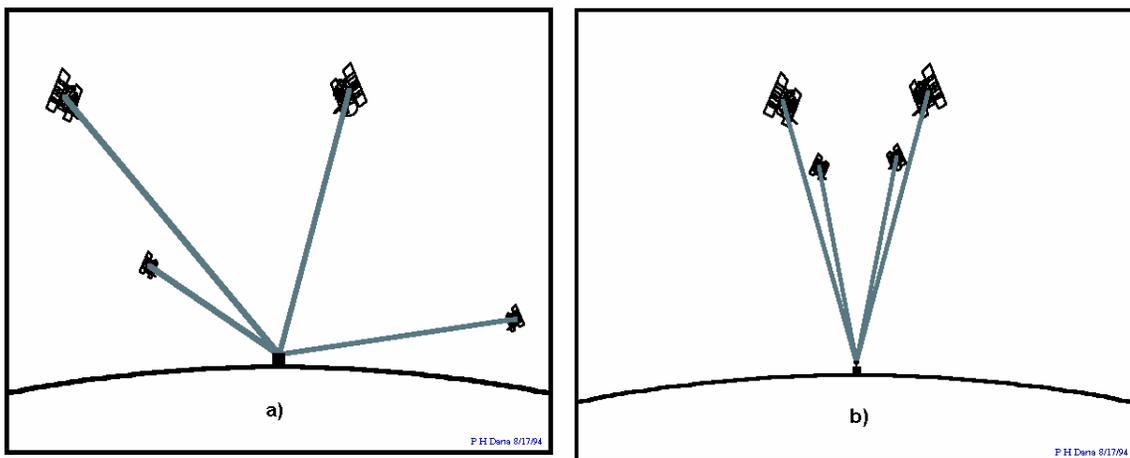


Fig 4.4. Dilución geográfica de la precisión. a) Buena distribución, b) Mala distribución.

la incertidumbre propia de las mediciones de distancia a los satélites, para cada uno de ellos se tiene una zona comprendida entre dos esferas concéntricas con una separación que es precisamente dicha incertidumbre, la cual, al intersectarse con la señal de otro satélite para realizar un posicionamiento, genera una nueva zona de incertidumbre que se vuelve más crítica cuanto más cerca están los satélites entre sí, lo anterior se observa mejor en la figura 4.4.

La Dilución geométrica de la posición (GDOP) es un valor adimensional representativo de la posición espacial de los satélites. El valor ideal es 1, y va creciendo según empeoren las condiciones de la posición de los satélites visibles, llegando a ser de 6 cuando no se debe tomar en cuenta la posición medida. Los receptores modernos cuentan con funciones que les permiten conocer la posición de todos los satélites visibles y escoger la combinación más adecuada para lograr el menor valor de GDOP posible, es recomendable el uso de receptores con varios canales para efectuar un rastreo simultáneo de varios satélites, con lo cual se reduce aun más este valor.

4.1.2.3. Disponibilidad selectiva y “anti-spoofing”

Mediante esta técnica, el Departamento de Defensa de EU intentó (y logró durante un tiempo) reservarse el derecho de lograr las mayores precisiones de GPS, introduciendo un error en las mediciones civiles, evitando una precisión menor de 100m.

Uno de los métodos es la Disponibilidad Selectiva (SA), y la limitación que introduce puede ser lograda de dos maneras. La primera es mediante la manipulación de los datos de las efemérides (método e) y la segunda, mediante la desestabilización de los relojes del satélite (método d) (Seeber, 1993), ambos afectan la medición de pseudodistancias. La SA fue utilizada por primera vez en Marzo de 1990, cuando se descubrió que la medición civil ofrecía casi tanta precisión como el servicio exclusivo militar. Fue en Mayo de 2000 que el presidente estadounidense Bill Clinton abolió su uso, mejorando casi 10 veces la precisión de todos los receptores civiles.

El “Anti-Spoofing” (AS) es un método de degradación de la señal que consiste en encriptar el código P, para transformarlo en el llamado código protegido Y (combinación del código P con otro secreto llamado W), de modo que solamente usuarios autorizados tienen acceso al código P cuando el AS se encuentra activado.

4.1.2.4. Otras fuentes de error

Aquí se pueden tomar en cuenta las imprecisiones de los relojes, tanto en los satélites (pequeña pero existente) como en los receptores, esta última puede eliminarse utilizando un cuarto satélite en el posicionamiento, las pequeñas imprecisiones de los satélites son monitoreadas y corregidas por el Departamento de Defensa de EU.

Otra fuente importante de error es el “multidireccionamiento” (*multipath*) que sufre la señal de GPS en su viaje hacia la Tierra, que no siempre es en línea recta sino que sufre una serie de rebotes en distintas capas atmosféricas y obstáculos que retrasan su llegada al receptor. Como la medición de distancia a un satélite se basa en el tiempo de viaje de la señal, cuando existe

multidireccionamiento el tiempo de viaje es mayor y se calcula una distancia al satélite mayor de la real.

Por último se tienen los errores existentes en las imprecisiones del modelo de Geoide utilizado, tanto en X-Y (latitud-longitud) como en altitudes. Un elipsoide es la forma más real de representar a la Tierra y para describirla matemáticamente se utilizan diversos modelos elipsoidales de revolución que difieren según la aplicación y la zona geográfica que se esté utilizando. Algunos modelos de elipsoide son el de Clarke 1866, GRS80 y WGS84. Como un ejemplo, con el modelo de Geoide GEOID99, uno de los utilizados en América, se tiene una precisión en la altitud de ± 5.2 cm a 5 km de distancia y de ± 6 cm a 100 km.

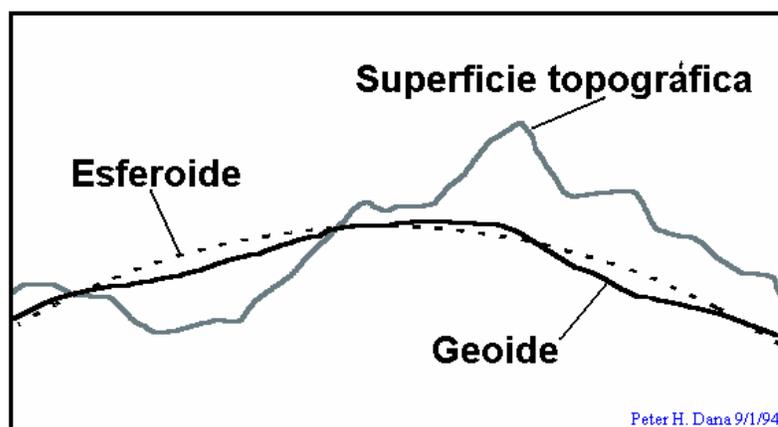


Figura 4.5. Comparación entre el geoide y el esferoide.

Para corregir las imprecisiones del geoide utilizado, existen una serie de redes de puntos de referencia. A éstas redes se les conoce como datum y a lo largo del tiempo se han venido desarrollando algunas de ellas en la medida que se ha contado con equipos de medición más precisos. Existe por ejemplo el NAD27 (North American Datum) 1927, el WGS84 (World Geodetic System 1984) y el ITRF (International Terrestrial Reference Framework), entre otros. Es muy importante, al generar un modelo de elevación a partir de datos LIDAR, saber que modelo de elipsoide y datum se está utilizando para evitar imprecisiones, ya que entre ellos puede haber diferencias de hasta 150m.

Es importante recordar que para casi cualquier fuente de error relacionada con GPS se cuenta con un método para detectarlo y eliminarlo o reducir su efecto al máximo, estos métodos incluyen aproximaciones estadísticas, revisión continua de los datos en tiempo real o en post-proceso, etc.

4.1.3. Errores del Sistema de Navegación Inercial (SNI)

Conocer la orientación exacta de cada pulso láser es una condición necesaria. Se requieren medidas precisas de rotación, cabeceo y guiñada (*roll, pitch, yaw*). En la práctica, el sistema inercial es montado firmemente al escáner, que a su vez va montado sobre una plataforma

estabilizada y la orientación de la misma es almacenada por una computadora para su proceso después del vuelo.

Existe una gran variedad de estos sistemas disponibles comercialmente para diversas aplicaciones, pero no todos cubren las especificaciones típicas de precio/desempeño en equipos LIDAR del orden de 0.005 [°] para cabeceo/rotación y de 0.008 [°] para alabeo, aunque algunos equipos alcanzan 0.0025 [°] de precisión en cabeceo/rotación. Un error angular de 0.005 [°] corresponde a un error de posición de 0.17 [m] en el suelo a 2 [km] de distancia, de 0.35 [m] a 4 [km] y de 0.52 [m] a 6 [km].

Existen contribuciones adicionales al error debido a la precisión finita en la medición del ángulo del escáner y la dinámica no lineal en el movimiento del espejo, aunque todos estos efectos no pueden ser eliminados del todo, si pueden ser minimizados con una correcta calibración del sistema antes del vuelo y con un modelado adecuado en post-procesamiento.

Algo que no hay que olvidar es que el error total de orientación no se deriva totalmente del sistema inercial, sino de la suma de los componentes del LIDAR, un equipo con un SNI perfecto que entregue orientación exacta de la plataforma estará desperdiciado si el escáner tiene una precisión de 0.5 [°] en la medición del ángulo del espejo. En general, cuando se trata de la precisión total que puede alcanzar un LIDAR, ésta no es responsabilidad exclusiva del SNI.

4.2. Precisión del escáner láser

Si observamos la fórmula que se utiliza para obtener la distancia:

$$R = c \frac{t}{2} [m] \quad \dots(4.1)$$

donde:

R	→	distancia a medir en [m]
c	→	3*10 ⁸ [m/s] (velocidad de la luz)
t	→	tiempo de vuelo del pulso (ida y vuelta)

a partir de ella podemos calcular la **resolución** de la medición de distancia, es decir, la mínima diferencia de distancia que podemos medir con el equipo:

$$\Delta R = c \frac{\Delta t}{2} [m] \quad \dots(4.2)$$

Esto significa que la unidad podrá, teóricamente, diferenciar entre dos objetos que estén separados mínimo por una distancia ΔR . Esto quiere decir que la resolución de la unidad láser está dada totalmente por el paso mínimo del reloj interno Δt . En la práctica este parámetro resulta ser de poca importancia, debido a que es suficientemente pequeño como para permitir medir la máxima distancia.

La **máxima distancia** que puede lograr medir una unidad láser depende también del reloj interno, este debe contar el tiempo de vuelo del pulso (incluso del último retorno) y procesarlo antes de que sea emitido el siguiente pulso, así la máxima distancia se calcula:

$$R_{\max} = \frac{1}{2} T_p c \quad \dots(4.3)$$

- donde R_{\max} → distancia máxima
 T_p → periodo de los pulsos láser
 c → $3 \cdot 10^8$ [m/s]

De igual importancia es la **precisión de la medición de distancia** en el sistema, y que se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_R \approx \frac{c}{2} t_{\text{rise}} \cdot \frac{1}{\sqrt{S/N}} \quad \dots(4.4)$$

- donde σ_R → precisión de la medición
 t_{rise} → tiempo de levantamiento de los pulsos
 S/N → relación señal/ruido de los pulsos

La relación señal/ruido, la cual gobierna la precisión del láser, depende de varios factores como la potencia de la señal recibida, frecuencia de medición, radiación de fondo, sensibilidad del detector (normalmente un fotodiodo tipo PIN o avalancha), ruido del optoamplificador, etc. Además algunos de los factores mencionados dependen de otros; la potencia de la señal recibida depende de la potencia transmitida, de la apertura de la óptica de recepción, distancia al objetivo, etc. La figura 4.6 muestra las relaciones entre los diferentes parámetros y su influencia sobre la relación S/N.

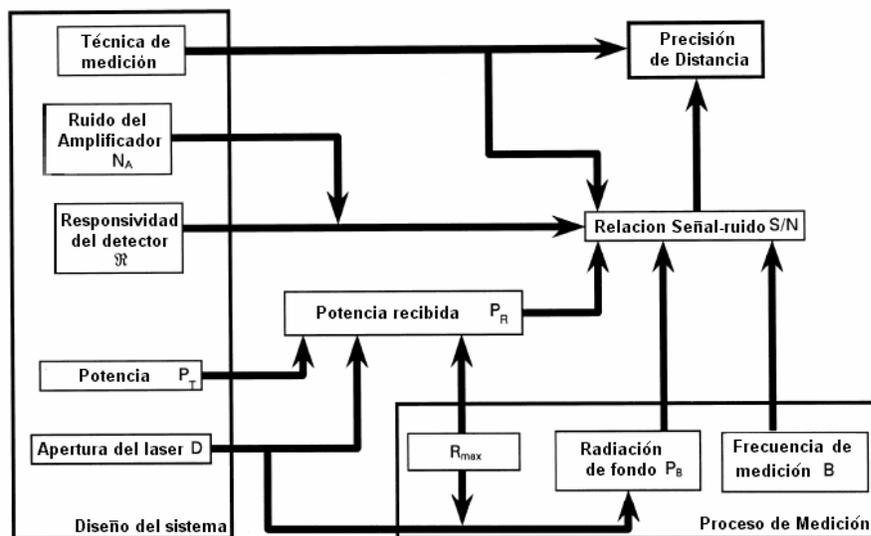


Figura 4.6. Relaciones entre parámetros e influencia sobre la relación S/N.

Si la potencia óptica de la señal recibida es tan baja que solo el ruido térmico contribuye al ruido total, la relación S/N puede ser simplificada a:

$$S/N = \frac{\text{Potencia de la señal del fotodiodo}}{\text{Potencia del ruido térmico del fotodiodo y del amplificador}}$$

En este caso, la raíz cuadrada de S/N es directamente proporcional a la potencia óptica recibida P_R . El ancho de banda de entrada del ruido, B, es inversamente proporcional al tiempo de levantamiento del pulso, por lo que la formula nos queda:

$$\sigma_R \approx \frac{c}{2} t_{rise} \frac{\sqrt{B}}{P_{Rpeak}} \quad \dots(4.5)$$

donde s_R → precisión de la medición
 t_{rise} → tiempo de levantamiento del pulso
 B → ancho de banda de entrada del ruido
 P_{Rpeak} → potencia recibida pico
 c → $3 \cdot 10^8$ [m/s]

En la mayoría de los sistemas telemétricos láser se utilizan diodos semiconductores para generar los pulsos, cubriendo la banda óptica entre los 800 y 1,600nm, como detectores son comunes los diodos PIN o tipo avalancha (APD, Avalanche PhotoDiode). La sensibilidad del detector es de vital importancia ya que bajo iguales condiciones un APD puede medir cuatro veces mas distancia que la que puede ser medida con un diodo PIN, alcanzando algunos hasta diez veces la distancia medida.

Como un escáner láser trabaja directamente con el principio de detección de energía, no es indispensable una fuente de luz altamente coherente, en cambio si son necesarias otras características de la luz láser como:

- Alta potencia. Para asegurar que los pulsos tendrán la energía suficiente para regresar al avión y ser detectados.
- Pulsos cortos. Que permiten el escaneo del suelo con altas frecuencias.
- Alto nivel de colimación. Lo que asegura que el láser golpea un punto pequeño en el suelo.
- Espectro óptico estrecho. Permite colocar un filtro óptico (normalmente 10nm de ancho de banda) en la apertura del sensor y eliminar la radiación solar reflejada por el suelo.

La selección de la longitud de onda del láser depende del diseño general del sistema y la aplicación, los detectores más sensibles están disponibles entre los 800 y 1,000 [nm], los primeros escáneres láser tenían una longitud de onda de 900 [nm] y estaban disponibles en el mercado lasers pulsados con una alta potencia lo cual aseguraba un desempeño óptimo; sin embargo, con esta longitud de onda la seguridad ocular era una preocupación. Cuando se requirió de mayor potencia se consideraron longitudes de onda en las que el ojo fuera menos sensible, actualmente se utilizan los 1,535 [nm], y aunque los detectores (APD de InGaAs) son menos sensibles en esta región, esto se compensa con el aumento de la potencia emitida.

Cuando se habla de la longitud de onda del láser se debe considerar también las propiedades de reflectividad del objetivo en el suelo, los fabricantes de escáneres por lo general proporcionan una tabla con un factor de corrección de la distancia máxima que puede medir el sistema en función de la reflectividad del objetivo.

Cuando el pulso golpea el suelo es necesario que tenga la menor área (huella) posible, para que la altura que reporte sea realmente representativa, entonces, la “huella” del láser es un parámetro que debe ser calculado, en él interviene la altura de vuelo y la divergencia del láser. En términos generales la huella se obtiene como la base menor de un trapecio, como se muestra en la figura 4.7 (a), en donde la huella se calcula como:

$$A_L = D + 2h \tan(\gamma / 2) \quad \dots(4.6)$$

- donde A_L → huella del láser
- D → apertura del escáner láser
- h → altura de vuelo
- γ → divergencia del rayo láser

Dado que la distancia D es muy pequeña (10 a 15cm) comparada con la huella A_L , se toma sólo un triángulo con base A_L (b) en donde la huella queda:

$$A_L = 2h \tan(\gamma / 2) \quad \dots(4.7)$$

y dado que γ es pequeño se tiene que:

$A_L = h\gamma$

... (4.8)

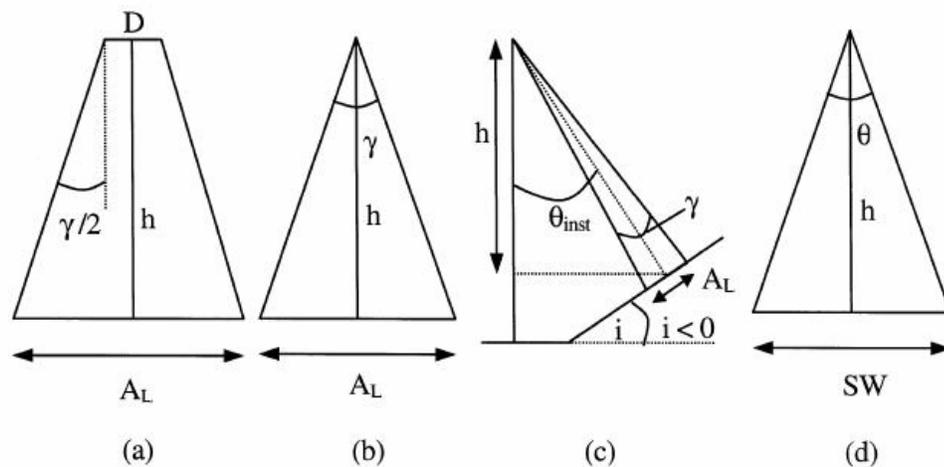


Figura 4.7. Huella del láser (A_L) y ancho de faja (SW).

la fórmula anterior es válida en el caso de que el láser no hiciera barrido, pero como se puede ver en la figura (c), al hacer el barrido o al incidir sobre terreno inclinado, la huella se proyecta sobre otro plano y se produce una deformación, la cual se calcula como sigue:

$$A_L = \frac{\left[\cos(\theta_{inst} + i) + \sin(\theta_{inst} + i) \tan\left(\theta_{inst} + i + \frac{\gamma}{2}\right) \right] \cdot 2h \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\cos\left(\theta_{inst} - \frac{\gamma}{2}\right)} \quad \dots(4.9)$$

donde θ_{inst} → ángulo instantáneo del espejo rotatorio
 i → ángulo de inclinación del terreno

Otro factor importante en el escáner láser, es el ancho de la línea de terreno explorado o ancho de faja de terreno (SW), que está en función de la altura y también relacionado con un triángulo (Figura 4.7 (d), éste se calcula de la siguiente manera:

$$SW = 2h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \dots(4.10)$$

4.3. Precisión del GPS

La precisión que puede alcanzar un sistema GPS, al trabajar en modo diferencial, depende de la calidad del postprocesamiento, de la propia circuitería y la antena del GPS, la disposición de la constelación al realizar el vuelo, número, distribución y distancia de las estaciones terrestres al avión (dentro de los 100km). Y no hay que olvidar que también se tienen que considerar el alineamiento entre el receptor GPS y el SNI y entre el SNI y el láser y otros factores que requieren de pruebas del equipo funcional.

Fuera de las pruebas que requiere un GPS trabajando junto con otros sistemas, el fabricante proporciona una tabla con las características generales y asegura la precisión de su sistema si se cubren ciertas características mínimas, como número de satélites visibles, condiciones atmosféricas, valores de DOP, etc.

4.4. Precisión del sistema inercial

Se puede conocer de manera muy precisa la distancia desde la apertura del láser hasta el punto en el suelo, así mismo se puede conocer con precisión de centímetros la latitud y longitud donde se encuentra dicha apertura, pero estos datos no sirven de nada si no se conoce la dirección del rayo láser y la orientación del avión al momento de emitir el pulso.

Para realizar esta tarea se han considerado varias opciones, algunas de muy bajo costo: una de ellas es un sistema inercial de determinación de la vertical, que proporciona la orientación en los ejes X,Y y que trabaja en conjunto a una brújula electrónica que proporciona el rumbo. Este sistema ha sido desarrollado en el Instituto de Geografía de la UNAM y ha sido utilizado para

controlar el apuntamiento de una plataforma aérea que mantiene la vertical con una precisión de $\pm 1^\circ$ en los tres ejes de rotación de la nave. Una de sus principales ventajas es que no presenta el problema de la deriva inherente a los sistemas inerciales, debido a que cuenta con dos acelerómetros que están continuamente proporcionando una referencia de la vertical local.

También se han tomado en cuenta para este proyecto conjuntos GPS-INS, uno de ellos de la compañía Novatel. Su principal característica es que los giróscopos presentan una deriva de 1 [°/hr]. Que no está nada mal para un sistema de bajo costo (20,000 Uscy). Los otros conjuntos de GPS y sistema inercial son de la empresa Applanix que tienen una deriva que va de 0.5 – 0.1 [°/hr], aunque sus costos varían de 90,000 a 197,000 Uscy., respectivamente.

4.5. Precisión total

La precisión de las coordenadas obtenidas en 3D, como ya se ha mencionado reiteradamente, depende de muchos factores, los más determinantes son las precisiones del láser, la posición del rayo, y de la dirección de éste. Normalmente los resultados se encuentran en el sistema WGS84 (que es el que maneja el GPS), así que también será de importancia la precisión de la transformación del sistema local de coordenadas al datum WGS84, incluyendo correcciones de las ondulaciones del Geoide, que pueden ser significativas con respecto al potencial de precisión del sistema. Por si esto no fuera poco, dado que la distancia, posición y dirección del rayo son medidos con diferentes sensores, cualquier error en la sincronización podría afectar los resultados finales.

En el terreno del láser, éste puede ser el dispositivo que menos contribuya a la pérdida de precisión si se usa y calibra adecuadamente, por ejemplo no tener vuelos demasiado bajos ni anchos de barrido pequeños. Una vez terminado el sistema, la precisión del láser depende mayormente de los siguientes factores:

- Habilidad de seleccionar la misma posición del pulso transmitido y recibido al medir el intervalo de tiempo, esto se ve afectado por el ruido, la potencia de la señal, la sensibilidad del detector y la duración y reproducibilidad del pulso transmitido. El principal factor de error aquí es el tiempo de levantamiento del pulso. Un pulso láser típico con duración de 10 [ns] tiene un tiempo de levantamiento de 1 [ns] (1[ns] corresponde aproximadamente a 30 [cm] de distancia), este tiempo depende de la longitud de onda y la resistencia de carga, sin embargo, un tiempo de levantamiento corto requiere baja resistencia de carga y la alta sensibilidad requiere lo contrario; de esta manera, el tiempo de levantamiento puede disminuirse, aumentando el ancho de banda del receptor, aunque esto también decrementa la relación S/N.
- La precisión con la cual son detectados los retrasos de tiempo, lo cual llama la atención sobre el control y estabilidad de la frecuencia de pulsación en donde cualquier desajuste puede conducir a errores sistemáticos.
- Resolución del contador de intervalos de tiempo, normalmente 0.1 [ns] (entre 0.05-0.2 [ns]) que corresponde a 1.5 [cm].

En menor medida, aunque también existentes, se encontrarían factores como la reflexión de luz al sensor, proveniente de la radiación de fondo (la cual se puede reducir con un filtro óptico), reflexión de una porción de la señal de regreso en el sensor mismo, atenuación de la potencia o dispersión de la luz por el paso a través de una ventana o espejo, y desviaciones causadas por prismas o ventanas irregulares (curvas) que pueden desenfocar al pulso.

Además del ruido térmico o de Johnson, la precisión se ve afectada por la amplitud de la señal recibida (que a su vez depende de la reflectividad del objetivo), y los múltiples ecos que degradan la potencia de la señal. En último término se tienen las condiciones atmosféricas, que si bien están presentes todo el tiempo, pueden ser bien compensadas.

La determinación de la precisión en la posición depende principalmente de la calidad del posprocesamiento GPS Diferencial, por lo general el fabricante tiene caracterizado su producto a una cierta precisión para ciertas condiciones óptimas, como número y distribución de satélites visibles, circuitos conectados, distribución y número de estaciones terrestres, así como distancia al avión (no más de 100 [km], típicamente 10 [km] lo más deseable).

En vuelo se tienen diversas causas de desviación de la nave, por lo que es necesario calcular que tanto se deforma la huella del láser al incidir sobre el suelo (para el siguiente cálculo se toma en cuenta una superficie plana):

Alrededor del eje x se tiene:

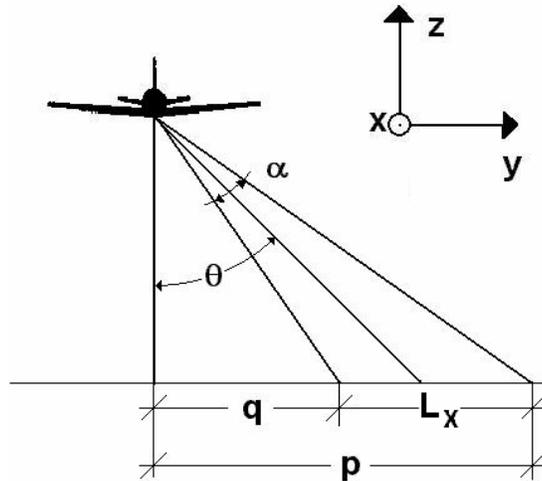


Figura 4.8. Errores alrededor del eje x.

De los triángulos menor y mayor:

$$p = h \tan\left(\theta + \frac{\alpha}{2}\right) \quad \dots(4.11)$$

$$q = h \tan\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right)$$

sacando la diferencia nos queda la huella (eje mayor de una elipse deformada):

$$L_x = p - q \quad \dots(4.12)$$

sustituyendo:

$$L_x = h \left[\tan\left(\theta + \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \quad \dots(4.13)$$

- donde L_x → huella del láser perpendicular a la dirección de vuelo en [m]
 h → altura del vuelo en [m]
 θ → ángulo del espejo rotatorio del láser
 α → divergencia del láser

Si se toma en cuenta el error de la plataforma en el eje de barrido (e_p) y el error del escáner láser (e_L), entonces el máximo error (e_T) se tiene al sumar todos los errores:

$$e_T = e_p + e_L \quad \dots(4.14)$$

$$L_{xMAX} = h \left[\tan\left(\theta_{MAX} + e_T + \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta_{MAX} + e_T - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \quad \dots(4.15)$$

Mientras que alrededor del eje y se tiene:

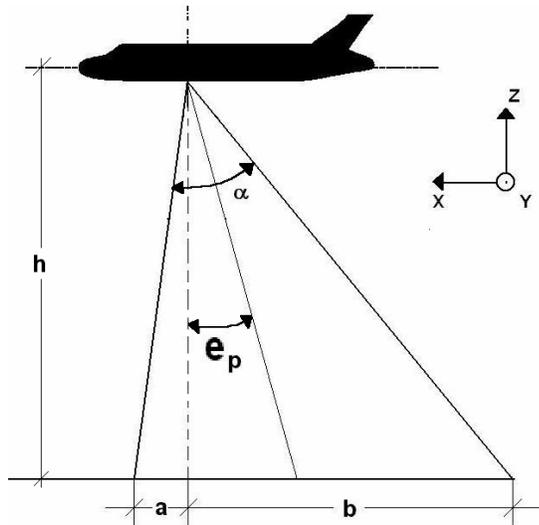


Figura 4.9. Errores alrededor del eje y.

Obteniendo las bases de los triángulos:

$$a = h \tan\left(e_p - \frac{\alpha}{2}\right) \quad b = h \tan\left(e_p + \frac{\alpha}{2}\right) \quad \dots(4.16)$$

$$L_y = b - a \quad \dots(4.17)$$

$$L_y = h \left[\tan \left(e_p + \frac{\alpha}{2} \right) - \tan \left(e_p - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad \dots(4.18)$$

Lo anterior nos dice que el punto de interés está situado dentro de una elipse (un tanto deformada) con eje mayor L_x y eje menor L_y . Por último se toma el efecto del movimiento de rotación alrededor del eje z en el plano x-y.

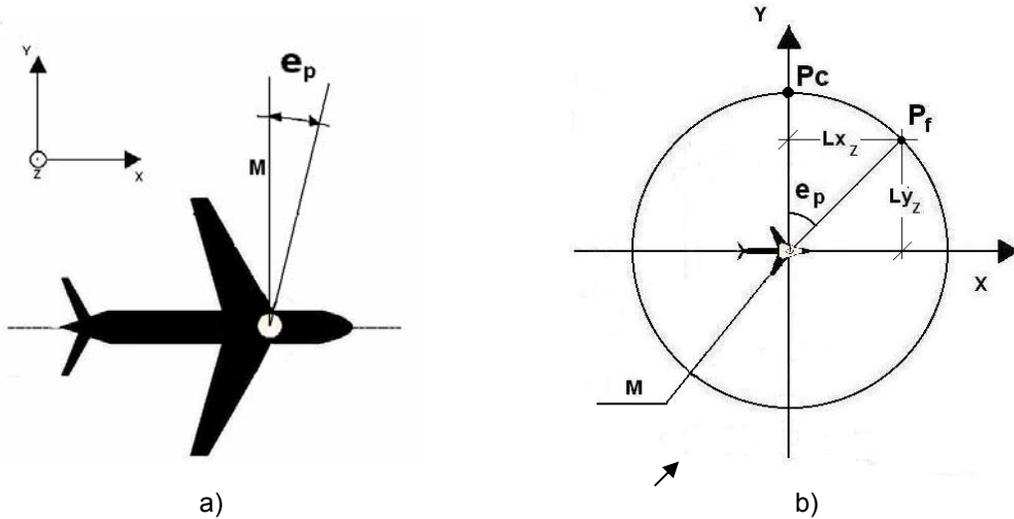


Figura 4.10. Error en el plano z: a) Rotación que sufre la nave. b) Detalle del error.

El error proyectado en los ejes se calcula de la siguiente manera:

$$L_{x_z} = M \cos e_p \quad \dots(4.19)$$

$$L_{y_z} = M \sin e_p \quad \dots(4.20)$$

- donde L_{x_z} → error de posición en el eje x debido a la rotación del vehículo
- L_{y_z} → error de posición en el eje y debido a la rotación del vehículo
- M → proyección del rayo láser sobre el suelo (para el máximo error se toma la máxima distancia, que es con el ángulo de escaneo mayor θ_{max}).

Dado que el ángulo e_p en general es muy pequeño, el análisis anterior demuestra que la mayor contribución al error en la posición, de parte del escáner es L_{x_z} .

Enseguida se presenta un ejemplo de cómo calcular la precisión en un sistema en particular y después se presenta una tabla con los datos obtenidos para todos los sistemas considerados.

4.6. Ejemplo de cálculo de la precisión de un sistema LIDAR

Para el cálculo de la precisión total, es necesario tomar en cuenta la contribución del error de cada elemento, es decir, del escáner láser, del GPS y del sistema de orientación inercial.

Como se demostró en la sección anterior, la peor situación o la mayor contribución al error debido a la divergencia y al error de apuntamiento del láser, se tiene en L_{XZ} (huella del láser) y que se obtiene a partir de la expresión:

$$L_{XMAX} = h \left[\tan\left(\theta_{MAX} + e_T + \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta_{MAX} + e_T - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \quad \dots(4.21)$$

Para este ejemplo vamos a tomar en cuenta los datos del sistema LIDAR opción 1, en donde utilizamos el láser LMS- Q240 y el sistema inercial desarrollado en el Instituto de Geografía de la UNAM. Se considerará una altura de vuelo de 300 m.

De los datos de los equipos tenemos:

- $h = 300\text{m}$
- $\theta_{MAX} = 30^\circ$
- Resolución angular del láser = $0.005 [^\circ]$ (o error de apuntamiento del láser)
- Resolución angular del sistema inercial = $1 [^\circ]$
- $e_T = \text{error del láser} + \text{error del sistema inercial} = 0.005^\circ + 1^\circ = 1.005 [^\circ]$
- $\alpha = \text{divergencia del rayo láser} = 3 \text{ mrad} = 0.17 [^\circ]$

sustituyendo:

$$L_{XMAX} = 300 \left[\tan\left(30 + 1.005 + \frac{0.17}{2}\right) - \tan\left(30 + 1.005 - \frac{0.17}{2}\right) \right] \quad \dots(4.22)$$

lo cual queda:

$$L_{XMAX} = 300 [\tan(31.09) - \tan(30.92)] = 300(0.6030 - 0.5989) = 300(0.0041) = 1.23\text{m} \quad \dots(4.23)$$

Existe una relación directa entre el error debido a la divergencia y el apuntamiento del láser y la altura de vuelo y el ángulo de barrido máximo, dicha relación la podemos escribir a partir de la ecuación anterior como:

$$L_{XMAX} = h * w; \quad \dots(4.24)$$

donde

$$w = \tan\left(\theta_{MAX} + e_T + \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta_{MAX} + e_T - \frac{\alpha}{2}\right) \quad \dots(4.25)$$

Como se puede ver, el error del escáner máximo en horizontal, depende de dos factores: h y w . Si se mantiene constante uno de ellos y se varia el otro, se puede obtener una gráfica del comportamiento del error ante dicho factor variable. Dejando $w = 0.0041$ (el valor del ejemplo anterior) se obtiene la curva mostrada a continuación, donde fácilmente podemos apreciar la relación lineal que existe entre la altura y el error horizontal.

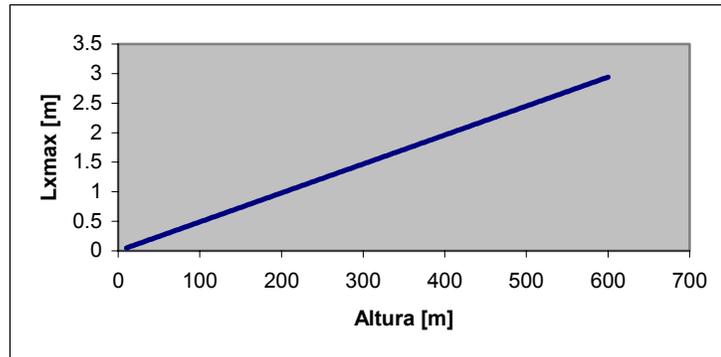


Figura 4.11. Relación entre la altura de vuelo y la huella del láser.

Ahora bien, dejando $h = 300$, $e_T = 1.005^\circ$, $\alpha = 0.17^\circ$ y variando el ángulo de barrido, se tiene la siguiente curva:

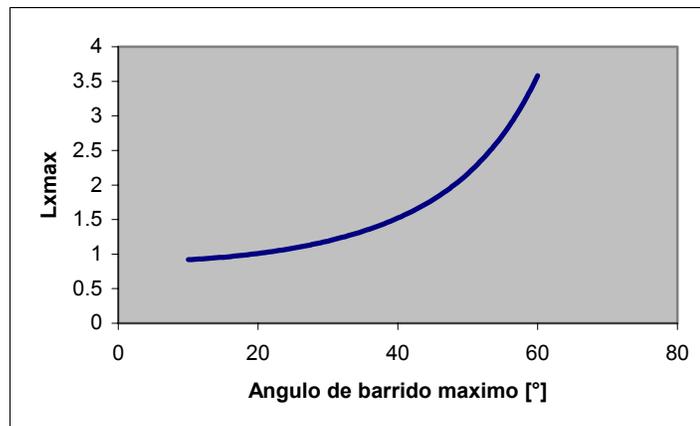


Figura 4.12. Relación entre el ángulo de barrido máximo y la huella del láser.

Ahora dejando los siguientes valores constantes $h = 300$, $e_T = 1.005^\circ$, $t_{MAX} = 30^\circ$ y variando la divergencia del láser se obtiene la curva de la figura 4.13, donde se aprecia la relación lineal entre la divergencia y el error horizontal.

De las gráficas anteriores, se observa que entre más alto se vuele, mayor será la huella, en cuanto al ángulo de barrido, no es conveniente que éste tenga un valor mayor de 40° , porque el error aumenta demasiado después de esta zona. La divergencia es un factor importante a considerar en un sistema LIDAR. En la gráfica de la figura 4.13, se puede apreciar fácilmente que cuando aumenta la divergencia, el error también lo hace.

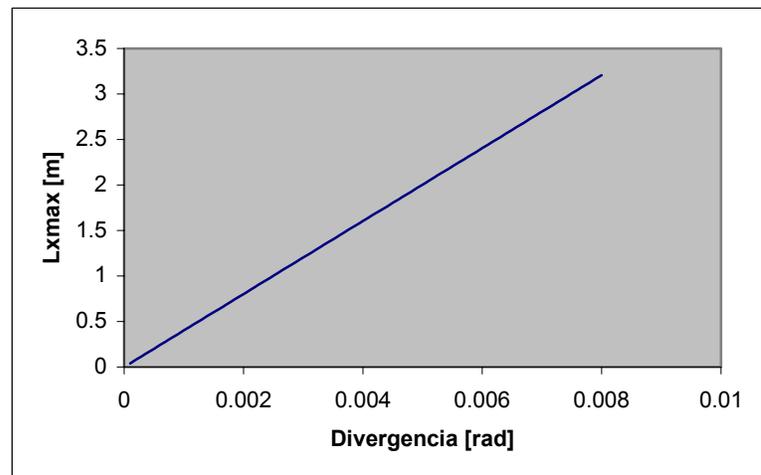


Figura 4.13. Relación entre la divergencia y la huella del láser.

No obstante los parámetros considerados en el cálculo del error de los sistemas LIDAR, el factor determinante de la precisión final, es el SNI. El principal problema de estos sistemas es la deriva, lo que significa que la precisión en las mediciones se va degradando conforme va pasando el tiempo. A este error, también hay que añadir el del sistema GPS, que puede ser del orden de tan solo unos cuantos centímetros, cuando se utiliza en modo diferencial.

Para el ejemplo que hemos manejado, se tiene que el error del sistema inercial es de $1 [^\circ]$. Para una altura de $300 [m]$ se tiene:

$$e_{SNI} = h \cdot \tan e_{\theta} \quad \dots(4.26)$$

en donde e_{SNI} es el error del SNI horizontal, h es la altura de vuelo y e_{θ} es el error de orientación del SNI. Sustituyendo en la fórmula se tiene:

$$e_{SNI} = 300 \cdot \tan(1^\circ) = 5.23m \quad \dots(4.27)$$

Esto quiere decir que el SNI tiene un error en horizontal de $5.23 [m]$ en el peor de los casos. Si se deja constante la altura de vuelo y se varía el error de orientación, se puede obtener la gráfica de la variación del error en el apuntamiento del SNI:

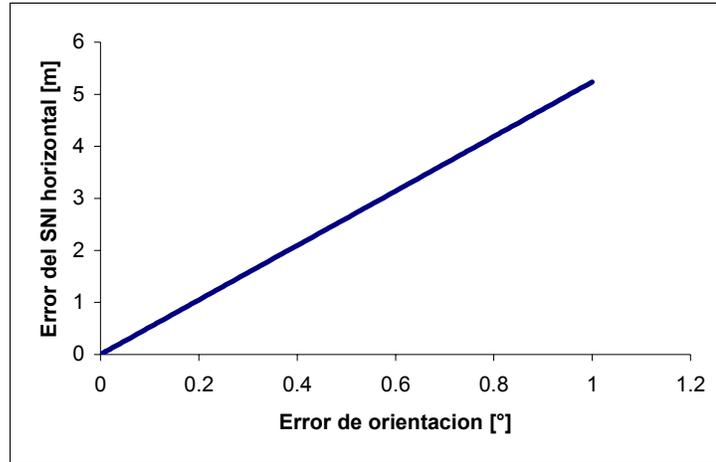


Figura 4.14. Variación del e_{SNI} con respecto al e_{θ} , a una altura de 300 [m]. Se aprecia claramente la influencia de la precisión del SNI, en el error del sistema.

Para el sistema GPS se tienen valores nominales de error dependiendo del modo en que se trabaje, en modo diferencial para este ejemplo se tiene un error (e_{GPS}) de 0.45 [m].

Es muy importante recalcar que no obstante algunos errores llegan a ser muy grandes, la precisión final puede ser mucho mejor de lo esperado, debido a que algunos errores sistemáticos pueden ser parcialmente eliminados entre sí. Como ejemplo podemos mencionar que los errores del GPS pueden, dependiendo del signo del error, compensarse con alguna desviación del detector o errores de integración del mismo. En el siguiente capítulo se aborda con un poco de mayor amplitud este tema.

Cuando se determina el efecto total de errores aleatorios, lo que se debe obtener es el valor cuadrático medio de la suma de los errores. Esto queda como:

$$e_T = \sqrt{Lxz^2 + e_{SNI}^2 + e_{GPS}^2} \quad \dots(4.28)$$

para este ejemplo se tiene:

$$e_T = \sqrt{(1.23)^2 + (5.23)^2 + (0.45)^2} \approx 5.39m \quad \dots(4.29)$$

Lo cual nos da la precisión teórica que se espera del sistema LIDAR 1. En las siguientes tablas se presentan de manera resumida los cálculos de precisión para los diferentes sistemas, en un tiempo $t = 0$ y la deriva después de una y dos horas de operación para diferentes alturas.

	Láser	GPS	SNI	Lxmáx [m]	Precisión GPS [m]	Deriva SNI [°/h]	Precisión SNI [°]	Precisión Total t=0 [m]	Precisión Total 1 hr [m]	Precisión Total 2 hrs[m]
1	Q140	G2	IGeograf	1.23	0.45	0.1	1.0	5.39	5.41	5.49
2	Q280	G2	IGeograf	0.28	0.45	0.1	1.0	5.26	5.28	5.36
3	Q140	Novatel BDS		1.20	0.02	1.0	0.02	1.20	5.36	10.53
4	Q280	Novatel BDS		0.28	0.02	1.0	0.02	0.29	5.34	10.47
5	Q140	Pos AV - 310		1.20	0.05	0.5	0.03	1.21	2.87	5.36
6	Q140	Pos AV - 410		1.20	0.05	0.5	0.02	1.20	2.87	5.36
7	Q140	Pos AV - 510		1.20	0.05	0.1	0.01	1.20	1.30	1.59
8	Q280	Pos AV - 310		0.28	0.05	0.5	0.03	0.32	2.63	5.24
9	Q280	Pos AV - 410		0.28	0.05	0.5	0.02	0.30	2.62	5.24
10	Q280	Pos AV - 510		0.28	0.05	0.1	0.01	0.28	0.59	1.08

Tabla 4.1. Precisión obtenida a 300 [m] de altura con las diferentes opciones.

	Láser	GPS	SNI	Lxmáx [m]	Precisión GPS [m]	Deriva SNI [°/h]	Precisión SNI [°]	Precisión Total t=0 [m]	Precisión Total 1 hr [m]	Precisión Total 2 hrs[m]
1	Q140	G2	IGeograf	2.46	0.45	0.1	1	10.76	10.81	10.96
2	Q280	G2	IGeograf	0.56	0.45	0.1	1	10.42	10.47	10.62
3	Q140	Novatel BDS		1.2	0.02	1	0.02	1.21	10.52	20.98
4	Q280	Novatel BDS		0.56	0.02	1	0.02	0.59	10.47	20.59
5	Q140	Pos AV - 310		2.40	0.05	0.5	0.03	2.42	5.76	10.74
6	Q140	Pos AV - 410		2.40	0.05	0.5	0.02	2.41	5.75	10.67
7	Q140	Pos AV - 510		2.40	0.05	0.1	0.01	2.40	2.61	3.18
8	Q280	Pos AV - 310		0.56	0.05	0.5	0.03	0.64	5.26	10.48
9	Q280	Pos AV - 410		0.56	0.05	0.5	0.02	0.60	5.26	10.48
10	Q280	Pos AV - 510		0.56	0.05	0.1	0.01	0.57	1.18	2.17

Tabla 4.2. Precisión obtenida a 600 [m] de altura

	Láser	GPS	SNI	Lxmáx [m]	Precisión GPS [m]	Deriva SNI [°/h]	Precisión SNI [°]	Precisión Total t=0 [m]	Precisión Total 1 hr [m]	Precisión Total 2 hrs[m]
1	Q140	G2	IGeograf	-	-	-	-	-	-	-
2	Q280	G2	IGeograf	1.12	0.45	0.1	1	20.97	21.07	21.38
3	Q140	Novatel BDS		-	-	-	-	-	-	-
4	Q280	Novatel BDS		1.12	0.02	1.0	0.02	1.20	20.98	41.92
5	Q140	Pos AV - 310		-	-	-	-	-	-	-
6	Q140	Pos AV - 410		-	-	-	-	-	-	-
7	Q140	Pos AV - 510		-	-	-	-	-	-	-
8	Q280	Pos AV - 310		1.12	0.05	0.5	0.03	1.28	10.54	20.97
9	Q280	Pos AV - 410		1.12	0.05	0.5	0.02	1.20	10.54	20.97
10	Q280	Pos AV - 510		1.12	0.05	0.1	0.01	1.14	2.38	4.34

Tabla 4.3. Precisión obtenida a 1,200 [m] de altura

Con los resultados obtenidos en las tablas se puede hacer una gráfica como la mostrada abajo.

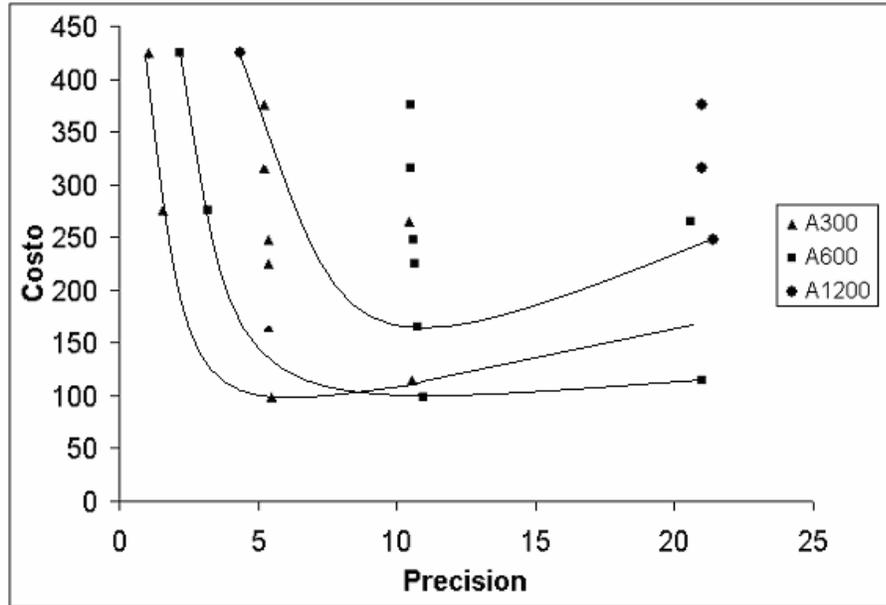


Fig. 4.14. Gráfica Costo vs. Precisión a diferentes alturas de vuelo en t=0.

El primer resultado interesante que salta a la vista de la gráfica anterior, es el hecho de tener algunos sistemas, con diferentes costos y que proporcionan la misma precisión. Esto resulta un poco contradictorio si pensamos que, en general, un sistema cualquiera nos proporcionará mejor precisión a mayor costo. La explicación a todo esto nos la da la deriva de los sistemas inerciales involucrados y el hecho de que la divergencia del láser no influye de manera significativa en el resultado total de la precisión. Por esta razón, aún los sistemas con el láser de mayor costo (LMS-Q280) no necesariamente proporcionan mejor precisión. En la última columna de la tabla 4.2 que corresponde a una altura de vuelo de 600 [m] , entre los sistemas 5 y 9 existe una diferencia de precio de 230 mil dólares, lo que equivale al 234%, mientras que la diferencia en la precisión es de 26 cm, lo que equivale al 2.5 %. Así de contradictorios han llegado a ser los resultados de este análisis, lo que nos indica que debemos ser bastante cautelosos a la hora de seleccionar el sistema más adecuado.

En el siguiente capítulo vamos a tomar en cuenta una serie de consideraciones de tipo práctico, cuando se utilizan este tipo de sistemas y como veremos, es posible obtener mejores valores de precisión en los modelos digitales de elevación generados.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se hace un resumen del análisis de los esquemas de diseño considerados para este trabajo de tesis y se presentan las diferentes resoluciones que se obtienen en cada caso. También se hace un comparativo de costos y precisión contra sistemas comerciales. Se discute la necesidad de incluir una plataforma estabilizada, que definitivamente mejora el funcionamiento del sistema, ya que restringe el movimiento del barredor láser dentro de un intervalo de estabilización de $\pm 1^\circ$, sin provocar un aumento significativo en la complejidad del sistema ya que el mismo juego de sensores inerciales puede usarse con el doble propósito de determinar la orientación y el de estabilizar la plataforma. Se hacen las consideraciones finales para aumentar la precisión total del sistema y se dan las conclusiones y las recomendaciones para continuar con el desarrollo de un sistema LIDAR de bajo costo para obtención de modelos digitales de elevación.

5.1. RESULTADOS

Diez sistemas LIDAR en total, con diferentes tipos de barredores láser, equipos de orientación inerciales y receptores GPS fueron analizados de manera detallada para su posible implementación. Para el análisis final, vamos a considerar una altura de vuelo de 600 metros, para todos los sistemas involucrados, inclusive los de tipo comercial.

	Láser	GPS	SNI	COSTO miles de (USD)	Deriva SNI [°/h]	Precisión inicial total t=0 [m]
1	Q140	G2	IGeograf	89	0.1	10.76
2	Q280	G2	IGeograf	239	0.1	10.42
3	Q140	Novatel BDS		1.2	1	1.21
4	Q280	Novatel BDS		0.56	1	0.59
5	Q140	Pos AV - 310		2.40	0.5	2.42
6	Q140	Pos AV - 410		2.40	0.5	2.41
7	Q140	Pos AV - 510		2.40	0.1	2.40
8	Q280	Pos AV - 310		0.56	0.5	0.64
9	Q280	Pos AV - 410		0.56	0.5	0.60
10	Q280	Pos AV - 510		0.56	0.1	0.57

Tabla 5.1. Los diez sistemas analizados y la precisión obtenida a 600 [m] de altura.

Los dos primeros utilizan el sistema de referencia de la vertical desarrollado en el Instituto de Geografía de la UNAM y una brújula electrónica, como sistema de orientación inercial, además de un receptor GPS Propack de la compañía Novatel. Aunque los datos de GPS se actualizan 20 veces cada segundo, tiene la desventaja de que los ángulos de orientación se obtienen a una tasa de 12 [Hz], siendo necesaria una gran cantidad de interpolaciones para que los datos sean compatibles con las mediciones de alturas que se obtienen del barredor láser. Su ventaja es que no presenta deriva y que tiene ya instalada la función de estabilizar una plataforma. Las opciones 3 y 4 incluyen un conjunto integrado de GPS y SNI (Novatel), proveen una actualización de 100 veces por segundo, tanto en la posición geográfica, como en los tres ejes de orientación, esto presupone la eliminación de problemas de sincronización entre ellos y presenta una deriva relativamente pequeña para un sistema inercial de bajo costo: 1 [°/hr]; aunque como vimos en las tablas de precisión del capítulo anterior, esto representa un error considerable después de una hora de funcionamiento y se continúa acumulando con el tiempo. Los sistemas 5,6 y 7 utilizan el barredor láser Q140 con tres variantes de sistemas inerciales combinados con GPS, la diferencia entre éstos últimos es la deriva en el SNI, así como la precisión que entregan y el costo. Con los sistemas 8,9 y 10 se utiliza el láser Q280 que tiene mejores características de desempeño y también se emplean los mismos sistemas inerciales del conjunto anterior.

Más adelante se presenta una tabla comparativa de todos los sistemas, considerando siempre la inclusión de una plataforma estabilizada.

5.1.1. Plataforma estabilizada

Una discusión muy interesante surgió durante el desarrollo de este trabajo de tesis, y fue sobre la inclusión o no de una plataforma estabilizada, que tuviera la capacidad de mantener apuntando al barredor láser de una manera consistente durante la realización de los levantamientos aéreos. El análisis demuestra que el error se reduce con su empleo y la complejidad del sistema no se ve aumentada significativamente, aunque el costo si puede incrementarse dependiendo del tipo de plataforma que se utilice.

5.1.2. Localización de la antena del GPS

Es muy importante tener en consideración que las coordenadas geográficas que se obtienen de un punto específico, mediante el sistema de posicionamiento global, es aquel localizado precisamente donde se encuentra la antena del receptor GPS. En muchas ocasiones debe colocarse en un lugar lejos del barredor, para que pueda recibir las señales de los satélites adecuadamente. Debe tomarse en cuenta este desplazamiento, y tomas mediciones precisas de su localización exacta de la cabeza del barredor.

5.1.3. Comparación de los diez sistemas considerados

En la siguiente tabla se presenta de manera resumida la información necesaria, para poder tomar una decisión sobre el sistema que debe implementarse. Las ventajas y desventajas que tiene cada uno de ellos se pueden apreciar fácilmente.

	Láser	GPS	SNI	COSTO Miles de (USD)	Deriva SNI [°/h]	Precisión Total t=0 [m]	Precisión Total 1 hr [m]	Precisión Total 2 hrs[m]
1	Q140	G2	IGeograf	89	0.1	10.76	10.81	10.96
2	Q280	G2	IGeograf	239	0.1	10.42	10.47	10.62
3	Q140	Novatel BDS		101	1	1.21	10.52	20.98
4	Q280	Novatel BDS		271	1	0.59	10.47	20.59
5	Q140	Pos AV - 310		171	0.5	2.42	5.76	10.74
6	Q140	Pos AV - 410		251	0.5	2.41	5.75	10.67
7	Q140	Pos AV - 510		278	0.1	2.40	2.61	3.18
8	Q280	Pos AV - 310		321	0.5	0.64	5.26	10.48
9	Q280	Pos AV - 410		401	0.5	0.60	5.26	10.48
10	Q280	Pos AV - 510		428	0.1	0.57	1.18	2.17

Tabla 5.2. Características de costo y precisión en los diez diseños propuestos. La precisión que se maneja, es aquella que se obtiene a 600 [m] de altura.

Podemos ver rápidamente que el sistema **10** tiene la mejor precisión a un costo de 428 mil dólares y el que le sigue en precisión (sistema no. **7** @ 3.18 [m]) tiene un costo de 278 mil dólares. Los sistemas **8** y **9** al igual que el **5** y **6** quedan descartados para su implementación ya que tienen un alto costo, para la precisión que manejan. Las opciones **3** y **4** definitivamente presentan muy baja precisión y entre los sistemas **1** y **2**, podemos fácilmente descartar a éste último debido a su costo tan alto, que es de 239 mil dólares.

Se plantean como alternativas viables para implementar un sistema LIDAR de bajo costo las opciones **1**, **7** y **10**. Aunque la primera tiene un error apreciable, comparada con las últimas dos, su costo es el más bajo y con el empleo de algunas técnicas, es posible disminuir el error, como lo veremos un poco más adelante.

No obstante, el aspecto necesariamente más importante que debe ponderarse con más detenimiento para obtener una decisión final, es la resolución, sin embargo, la mayoría de las veces el aspecto económico es quien termina imponiéndose.

5.1.4. Discusión sobre la precisión

Para obtener la mejor precisión posible con un sistema LIDAR dado, es necesario tomar en cuenta diversos factores antes, durante y después del vuelo. A grandes rasgos se tienen tres fuentes de información principales para mejorar la precisión de la información a saber: calibración *a priori*, información redundante del láser e información externa.

5.1.4.1. Calibración a priori. Deben ser detectados y eliminados en la medida de lo posible los errores sistemáticos en los sensores (láser, SNI y GPS), como son la sincronización y posición relativa, es necesario modelar adecuadamente cada error para reducirlo lo más posible.

5.1.4.2. Información redundante del láser. La información redundante se obtiene al traslapar las líneas de vuelo y obtener dos datos diferentes para un mismo punto en tierra, los cuales al ser comparados, indican una diferencia. Esta se aplica a todos los puntos y se mejora el resultado.

5.1.4.3. Información externa. Se forma con los puntos de control de altura y posición en tierra, estos puntos normalmente se pueden consultar en cartas topográficas o con puntos bien conocidos obtenidos mediante GPS de alta resolución. Esta información externa ayuda a corregir errores. Si la resolución lo permite, pueden utilizarse las esquinas de los edificios para calibrar en horizontal el LIDAR. También pueden usarse bases de datos topográficas anteriores y contar con una serie de parámetros como: potencia de la señal, altura de vuelo, vegetación, tipo y desnivel del terreno, e información del tipo de filtro usado para remover objetos no deseados, de esta manera se puedan modelar los errores y minimizarlos. Las bases de datos de SIG (Sistemas de Información Geográfica) pueden ayudar para que los datos del LIDAR mejoren su posición. La calidad de la integración depende en gran medida de que tan bien se refieren las mismas coordenadas en diferentes bases de datos, al mismo punto en el terreno.

Sin duda la precisión teórica ha de ser corroborada en vuelo tomando en cuenta todos los puntos descritos antes y estableciendo la precisión propia del terreno, la cual será única para dicha superficie.

5.1.4.4. Estimación de precisión por comparación con sistemas comerciales

Apegados a los argumentos presentados por diversos integradores de equipos LIDAR, de cómo mejorar la precisión total del sistema y que fueron descritos en el párrafo anterior, y con la finalidad de hacer una estimación más realista de la precisión que se puede obtener con los sistemas LIDAR propuestos en este trabajo de tesis, se integró la tabla 5.3

Se tomaron en cuenta los datos de diferentes equipos, considerando como los parámetros de mayor importancia: la divergencia del láser (y su huella asociada), la precisión horizontal, la precisión en la orientación del SNI y su deriva. Que como vimos en el análisis, son los factores que afectan en mayor medida la precisión final. En la tabla comparativa, se han incluido

diferentes sistemas, tanto aquellos que presentan mejores características de desempeño, como aquellos que tienen cierta similitud a aquellos tres propuestos como viables en este proyecto. Por supuesto que existen muchas otras opciones de sistemas que también fueron analizados. Esta tabla nos permitió, por comparación de los parámetros antes mencionados, hacer una estimación del mejoramiento en la precisión que es posible obtener después del post-proceso de la información.

De la información que es posible obtener de los fabricantes, la más incierta es aquella que se refiere a la precisión. Algunas firmas solamente especifican la precisión, sin separar la referente a las distancias medidas por el láser o la planimétrica y como hemos visto, son muy distintas. Tampoco mencionan las condiciones bajo las cuales sus datos son válidos (altura de vuelo, ángulo de barrido, rugosidad del terreno, inclinación, etc.). El hecho es que las pruebas objetivas de precisión en estos sistemas, son muy pocas las que se han publicado y debemos considerar que los valores que presentan, son siempre óptimos. No obstante, algunos autores efectuaron algunas pruebas de precisión de algunos sistemas de manera independiente, lo que le dio validez a los datos presentados en la tabla 5.3. (Hoss, 1997; Kraus and Pfeifer, 1998 y Murakami et. al. 1999).

La programación es un componente tan importante como lo son los equipos, y puede hacer que un sistema sea mejor que otro. Su importancia radica en el hecho de producir información útil y de alta calidad, a partir de una cantidad inmensa de datos crudos. Existen algunos paquetes comerciales que se usan particularmente en las primeras etapas del procesamiento, sin embargo, cuando se deben abordar las tareas más especializadas y difíciles, como el filtrado de objetos del terreno, la separación y la clasificación; las compañías utilizan paquetes hechos a la medida, la mayoría de las veces desarrollados por ellos mismos y que se sospecha, involucran una gran cantidad de trabajo de edición manual.

Sistema	Divergencia del láser [mrad]	Huella del Láser [m]	Precisión horizontal [m]	SNI	Precisión en la orientación X,Y,Z [°]	COSTO Miles de USD
SAAB TopEye	1	0.60	0.10	H-764, Honeywell	0.02/0.03	1,500
ALTM 1025	0.3	0.18	0.60	LTN-90, applanix	0.02/0.03	795
TOPOSys I	0.5	0.30	0.30	H-764 G, Honeywell	0.01/0.02	ND
LIDAR 10	0.5	0.30	0.30	POS-AV 510	0.008/0.07	428
ScaLARS	2	1.20	0.85	Litton LN-200	0.017/0.05	ND
LIDAR 7	3	1.80	0.60	POS-AV 510	0.008/0.07	278
SURVAIR	1	0.60	0.60	GPS interferométrico	0.5/0.2	ND
ATLAS-VL	2.5	1.50	3	Sistema de referencia de la vertical.	ND	ND
Larsen 500	4	2.4	5	Litton Laser Gyros	0.05/0.05	ND
FLI-MAP I	2	1.20	0.15 (*)	Sistema de referencia de la vertical.	0.1/0.15	ND
LIDAR 1	3	1.80	4	Sistema de determinación de la vertical	1	89

(*) Se considera que este dato de precisión horizontal no es correcto, debido al tipo de sistema de medición inercial utilizado y a la divergencia del láser.

Tabla 5.3. Comparación de los sistemas considerados en los diseños finales vs equipos comerciales. Todo a 600 [m] de altura.

Existe también un conocimiento muy reducido acerca de los métodos de calibración de los sistemas LIDAR. Y este aspecto determina de manera contundente, la precisión geométrica del sistema y es aquí donde la experiencia de una u otra compañía hace la diferencia. El hecho es que no existen estándares de cómo deben de llevarse a cabo estos procedimientos de calibración, lo que no permite evaluar la eficiencia de cada compañía de una manera sencilla.

Hablando en general, los costos de los sistemas comerciales de sistemas LIDAR varían entre los 700 mil y 1.5 millones de USD, sin incluir los equipos fotográficos ni la paquetería de post-procesamiento, que por su parte pueden oscilar alrededor de 170 mil USD para una cámara digital y 15 mil USD por paquete de programación (es necesario al menos uno para determinar la posición geográfica y los ángulos de orientación y otro para la remoción de objetos y edición del modelo digital del terreno). La velocidad de vuelo en helicóptero va de 40 a 90 [km/hr] y para avionetas de 160 a 210 [km/hr]. Mientras que las alturas típicas de vuelo son de 200 a 300 [m] y de 500 a 1000 [m], respectivamente. En ambos casos los tiempos de levantamiento aéreo van de 2 a 4 horas.

El sistema TopEye es el que mejor precisión planimétrica presenta, sin embargo, su costo es bastante elevado y como puede verse, el del sistema ALTM 1025 asciende a casi 800 mil dólares, mientras que el sistema **10** que se propone en esta tesis, tiene un precio de 428 mil dólares. Esto significa una reducción del precio a poco menos de un tercio y de la mitad, respectivamente, ofreciendo una precisión horizontal del orden de 0.30 [m]. Las ventajas que este sistema ofrece se ven directamente en el costo, pero adicionalmente el LIDAR **10** cuenta con la capacidad de volar en avión o helicóptero gracias a su frecuencia de barrido variable. A un costo menor, la opción **7** presenta también muy buena precisión comparativamente hablando. Y el sistema **1** es definitivamente la opción de menor costo y menor precisión, sin embargo, también tiene un nicho de aplicaciones cuando los modelos digitales no existen o se encuentran disponibles a escalas muy grandes (i.e. Mayores de 1: 50,000).

Fue muy satisfactorio encontrar durante el desarrollo de este trabajo, que algunas compañías hacen uso de sistemas de determinación de la orientación, que no son estrictamente hablando sistemas inerciales convencionales, como es el caso del sistema de determinación de la vertical que se desarrolló en nuestro laboratorio y que cumplen con la función de entregar los ángulos de orientación para determinar el punto donde golpeó el haz láser. Esto demostró que nuestra apreciación inicial sobre la factibilidad de poder desarrollar un sistema LIDAR de bajo costo, era realista.

5.2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se ha visto en el desarrollo de esta tesis, las tecnologías que comprende este sistema están en pleno desarrollo. Si la precisión que se puede lograr está en el orden de la mejor tecnología tradicional disponible, los avances posteriores harán esta técnica mejor e indispensable en el futuro cercano de la percepción remota, y es esta es la justificación de este trabajo de tesis. El trabajo desarrollado nos permite establecer una serie de conclusiones y recomendaciones para dar continuidad a este proyecto.

5.2.1. Conclusiones

- Se ha demostrado la factibilidad de integrar un sistema LIDAR de bajo costo.
- Se logró el objetivo de diseñar un sistema LIDAR para obtención de mapas topográficos, con precisión razonablemente buena, utilizando la menor cantidad de recursos económicos.
- La precisión final obtenida para la mejor de las opciones propuestas es de 0.30 [m].
- El aumento en la precisión puede darse en la medida que se consiga un sistema inercial más costoso, ya que se ha demostrado que este equipo es el más crítico en todo el sistema. El barredor láser influye en un porcentaje mínimo en la precisión total, debido a sus buenas características de desempeño. Se puede usar un láser de costo menor con la penalización de tener que volar más bajo por el problema de la potencia.
- Se han sentado las bases de un trabajo futuro, que se avoque a la tarea de construir físicamente un sistema LIDAR.
- Se ha establecido la necesidad de utilizar una plataforma estabilizada para compensar las desviaciones en que incurre la aeronave durante la campaña de obtención de datos LIDAR.
- Se ha hecho una selección y se ha logrado caracterizar exhaustivamente a los equipos que integran el sistema LIDAR.
- El sistema LIDAR diseñado, utiliza lo último en tecnología disponible de bajo costo, y ofrece la capacidad de actualizarse cambiando únicamente la programación. Cualquier mejora en el futuro debe tomar en cuenta principalmente si alguno de los componentes es obsoleto o no.
- El mayor campo de acción para estos sistemas se encuentra en el análisis y desarrollo de programas, sin embargo no se debe soslayar la integración de equipos LIDAR que compitan en el mercado. En ese sentido, el esfuerzo logrado con el desarrollo de esta tesis ha fincado una base para un producto de alta calidad, competitivo y que beneficiará a un gran número de personas.

5.2.2. Recomendaciones

Las recomendaciones que surgen para dar continuidad a este trabajo de tesis, son las siguientes:

- La programación para la obtención de modelos digitales del terreno y otra información relacionada, utiliza algoritmos que involucran procesos estocásticos avanzados, el desarrollo de dicha programación resulta material de otra tesis y no se consideró en este trabajo.

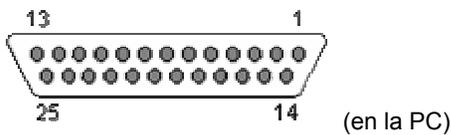
- El sistema LIDAR requiere una plataforma estabilizada para mejorar su desempeño. En el Instituto de Geografía se han diseñado y construido varias plataformas aéreas portacámaras, sin embargo, éstas no tienen la capacidad para soportar la masa del sistema; por ello resulta necesario diseñar una plataforma que maneje más masa y volumen.
- El juego de sensores inerciales debe colocarse directamente sobre la cabeza del barredor, para que, de este punto en particular, sean los datos de orientación que se obtengan durante la campaña aérea. El mismo cuidado debe tenerse con la antena del receptor GPS, ya que la posición geográfica corresponde exactamente a la posición de la antena.
- Las aplicaciones de los programas de graficación y postproceso, pueden llevar a cabo la discriminación y clasificación de estructuras hechas por el hombre y aquellas de origen natural, identificación de zonas de follaje y suelo, perfil del lecho marino, entre otras. Algunos programas en desarrollo permiten incluso reconocer los tipos de suelo y las diferentes especies de plantas presentes, todo ello con aplicaciones forestales y geofísicas entre otras.
- Otro tipo de información que es necesario tener en cuenta, es la de los regresos múltiples, con los que se puede generar un perfil vertical del terreno y los cuales generan varias medidas de distancia para un solo dato de posición-orientación. De la misma manera requiere programación especializada que, como en los casos anteriores, se puede desarrollar en la UNAM una vez que se arranque el proyecto LIDAR.
- Uno de los datos que proporciona el láser, es la medida de la amplitud del pulso de regreso. Lo más común para la aplicación que se toma en cuenta, es el saber que el pulso golpeo un objeto en el suelo sin importar cual; es en el postproceso donde se discrimina entre un objeto y otro al analizar su altura. Por otro lado diversos estudios muy recientes están encontrando una relación directa entre la amplitud del pulso de regreso y el objeto que este golpea en tierra. Una vez que se cuente con la información adecuada, se podrá saber en tiempo real, el tipo de objeto que el pulso golpeó, con todas las implicaciones que esto conlleva.
- La utilización de estos sistemas, como se ha visto, es de gran utilidad para agilizar procesos actualmente muy tardados y caros, y se dará con la misma velocidad con que se abaraten sus costos y resulten accesibles a sectores mayoritarios. Las ventajas que ofrecen y su potencial son tan importantes, que la investigación alrededor de ellos por parte de las universidades e institutos en México, es indispensable para no quedarnos a la zaga en este ámbito particular de la percepción remota.

Fin.

APÉNDICE A

Puerto ECP

ECP (Extended Capabilities Port) es una tecnología que utiliza las ventajas de una comunicación en paralelo, tradicionalmente unidireccional como en una impresora, en forma bidireccional. Esta característica permite manejar altos volúmenes de información en tiempos reducidos. En este apartado se ofrece una visión general de las señales y características del puerto ECP.



Conector hembra D-SUB de 25 terminales en la PC.

Pin	Nombre	Dir	Descripción
1	nStrobe	→	Strobe
2	data0	↔	Dirección, información o Bit 0
3	data1	↔	Dirección, información o Bit 1
4	data2	↔	Dirección, información o Bit 2
5	data3	↔	Dirección, información o Bit 3
6	data4	↔	Dirección, información o Bit 4
7	data5	↔	Dirección, información o Bit 5
8	data6	↔	Dirección, información o Bit 6
9	data7	↔	Dirección, información o Bit 7
10	/nAck	←	Acknowledge
11	Busy	←	Ocupado
12	PError	←	Error de papel
13	Select	←	Selección
14	/nAutoFd	→	Autoalimentación

15	/nFault		Error
16	/nInit		Inicializar
17	/nSelectIn		Selección de entrada
18	GND		Tierra
19	GND		Tierra
20	GND		Tierra
21	GND		Tierra
22	GND		Tierra
23	GND		Tierra
24	GND		Tierra
25	GND		Tierra

Descripción de las señales:

nStrobe

Esta señal registra información o dirección en el dispositivo esclavo durante el flanco de elevación.

data 0-7

Contiene dirección o información. Puede ser utilizada en ambas direcciones.

nAck

Información válida dependiendo del dispositivo periférico. Esta señal funciona de la mano con **nAutoFd** en el modo inverso.

Busy

Esta señal indica si el periférico puede aceptar información. En modo directo funciona junto con **nStrobe**. En el modo inverso esta señal indica si la información está comprimida en formato RLE.

PError

Utilizada para reconocer un cambio en la dirección de transferencia. Alto → Modo directo.

Select

La impresora está en línea.

nAutoFd

Busca un byte de información proveniente del periférico de la mano de **nAck** en dirección inversa. En modo inverso esta señal indica si las líneas de información contienen direcciones ECP o información.

nFault

Genera una interrupción de error cuando se encuentra en alto.

nInIt

Especifica la dirección de transferencia: Alto→Inversa, Bajo→Directo.

nSelectIn

Bajo en modo ECP.

APÉNDICE B

MANEJO DE DATOS Y GRAFICACIÓN

B.1. Determinación final de los puntos

Después de un vuelo de exploración se tienen básicamente dos listas de datos: la información de posición (POS) y la de distancias con sus correspondientes ángulos instantáneos (láser). Con ellos se pueden calcular puntos con muy buena precisión en un sistema de referencia fijo al suelo. Sin embargo, algunos parámetros sistemáticos deben ser considerados, algunos son los tres ángulos de montaje del láser, descritos por los ejes de Euler, cabeceo, rotación y guiñada, con respecto a al sistema de coordenadas fijo a la nave (usualmente con origen en el INS), la posición del láser con respecto al INS y la posición del INS con respecto al GPS.

Derivado de la orientación y posición relativa de las diferentes exploraciones y la orientación y posición absoluta con respecto a un sistema de referencia fijo al suelo puede obtenerse información para calibración. Un procedimiento típico de calibración es descrito por Lindenberger (1993). Sin embargo, no hay procedimiento estándar, hoy en día cada compañía tiene su propio procedimiento de calibración. La experiencia dice que dicha información de calibración es válida solo para el proyecto en el que se aplica.

De acuerdo con Lindenberger (1993) y Hug (1996), los puntos láser en WGS84 pueden ser calculados con ayuda de tres bases de datos: información de calibración, mediciones de distancia con su respectivo ángulo instantáneo e información de POS. El objetivo principal del procesamiento es el cálculo de modelos digitales de elevación. Primero, la distancia del láser debe transformarse de WGS84 al sistema coordenado local deseado. El resultado es una nube de puntos distribuidos aleatoriamente. La distribución de los puntos depende del patrón de exploración que utiliza el escáner.

Después, las elevaciones son ordenadas con respecto a su posición. Una vez hecho esto, se deben separar los puntos en el suelo de los que no lo están como árboles y edificios. Para esta tarea se utilizan diferentes algoritmos de filtrado, entre los más comunes se encuentra el filtrado morfológico y la aplicación de procesos integrados autorregresivos (Lindenberger, 1993). Los artículos al respecto y el estudio de Graus y Pfeifer (1998) ponen en claro que el desarrollo de estos filtros no está completo aun. El filtrado se realiza usando tanto la información en bruto como un arreglo interpolado regular. Este último tiene la desventaja de tener errores de interpolación, pero por otro lado se le pueden aplicar métodos existentes y probados de filtrado

de imágenes. Los algoritmos inteligentes fueron desarrollados para interpolación de DTMs por que en la mayoría de los casos muchos puntos caían dentro de cada malla del arreglo (Hug y Wehr, 1997). Por lo tanto, los algoritmos de interpolación requieren además ciertos algoritmos de ponderación.

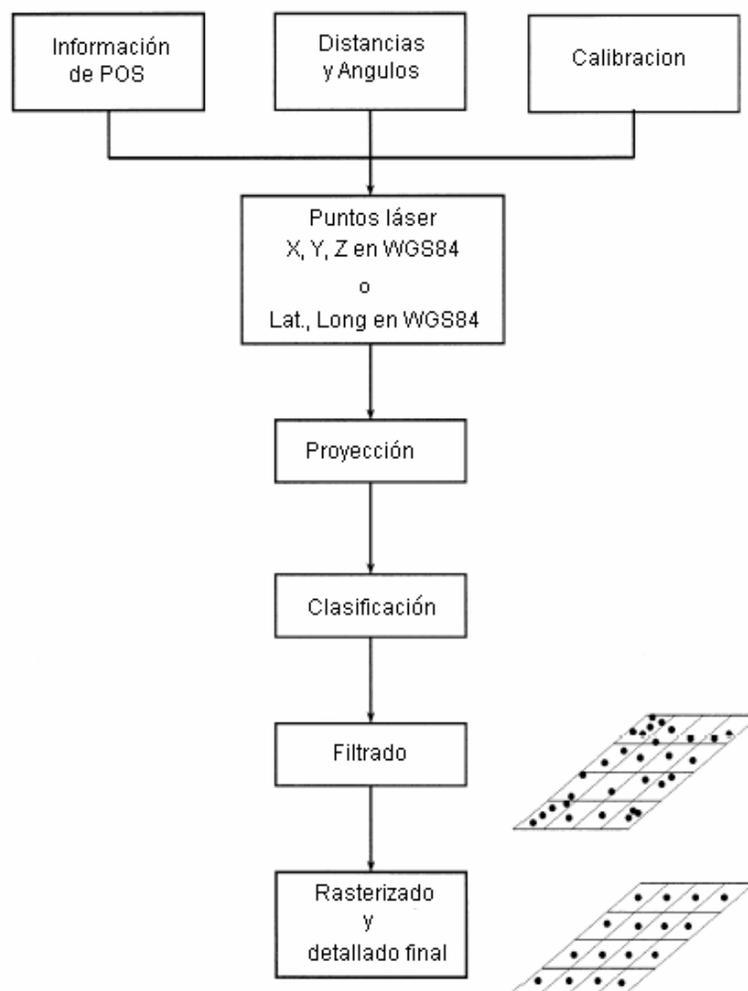


Fig. B.1. Diagrama de bloques de la obtención de un DTM.

Como la cantidad de información generada es muy alta para ciertas aplicaciones y los programas comerciales para interpolación y visualización de DTMs solo pueden manejar un numero limitado de puntos, es por ello que debe adelgazarse el archivo de datos, y al final de cuentas esto lo debe hacer un programa de interpolación y filtrado.

La visualización y edición manual de la información es necesaria en diferentes etapas del procesamiento. Después de todos los estudios que se han hecho a través de los años, se ha vuelto obvio que los mayores resultados se han logrado mejorando principalmente en el

software de post-proceso de la información y no en el *hardware* del escáner láser. Esto significa que la calidad de un DTM, DSM o de un modelo de ciudad depende, junto con la densidad de la medición y la precisión del sistema láser, del software de post-procesamiento.

Así como el post-proceso determina de manera importante el resultado final, también es claro que en el presente los programas de filtrado e interpolación son programas propietarios internos de cada compañía. Una vez interpolada la información puede ser procesada e interpretada por cualquier programa comercial como SCOP, Microstation, EASI-PACE y ARC/Info. Actualmente, el tiempo de proceso de un DTM calculado a partir de la información de un LIDAR es tres veces el tiempo de adquisición de los datos.

B.2. Graficación

A partir de los datos obtenidos durante el vuelo, algunos programas de computadora comerciales, haciendo uso de las bases de datos generadas, obtienen los modelos digitales del terreno. Dichas bases contienen la siguiente información mínima:

- LÁSER. Distancia, amplitud del pulso de retorno, ángulo del espejo poligonal, calidad, hora de la medición e información sobre color verdadero (RGB).
- GPS. Sentencias: Posición (\$INGGA), Rumbo (\$INHDT), Velocidad y recorrido (\$INVTG), Estadísticas (\$INGST).
- SNI. Hora, ángulos de orientación en los tres ejes (φ, θ, ψ).

A partir de esta base de datos y auxiliándose con un programa de graficación, se genera un archivo que contiene únicamente coordenadas X, Y, Z con los datos en crudo del terreno en estudio, lo cual nos describe una nube de puntos que debe ser analizada y filtrada para ser utilizable y así separar árboles de piedras o edificios; dicho programa utiliza un filtro de Kalman. Éste no fue desarrollado por salir del alcance de esta tesis, únicamente se escribió una rutina para graficar datos simulados de un archivo XYZ, obteniéndose el resultado mostrado en la siguiente figura:

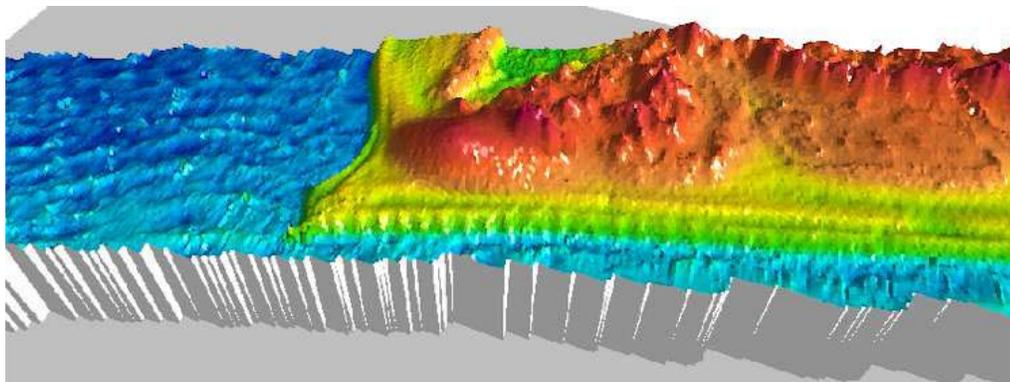


Fig. B.2. Imagen digital de terreno.

BIBLIOGRAFÍA

Busbridge & Puleston, "*A laser obstacle avoidance and display system*", ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 58 (2003) 31– 42.

Songxin Tan and Ram M. Narayanan, A Multiwavelength Airborne Polarimetric Lidar for Vegetation Remote Sensing: Instrumentation and Preliminary Test Results, Department of Electrical Engineering, University of Nebraska-Lincoln.

R.Sabatini, M.A.Richardson, A new approach to eye-safety analysis for airborne laser system sight test and training operations, Optics & Laser Technology 35 (2003)191 –198.

Keqi Zhang, Shu-Ching Chen, *Member, IEEE*, Dean Whitman, Mei-Ling Shyu, *Member, IEEE*, Jianhua Yan, and Chengcui Zhang, *Student Member, IEEE*, A Progressive morphological Filter for Removing Nonground Measurements From Airborne LIDAR Data, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 41, NO. 4, APRIL 2003.

Lemmens, M., Accurate Height information from airborne Laser-Altimetry, Universidad Tecnologica de Delft, Facultad de Ingenieria Geodesica.

Haala & Bôhm, "*A multi-sensor system for positioning in urban environments*",

Rodríguez y Becerril, "Sistema de navegación inercial basado en giroscopos y acelerómetros", Facultad de Ingeniería, 2002.

Ternryd Carl-Olof, Lundin Eliz, "Topografía y fotogrametría en la practica moderna", CECSA, 1973

Michael W.Oppenheimer, Meir Pachter, Adaptive optics for airborne platforms —Part 2:controller design, Optics &Laser Technology 34 (2002)159 –176

David B.Kidner, Derek H.Smith, Advances in the data compression of digital elevation models, Computers & Geosciences 29 (2003)985 –1002

AgGPS® 124 / 132, Operation Manual

Friedrich Ackermann, Airborne laser scanning—present status and future expectations, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 1999 64–67

Ramesh L. Shrestha, William E. Carter, Mark Lee, Paul Finer and Michael Sartori, Airborne Laser Swath Mapping: Accuracy Assessment for Surveying and Mapping Applications, University of Florida, Department of Civil Engineering, Geomatics Program.

Jon Coleman BSc(Hons), PgD., *Airborne LIDAR Mapping: Myths and Legends*, Texas Surveyor, July 2002.

W.B.Krabill, W.Abdalati, E.B.Frederick , S.S.Manizade, C.F.Martin, J.G.Sonntag, R.N.Swift, R.H.Thomas, J.G.Yungel, Aircraft laser altimetry measurement of elevation

changes of the greenland ice sheet: technique and accuracy assessment, Journal of Geodynamics 34 (2002)357 –376

Aloysius Wehr, Uwe Lohr, Airborne laser scanning—an introduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 1999 68–82.

E.P. Baltsavias, Airborne laser scanning: basic relations and formulas, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 1999 199–214.

Paginas de internet

<http://www.teledet.com.uy>

http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html

<http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/laser/fundamentals.htm>