

# Capítulo 2. LIDAR

## 2.1. Principio de funcionamiento

El LIDAR (“Light Detection And Ranging”) utilizado en este proyecto es el LD-MRS. Éste permite detectar los objetos mediante rayos láser que se emiten en cuatro canales distintos. El dispositivo mide la distancia y la dirección (ángulos del LIDAR) del objeto. A partir de los datos medidos, calcula la posición del objeto en el sistema de coordenadas del sensor. Estos datos contienen información sobre el plano de medición, distancia, canal, ángulo horizontal y vertical.

Debido a la gran cantidad de datos (muchos píxeles e información de cada uno de ellos), el dispositivo emite los datos medidos a través de la interfaz Ethernet.

El LD-MRS es un instrumento de medida basado en la tecnología de tiempo de vuelo (TOF), es decir, utiliza rayos láser para detectar la distancia y el ángulo de los objetos. El entorno se explora radialmente con varios haces rotatorios, los pulsos reflejados se reciben mediante un receptor fotodiodo, se procesan los datos estimando una media de los tiempos de vuelo y el resultado final (dato ya procesado) se envía a través de la interfaz Ethernet.

Las mediciones se basan en:

- Medición del tiempo de vuelo
- Rango de detección
- Tecnología multicanal
- Resolución angular y frecuencia de barrido

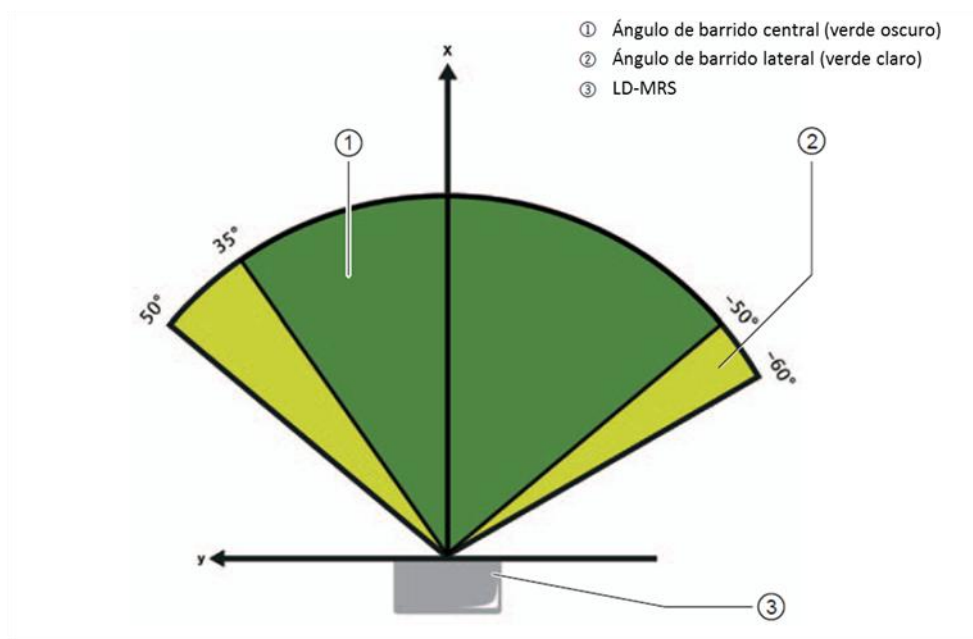
### 2.1.1. Medición del tiempo

Los pulsos emitidos por el láser son reflejados por los objetos que existen en el entorno. El LD-MRS recoge estas reflexiones, procesa la información y lo envía a través de la interfaz Ethernet. La distancia del objeto se calcula a partir del tiempo de vuelo del pulso láser y la

velocidad de la luz. Gracias a la posición angular del espejo rotatorio que se encuentra en el LIDAR, se obtiene la dirección del objeto detectado. La combinación de estos dos valores constituye la base para elaborar el perfil de los alrededores del LD-MRS.

### 2.1.2. Rango de detección

El LD-MRS está diseñado con un ángulo de barrido central de  $85^\circ$  para los cuatro canales (de  $+35^\circ$  a  $-50^\circ$  y dibujado en verde oscuro). Este rango puede extenderse entre  $+35^\circ$  y  $+50^\circ$  o  $-50^\circ$  y  $-60^\circ$ , formando un ángulo de barrido de  $110^\circ$ . Los ángulos de barrido laterales (dibujados en verde claro) proporcionan sólo dos en vez de cuatro canales. Este rango de ángulos se conoce como ángulos horizontales y se muestra en la *Figura 1*.



*Figura 1: Rango de escaneo*

### 2.1.3. Tecnología multicanal

La tecnología multicanal permite la compensación del ángulo de pitch mediante cuatro planos de escaneo con diferentes ángulos verticales. La implementación de esta tecnología es posible gracias a que el receptor fotodiodo está formado por cuatro receptores independientes situados en una línea. Cada receptor se asigna a un plano de escaneo (también llamado canal), dividiendo el ángulo de apertura vertical en cuatro planos tal y como se muestra en la *Figura 2*.

Estos cuatro planos se escanean de manera entrelazada, es decir, siempre se escanean los planos de dos en dos simultáneamente. Esto significa que, para un mismo ángulo horizontal, siempre se obtendrán dos medidas con canales simultáneos.

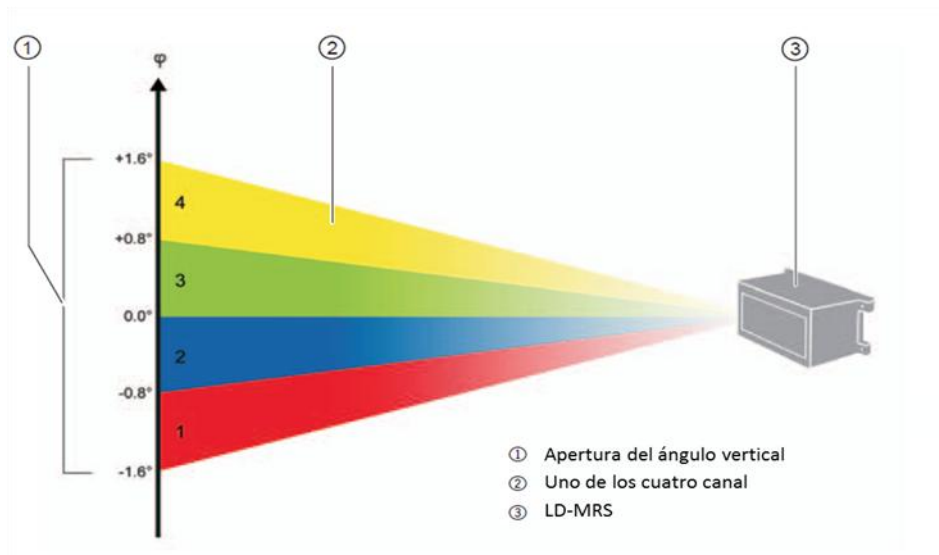


Figura 2: Principio de los planos de escaneo (canales)

#### 2.1.4. Resolución angular y frecuencia de barrido

El LD-MRS puede operar con tres frecuencias de escaneo diferentes (12.5 Hz, 25 Hz y 50 Hz), que permite cuatro configuraciones diferentes de la resolución angular.

En este proyecto, se trabaja con la frecuencia de escaneo 12.5 Hz que establece una resolución angular de 0.25°

## 2.2. Aplicaciones

Un LIDAR (no necesariamente el del presente proyecto) tiene múltiples aplicaciones, de las cuales se detallan algunas.

#### 2.2.1. Detección de plancton en el océano

Un LIDAR aerotransportado es capaz de detectar el plancton de la parte superior de los océanos y revelar características que no se pueden obtener a través de los instrumentos tradicionales de buques o satélites. Además, permite obtener una estimación de la abundancia de plancton.

Según Churnside, J.H. en [1], el LIDAR que se utiliza en esta aplicación tiene el transmisor y receptor separados y se muestra en la *Figura 3*. El transmisor envía pulsos de 12ns en la longitud de onda 532nm a una velocidad de 30Hz. Este haz se expande y alinea con el telescopio receptor gracias a un par de espejos. La componente despolarizada de la luz reflejada por el océano se recoge en un tubo fotomultiplicador por un telescopio con un campo de visión de unos 15mrad, que coincide con la divergencia del haz del láser. Un filtro de interferencias reduce la cantidad de luz del fondo que llega al receptor. La señal detectada se

digitaliza y almacena en el ordenador para su posterior procesamiento, aunque también se proporciona una visualización en tiempo real.

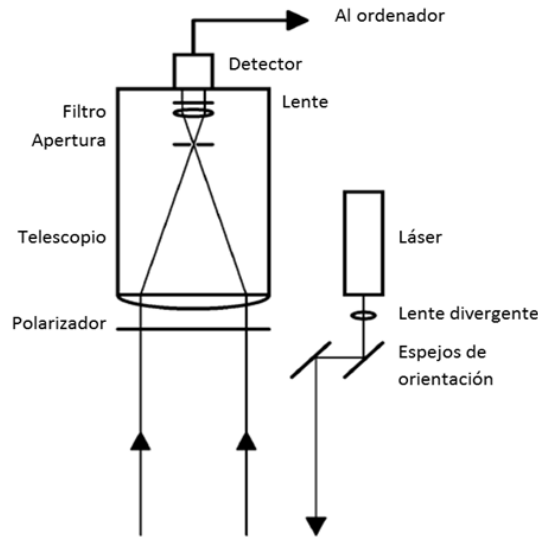


Figura 3: Diagrama esquemático del LIDAR NOAA

Cada disparo devuelto por el LIDAR puede describirse por la ecuación:

$$E_L = P_L M A \gamma^2 T G \left( h + \frac{z}{n} \right)^{-2} \exp(-2\alpha z) \frac{c\tau}{2n} (\beta_w - \beta_p) \quad (1)$$

donde  $P_L$  es la potencia transmitida por el láser,  $M$  la responsividad del receptor,  $A$  el área recibida del telescopio,  $\gamma$  la transmisión de la interfaz del aire/agua,  $T$  transmisión de los receptores ópticos,  $G$  ganancia del amplificador,  $h$  la altura en el aire (altitud de la aeronave),  $z$  la profundidad del agua,  $n$  el índice de refracción del agua del mar,  $\alpha$  el coeficiente de atenuación del LIDAR,  $\tau$  la longitud del pulso,  $\beta_w$  el coeficiente de retrodispersión del agua de mar y  $\beta_p$  el coeficiente de retrodispersión del plancton.

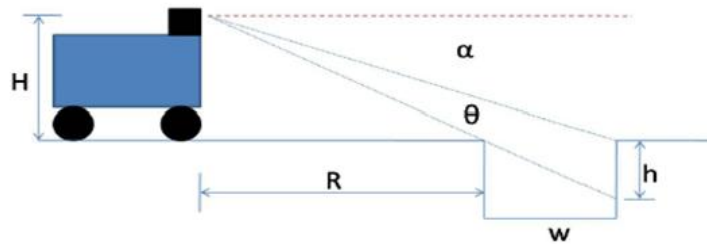
Esta ecuación incluye parámetros medibles, como la potencia transmitida por el láser. Sin embargo, tiene otros tres parámetros que dependen de las propiedades ópticas del agua. La retrodispersión del agua ( $\beta_w$ ) puede estimarse asumiendo que es constante con la profundidad o con cierta medida horizontal. Inspeccionando el terreno se extrae cuál es la suposición correcta. Una vez estimada, la retrodispersión del agua se resta de la total para obtener la componente que interesa. Con la misma hipótesis, se estima también la atenuación a partir de la disminución media de la señal del LIDAR con la profundidad, pudiendo corregir los efectos de la atenuación. Finalmente, se aplica un umbral para reducir el ruido en la señal.

El resultado es proporcionar una idea del perfil de las concentraciones de plancton (en la zona detectada por el LIDAR). Además, integrando se puede obtener una medida relativa de la abundancia de plancton. Conocer la abundancia absoluta no es posible debido a la falta de conocimiento de las características de dispersión óptica de cualquier especie de zooplancton.

### 2.2.2. Detección de obstáculos subterráneos en la carretera

Los obstáculos subterráneos (o de cota negativa) son zanjas o terrenos con una pendiente negativa pronunciada que podrían ser un riesgo para un vehículo (UGV) en caso de atravesarlas. De hecho, este tipo de obstáculos pueden ser tan peligrosos como un obstáculo sobre el suelo, ya que pueden provocar que el UGV vuelque. Por lo general, las zanjas más grandes que el diámetro de la rueda del vehículo son suficientes para causarle daño.

Gráficamente, las zanjas se representan como aparece en la *Figura 4*; siendo  $w$  la anchura del obstáculo,  $H$  la altura del sensor sobre el suelo,  $h$  la profundidad del obstáculo vista desde el sensor y  $R$  el rango desde el sensor al obstáculo.



*Figura 4: Geometría para la detección de obstáculos subterráneos*

Según Larson, J. & Trivedi, M en [2], para detectar este tipo de obstáculos hay que tener en cuenta lo siguiente:

RANGO DE DETECCIÓN Y DISTANCIA DE PARADA:

Las zanjas son difíciles de detectar de cerca y casi imposible de lejos. La ecuación (2), basada en un ángulo de aproximación pequeño, muestra la dificultad de detectar objetos en un rango  $R$  y determina el valor del ángulo  $\theta$  que aparece en la *Figura 4*.

$$\theta \approx \frac{Hw}{R(R+w)} \quad (2)$$

El ángulo  $\theta$  disminuye significativamente conforme el rango aumenta ( $\sim \frac{1}{R^2}$ ), lo cual dificulta la detección de obstáculos subterráneos conforme aumenta el rango, es decir, conforme más lejos se encuentra la zanja del UGV. Sin embargo, la detección de zanjas a grandes distancias es esencial, sobre todo para vehículos con movimiento rápido. Para ello, se aplica un método llamado Detector de Obstáculos Subterráneos (NODR) que utiliza varios filtros y busca señales contextuales de manera que se amplían las prestaciones del rango.

La distancia de parada de un vehículo se puede determinar de la siguiente manera:

$$R = \frac{v^2}{2\mu g} + vT_r + B \quad (3)$$

donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción estática entre el suelo y las ruedas, cuyo valor típico para conducción en carretera es 0.65,  $g$  la aceleración gravitatoria de valor  $9.8\text{m/s}^2$ ,  $T_r$  el tiempo de reacción total cuyo valor típico es 0.25s y  $B$  la distancia de seguridad (un posible valor es 2m). La velocidad  $v$  se convierte en el término dominante cuando  $v > 3.2\text{m/s}$ .

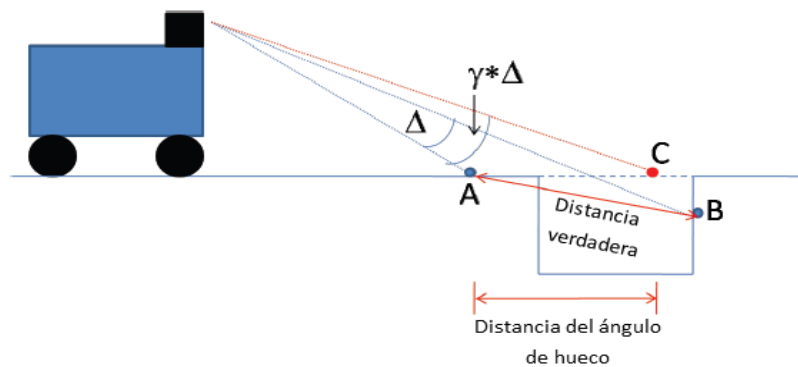
### DETECTOR DE OBSTÁCULOS SUBTERRÁNEOS (NODR):

El método utilizado para detectar obstáculos subterráneos (basado en la geometría) se denomina Detector de Obstáculos Subterráneos (NODR) y se muestra en la *Figura 6*.

Este método detecta que hay un obstáculo subterráneo (zanja, acantilado o pendiente negativa) mediante la ausencia de datos. La detección comienza trazando una nube de puntos 3D desde el sensor, empezando desde el ángulo vertical más bajo hacia el más alto.

El primer paso de este método consiste en la búsqueda de un escalón (caída de la elevación mayor que un umbral de paso  $Th_p$ ) que se extiende más allá de la distancia de separación. El umbral de hueco  $Th_h$  del UGV se determina como el tamaño del hueco que podría causar daño o detener la plataforma.

Si al buscar el escalón no se encuentra ningún obstáculo subterráneo, entonces se buscan huecos entre dos puntos de los datos. Mientras se rastrean los rayos radiales, si se encuentra un hueco con una distancia mayor que el umbral de hueco  $Th_h$ , entonces se mira el ángulo de hueco. Aquí, el umbral es la distancia que se tendría si el siguiente punto tuviera la misma elevación que el anterior, y el ángulo vertical hubiese aumentado a  $\gamma\Delta$  siendo  $\Delta$  la resolución angular vertical entre los escaneos horizontales, tal y como aparece en la *Figura 5*. En ella se observa que un obstáculo subterráneo tendrá un hueco con una distancia mayor ( $dist(A, B)$ ) comparado con otro punto (C) que estuviera situado una superficie plana del terreno y que tiene un incremento del ángulo  $\Delta$  en  $\gamma$  veces ese ángulo de referencia. Si la distancia entre A y B es mayor que la distancia entre A y C, significa que podría haber un objeto subterráneo.



*Figura 5: Distancias en un obstáculo subterráneo*

Si el hueco es lo suficientemente grande como para pasar estos filtros de distancia, el algoritmo busca señales contextuales. Las señales que debe buscar son o bien una caída significativa en la elevación (tales como la que aparecería si la pendiente fuera más pronunciada que un umbral máximo de disminución de pendiente) o bien de los datos de después del hueco tienen una pendiente significativamente positiva (como la pendiente de la parte posterior de una zanja). La pendiente posterior de una zanja puede determinarse calculando el número de los siguientes puntos que deberían formar parte de la pendiente posterior, determinar su pendiente y umbralizar ese valor. El número de puntos se calcula hallando el ángulo de visión de obstáculo subterráneo, que corresponde a  $\theta$  en la *Figura 4*.

Para rangos de  $R$  que no se encuentran tan distantes, el ángulo de aproximación no funciona y la ecuación (2) no proporciona un valor preciso por lo que se estima de otra forma:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H}{R}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{H}{R+w}\right) \quad (4)$$

El número de puntos de la pendiente que hay que usar es:

$$num\_puntos = \frac{\theta}{\Delta} \quad (5)$$

donde  $\Delta$  es la resolución angular vertical del sensor. Cuando el número de puntos ( $num\_puntos$ ) es mayor que uno, se puede determinar la pendiente. Si el número de puntos es menor que uno, no se puede calcular la pendiente ya que la resolución angular vertical es menor que  $\theta$  y el obstáculo se clasifica como subterráneo.

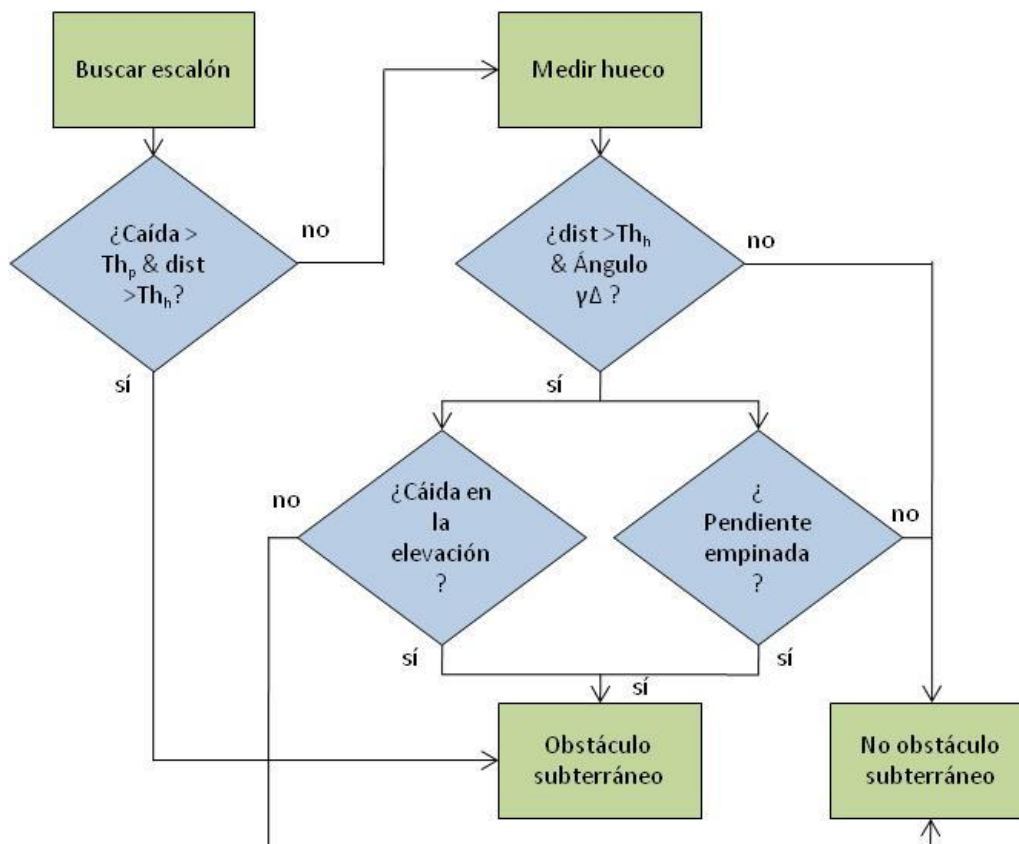


Figura 6: Diagrama del NODR

