

# OBTENER CINEMÁTICA CON DEMORAS Y FRECUENCIAS

Julio ALBALADEJO CARREÑO



## Introducción



UANDO pensamos en cinemática en los tiempos que corren, damos por hecho que nuestros avanzados sistemas de combate nos van a proporcionar la solución a todos los posibles cálculos que ésta entraña. Cada vez somos menos conscientes de todas las operaciones que hay detrás del resultado que presentan nuestras consolas.

Desde la incorporación del radar y del Sistema de Identificación Automática (AIS) a nuestras unidades, hemos ido dejando de lado otros métodos más analógicos para el cálculo cinemático. Ante cualquier duda que nos pueda surgir sobre el movimiento de un contacto, acudimos directamente a estas herramientas para obtener información. La realidad es que no siempre podemos

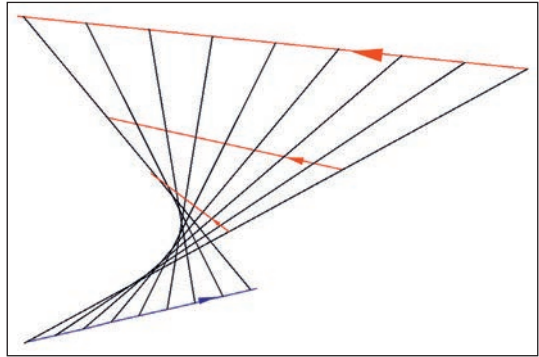
hacer uso de estos sistemas. Las unidades militares no suelen transmitir en AIS, y en situaciones que requieren discreción no se pueden emitir señales, quedando limitado el uso de radares. Lo ideal es acostumbrarse a utilizar sistemas pasivos independientes del AIS. Por la naturaleza de sus misiones, en el Arma Submarina la discreción es su principal premisa y el uso de sistemas pasivos es su pan de cada día.

A pesar de los avances tecnológicos, las limitaciones que supone el medio subacuático obligan al empleo prácticamente exclusivo de la onda sonora como medio de detección y seguimiento de blancos. En los sistemas pasivos más básicos, se dispone únicamente de demoras del blanco. En caso de contar con un sistema más capaz, se pueden estudiar las variaciones de frecuencia del sonido emitido por los blancos, producidas por el efecto Doppler, y obtener soluciones de manera más rápida y precisa.



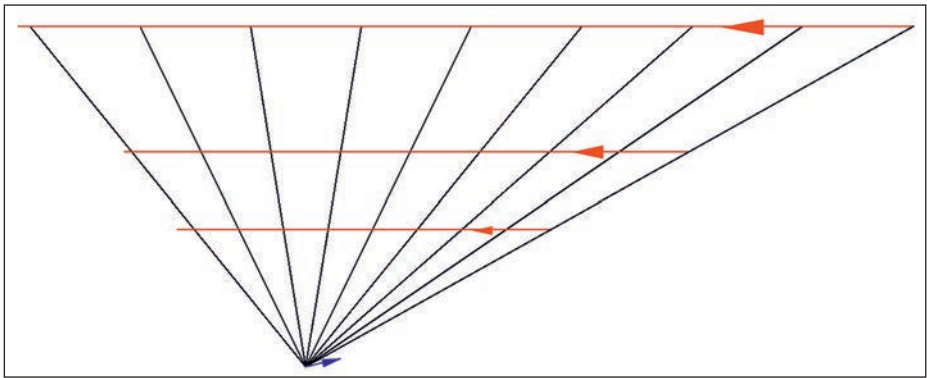
Esta premisa se visualiza mejor mediante un ejemplo gráfico. Un conjunto de demoras puede encajar con infinitas soluciones de rumbo y velocidad real de un blanco.

En la imagen se muestra un conjunto de demoras tomadas en intervalos de tiempo iguales. En color rojo, se representan tres de las infinitas soluciones que encajarían exactamente con este conjunto de demoras. En color azul, se señala el vector de movimiento del buque propio.



Representación de un conjunto de demoras sobre el movimiento del buque propio.  
(Elaboración propia)

Si representamos este mismo conjunto de demoras de manera relativa a la posición del buque propio, obtenemos lo siguiente:



Representación de un conjunto de demoras sobre el movimiento del buque propio.  
(Elaboración propia)

En rojo se señalan los vectores de movimiento relativo correspondientes a las tres soluciones del dibujo anterior. Descubrimos que son paralelas. Para un mismo conjunto de tres o más demoras existe una única dirección de movimiento relativo para todas las posibles soluciones de movimiento absoluto del blanco.

## El método

Para obtener esta dirección de movimiento relativo matemáticamente, definiremos la ecuación con la que varía la demora de un blanco con respecto al tiempo.

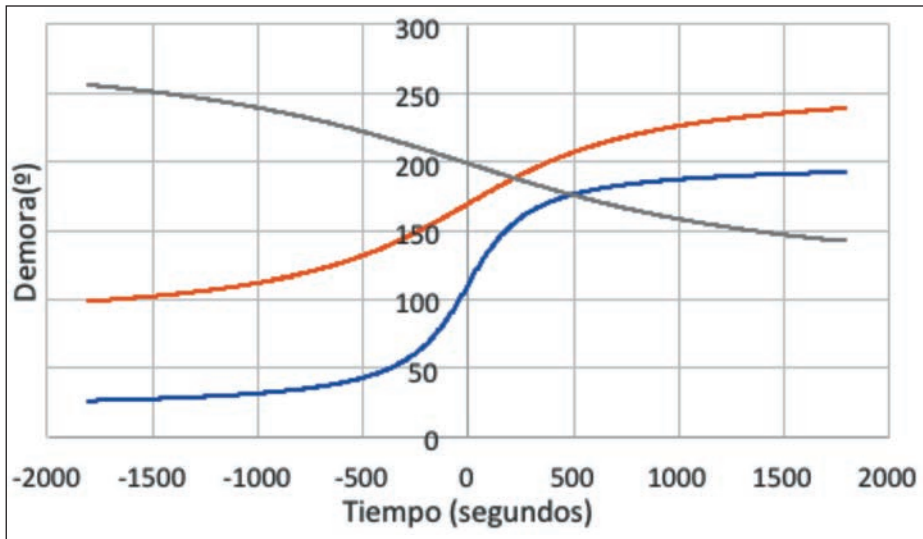
$$Demora = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Velocidad relativa} \times (t - \text{TCPA})}{\text{CPA}} \right) + \text{BCPA}$$

CPA: *Closest Point of Approach*, mínima distancia a la que pasa un blanco de nuestra unidad.

TCPA: *Time at CPA*, hora a la que sucede el CPA.

BCPA: *Bearing on CPA*, demora en el instante del CPA.

Cuando observamos las demoras proporcionadas por el sonar, cada blanco genera una curva de tiempo-demora diferente pero con una geometría similar.



Representación de tres curvas de tiempo-demora. (Elaboración propia)

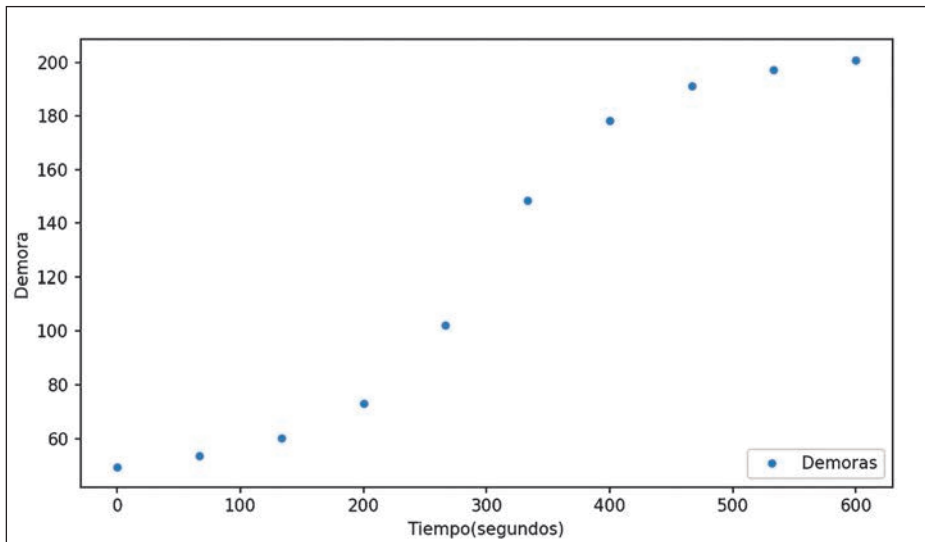
En esta gráfica, los tres blancos tienen el mismo TCPA, sin embargo tienen diferentes CPA, BCPA y velocidades relativas. Observando la fórmula

planteada, vemos que si se aumenta la velocidad relativa en la misma medida que se disminuye el CPA la curva no cambia. Para simplificar la fórmula definiremos:

$$n = \frac{V_{rel}}{CPA}$$

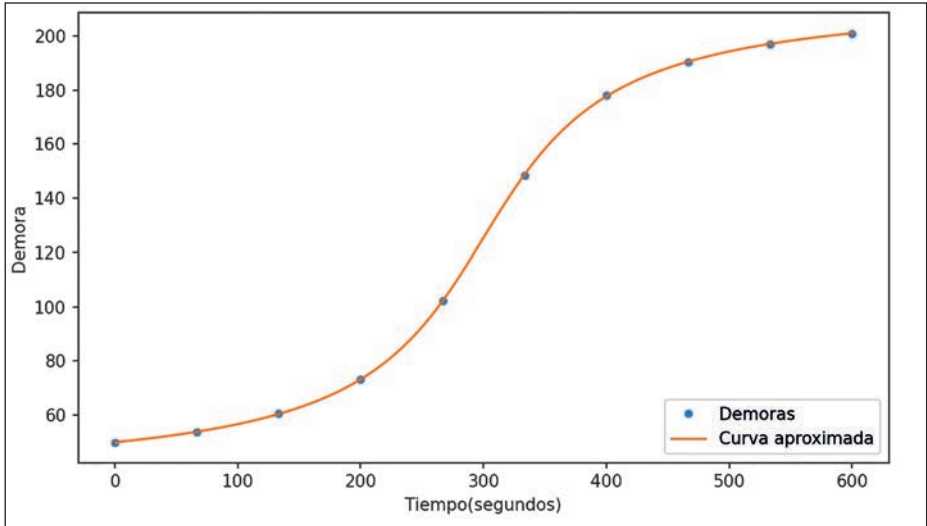
De esta manera, concluimos que una curva de tiempo-demora se define con tres parámetros:  $n$ , TCPA y BCPA. Conociéndolos podremos saber cualquier demora para cualquier instante.

La pregunta que surge ahora es ¿cómo obtener estos tres parámetros de conjunto de demoras? Teniendo en cuenta la precisión en demora de nuestro sonar y el error de medida producido por el operador, no podemos asumir un muestreo de demoras de mucha exactitud. Esto nos lleva a decantarnos por métodos de optimización. El que utilizaremos será el de mínimos cuadrados, que consiste en aproximar una curva con una geometría conocida a una serie de muestras. En este caso, conocemos la forma de la ecuación, y nuestras muestras serán las demoras tomadas para cada instante.



Representación del muestreo de diez demoras en una gráfica de tiempo-demora.  
(Elaboración propia)

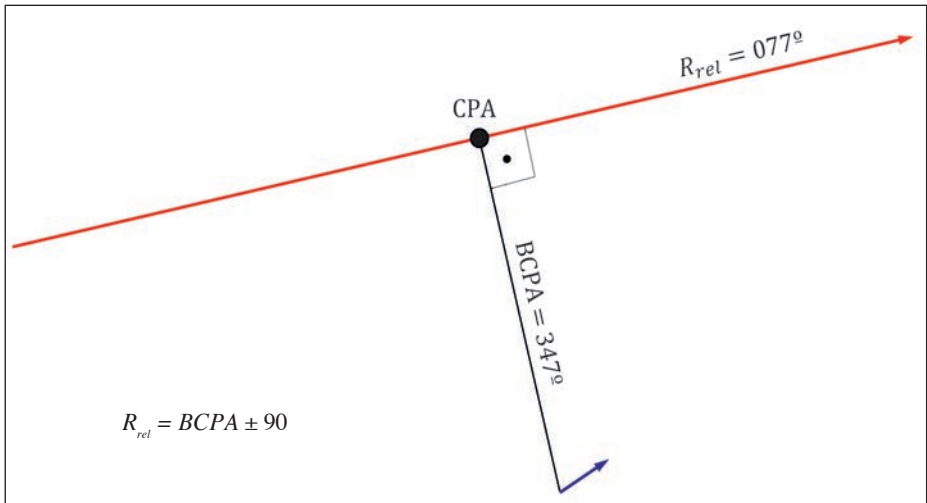
Al aplicar el método de mínimos cuadrados sobre este muestreo de demoras, obtenemos una curva aproximada y los parámetros que definen a la misma.



Gráfica de la curva aproximada por el método de mínimos cuadrados a una muestra de demoras. (Elaboración propia)

A partir de este momento, tenemos que trabajar con estos parámetros (n, TCPA, BCPA) para completar nuestra solución.

Del BCPA es muy sencillo obtener la dirección de movimiento relativo.

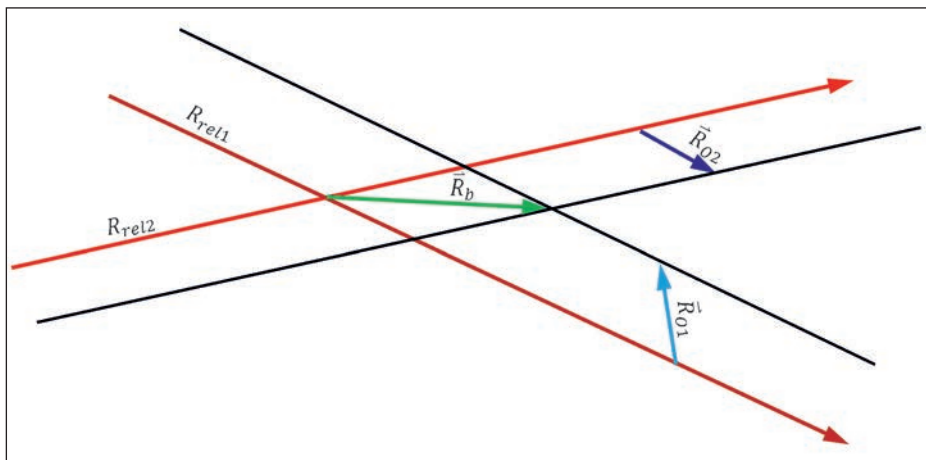


Obtención de la dirección de movimiento relativo a partir del BCPA. (Elaboración propia)

Con cualquier otro dato relativo a la cinemática del blanco es posible completar la solución. Valdría la velocidad relativa, el CPA, el rumbo real, la velocidad real, la distancia o incluso repetir el método habiendo cambiado nuestra cinemática propia.

### Sólo con demoras

Si nuestra única fuente de información sobre el blanco son las demoras, no queda más remedio que realizar un cambio en nuestra cinemática y repetir el proceso.



Obtención del vector de movimiento del blanco conociendo dos direcciones de movimiento relativo. (Elaboración propia)

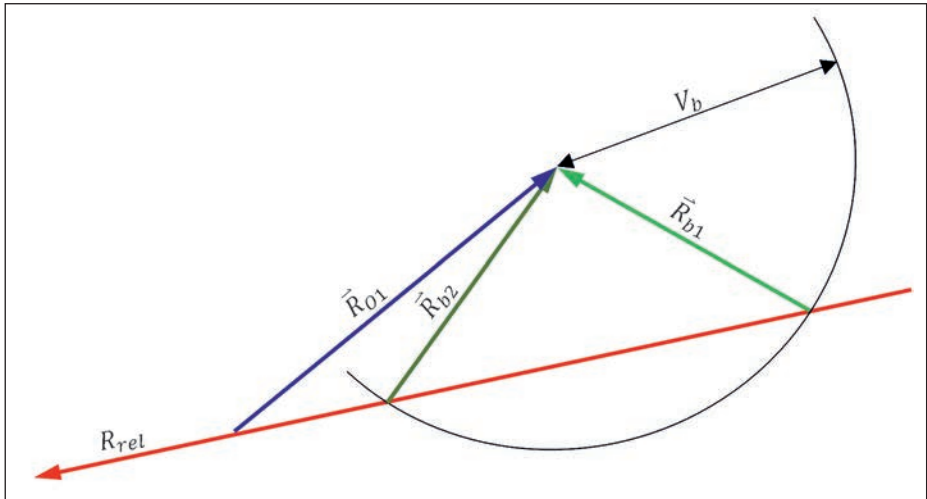
Una vez que disponemos de dos rumbos relativos de un mismo blanco, la manera de llegar a la solución es aplicando trigonometría, como se muestra en el dibujo. En rojo se muestran los dos rumbos relativos ( $R_{rel}$ ) obtenidos de en cada proceso. En azul, los dos vectores de movimiento propio ( $R_o$ ) con los que se han producido los resultados. En negro se dibujan dos líneas paralelas a los rumbos relativos separadas por una distancia determinada por los vectores de movimiento propio. La diagonal del romboide resultante es el vector solución.

## Conociendo el TPK

Uno de los datos que podemos obtener escuchando el ruido de un barco a través de un sonar es el de las RPM (2) de su eje. Este dato por sí solo no es suficiente para completar la solución. Sin embargo, en caso de tener inteligencia previa sobre el contacto que tenemos a la escucha, dispondremos del TPK. Este dato representa la relación que hay entre las revoluciones del eje de un barco y su velocidad en nudos.

$$V_b = \frac{RPM}{TPK}$$

Conocer este dato y las RPM de un blanco supone conocer el módulo de su vector de movimiento, es decir, su velocidad real. Esto simplifica mucho la trigonometría.



Obtención del vector de movimiento del blanco conociendo su velocidad. Dos posibles soluciones. (Elaboración propia)

Puede surgir un pequeño inconveniente en el caso de que la velocidad del blanco sea inferior a la del buque propio. Como se aprecia en el dibujo, en esta ocasión, existirán dos posibles soluciones. Para resolver esto es necesario obtener un nuevo dato o realizar un cambio en nuestro movimiento.

(2) Revoluciones por minuto.



### Con demoras y frecuencias

Este método es probablemente el más eficiente de los tres. Para llevarlo a cabo no hace falta realizar cambios en la cinemática propia ni contar con inteligencia previa del blanco. En cambio sí se necesita que el sonar utilizado proporcione las frecuencias del sonido emitido por los blancos con una precisión considerable. Tenemos que ser capaces de medir las variaciones en frecuencia que se producen debido al efecto Doppler.

$$F_m = F_0 \times \frac{c \pm V_{radial}}{c}$$

La frecuencia medida ( $F_m$ ) se define a partir de su frecuencia fundamental ( $F_0$ ) y el cambio en la velocidad radial generado por el movimiento del blanco con respecto a la velocidad del sonido en el medio ( $c$ ).

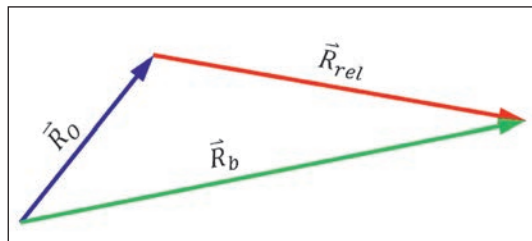
Podemos predecir cómo varía la velocidad radial con la siguiente ecuación:

$$V_{radial} = V_{rel} \times \text{sen}(BCPA - Demora)$$

De esta manera, podremos definir una ecuación que defina cómo varía la frecuencia medida con respecto al tiempo.

$$F_m = F_0 \times \frac{c + V_{rel} \times \text{sen}(-\tan^{-1}(n \times (t - TCPA)))}{c}$$

Tras obtener tres o más frecuencias medidas en sus instantes correspondientes, se podrá aplicar el método de mínimos cuadrados para aproximar una curva a la muestra. Los parámetros que definen esta curva son los que obtuvimos del conjunto de demoras ( $n$  y  $TCPA$ ), además de  $c$ ,  $V_{rel}$  y  $F_0$ . La velocidad del sonido en el medio es un dato conocido, así que el método sólo tiene que aproximar los valores de  $V_{rel}$  y  $F_0$ .



Suma de vectores de movimiento propio y relativo.  
(Elaboración propia)

Saber la velocidad relativa del blanco supone conocer el vector de movimiento relativo, pues ya teníamos la dirección. Ahora solamente queda hacer una sencilla suma de vectores para obtener el vector de movimiento real del blanco.

### Conclusiones

En el caso de la obtención de datos con el uso exclusivo de demoras, se hace necesario realizar cambios de rumbo o velocidad para poder obtener una solución completa. Esto lo convierte en un proceso lento, pues hay que esperar a que se realice la maniobra y se establezca de nuevo la plataforma. En el caso de añadir la variación de frecuencia (Doppler) al método, se puede reducir considerablemente el tiempo, ya que no hace falta maniobrar la plataforma, aunque se necesita un sonar más capaz. Por último, si contamos con inteligencia del blanco, se reduce aún más el tiempo para obtener la cinemática del blanco. El mayor problema de este método es disponer de dicha información y ser capaz de asociarla a una señal sonora.

	SOLO DEMORAS	CON TPK	CON FRECUENCIA
Rapidez	Lento (se necesita realizar una maniobra)	Medio (se necesita identificar contacto y calcular RPM)	Rápido
Datos necesarios	Sólo necesita demoras	Necesita inteligencia previa (TPK)	Necesita demoras y frecuencias medidas
Precisión	Media-baja	Alta	Media-alta
Otros		Posibilidad de dos soluciones	Totalmente automatizable

Comparativa de los tres métodos propuestos. (Elaboración propia)

En todos los métodos se parte de una aproximación a un conjunto de demoras. Para que este primer paso dé buenos resultados es necesario que exista una variación entre las demoras muestreadas superior al error asumido. Es decir, si nuestro conjunto de equipo sonar y operador obtiene demoras con un error de  $\pm 0,2$  grados, debemos tomar muestras que tengan, al menos, 0,5 grados de separación. Lo mismo ocurre con la aproximación de las frecuencias medidas.

En conclusión, hay que tener en cuenta las limitaciones de los equipos actuales y elegir el método que se adapte de manera más eficiente a cada situación. Aunque todos estos métodos se han enfocado al sonar pasivo, pueden ser igualmente útiles para utilizar en un equipo de detección pasiva de guerra electrónica. Perfeccionando esta técnica se podría llegar a prescindir del uso de los radares y ganar una gran ventaja táctica sobre un adversario.