

# ***NAVIGATIONAL ALGORITHMS***

## ***Cinemática Naval***



© Andrés Ruiz  
San Sebastián – Donostia  
43° 19'N 002°W

<http://www.geocities.com/andresruizgonzalez>

## **Indice**

<b>Movimiento absoluto y movimiento relativo.....</b>	<b>3</b>
Hipótesis en cinemática náutica .....	3
El vector velocidad.....	3
Movimiento relativo de otro buque.....	3
Triángulo de velocidades.....	4
El viento y la corriente.....	4
<b>Problemas.....</b>	<b>5</b>
La rosa de maniobra .....	5
Posiciones absolutas correspondientes a una determinada posición relativa .....	6
Rumbo y velocidad de otro buque conocido su movimiento relativo .....	7
Instante en que otro buque se encontrará a una distancia d de nosotros .....	8
Instante en que otro buque nos pasa por la proa.....	9
Alcances.....	10
Alcance de un buque en el menor tiempo posible.....	11
Alcance de un buque sin variar nuestro rumbo .....	12
Alcance de un buque en un tiempo determinado .....	13
Rumbo para pasar a una distancia determinada de otro buque .....	14
<b>Cinemática RADAR.....</b>	<b>15</b>
El RADAR .....	15
Punteo en movimiento relativo .....	15
Efectos de la maniobra del buque propio .....	15
RADAR ARPA.....	15
<b>Otros cálculos cinemáticos .....</b>	<b>16</b>
Viento real y viento aparente .....	16
Corrientes marinas.....	16
<b>Bibliografía .....</b>	<b>17</b>

© Andrés Ruiz  
 Junio 2000  
 San Sebastián – Donostia  
 43° 19'N 002°W  
<http://www.geocities.com/andresruizgonzalez/>  
 Versión: 200801

# Movimiento absoluto y movimiento relativo

La cinemática es la parte de la mecánica clásica que estudia el movimiento de los cuerpos sin tener en cuenta las causas que lo producen limitándose, esencialmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo.

La **cinemática naval** estudia el movimiento relativo entre dos embarcaciones que evolucionan con sus respectivos rumbos y velocidades.

El **Movimiento absoluto** de una embarcación es el movimiento que esta sigue respecto al fondo de la mar o con relación a tierra firme. Su rumbo y velocidad serán verdaderos.

El **Movimiento aparente** o **relativo** es el que efectúa una embarcación vista desde otra, cuando cada una de ellas se mueve independientemente. Sus rumbos y velocidades serán relativos o aparentes.

## Hipótesis en cinemática náutica

Para simplificar la resolución de los problemas planteados en cinemática náutica se hacen las siguientes hipótesis:

- Movimiento rectilíneo uniforme. Los barcos se mueven siguiendo derrotas rectas y a velocidad uniforme,  $V = \text{cte}$ . Se *desprecian los cambios de rumbo o guiñadas y frenazos o acelerones debidos a las olas*.
- El cambio de rumbo tiene lugar instantáneamente y ocurre sobre el eje que pasa por el centro de gravedad de la embarcación; se desprecia la existencia de la *curva de evolución* en el giro del barco.
- Los cambios de velocidad son instantáneos.

## El vector velocidad

la velocidad de un móvil es una magnitud vectorial. Debe considerarse no sólo la distancia que recorre por unidad de tiempo, es decir su velocidad, sino también la dirección y el sentido del desplazamiento.

$\vec{V}$

- Magnitud, módulo o intensidad.  $V = d/t$
- Dirección y sentido, *en navegación definidos por el rumbo*.

## Movimiento relativo de otro buque

La posición relativa de un buque B respecto de otro A, queda determinada por la demora y la distancia de A a B.

El problema de dos barcos moviéndose con respecto al fondo con velocidades  $\vec{V}_A$  y  $\vec{V}_B$ , se reduce a otro en el que nuestro barco A no se mueve y el barco B se mueve respecto a nosotros con velocidad  $\vec{V}_r$ .

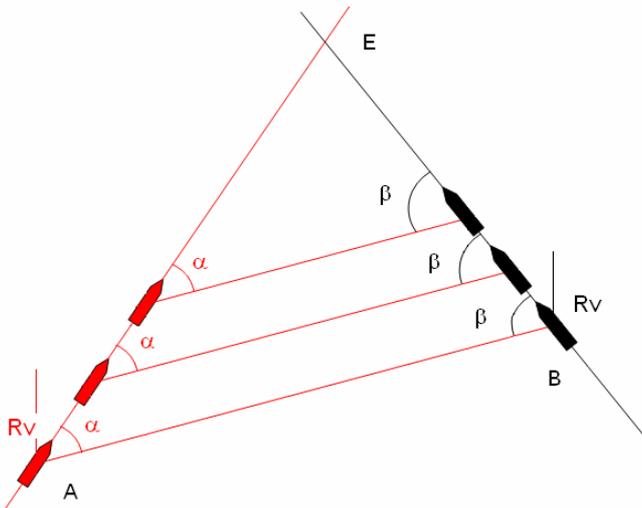
$$\vec{V}_r = \vec{V}_B - \vec{V}_A$$

La ecuación vectorial del movimiento relativo, en el plano 2D, relaciona 6 variables, y permite calcular 2 incógnitas, de forma gráfica o analítica, conocidas las otras 4 variables.

El vector  $\vec{V}_r$  ó  $\vec{V}_{B/A}$  describe el movimiento aparente de B respecto de A. La velocidad con la que el barco B se mueve respecto al barco A. O lo que es lo mismo; la velocidad con que vemos moverse al barco B, desde el A.

Su módulo  $V_r$ , es la velocidad en nudos con la que el barco B se mueve con respecto a nosotros.

El movimiento relativo del barco B es el que determinará si existe riesgo de colisión con él y, por tanto, si se ha de efectuar alguna maniobra de evasión.



Rumbo de colisión entre los buques A y B

La **derrota relativa** o **indicatriz del movimiento relativo**, es la dirección definida por el vector  $V_r$ .

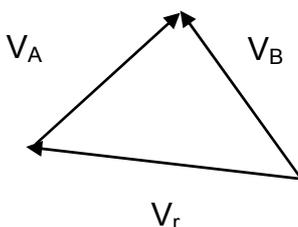
- Si esta derrota pasa por el punto A se lleva **rumbo de colisión** con el barco B.
- Si no pasa por A, la **mínima distancia** a la que pasaremos del barco B es la definida por la perpendicular a la derrota relativa que pase por nuestro barco A

## Triángulo de velocidades

Es el triángulo formado por los tres vectores que intervienen en la ecuación del movimiento relativo:

$$\vec{V}_r = \vec{V}_B - \vec{V}_A$$

	Vector	Módulo	Sentido
Velocidad del buque propio	$\vec{V}_A$	$V_A$	$R_A$
Velocidad del otro buque	$\vec{V}_B$	$V_B$	$R_B$
Velocidad relativa de B respecto a A	$\vec{V}_r$	$V_r$	$R_r$



## El viento y la corriente

El movimiento relativo de un buque respecto a otro no cambia si ambos se ven sometidos a un mismo movimiento común debido, por ejemplo, a la existencia de una corriente en la zona.

En la ecuación vectorial del movimiento relativo,  $\vec{V}_r = \vec{V}_B - \vec{V}_A$  los rumbos de los buques A y B, son los rumbos verdaderos corregidos por abatimiento si existe viento; rumbos de superficie. Pero no se tendrá en cuenta la corriente si esta existiese.

En cambio, en el estudio del movimiento absoluto, si debe ser tomada en cuenta la corriente.

# Problemas

Se consideran los siguientes tipos de cálculos en cinemática naval:

¿? Incógnita

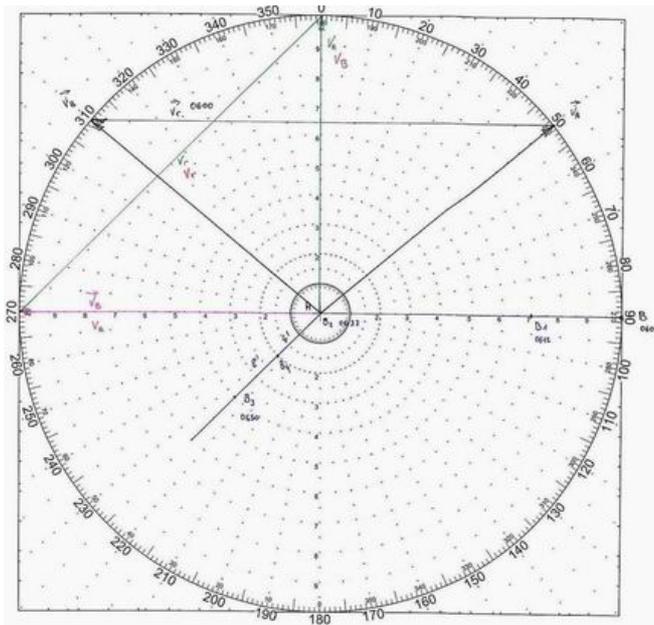
Problema	$V_A$		$V_B$		$V_r$	
Movimiento relativo de otro buque	$R_A$	$V_A$	$R_B$	$V_B$	$R_r$	$V_r$
Instante en que otro buque se encontrará a una distancia $d$ de nosotros	$R_A$	$V_A$	$R_B$	$V_B$	$R_r$	$V_r$
Instante en que otro buque nos pasa por la proa	$R_A$	$V_A$	$R_B$	$V_B$	$R_r$	$V_r$
Rumbo y velocidad de otro buque conocido su movimiento relativo	$R_A$	$V_A$	$R_B$	$V_B$	$R_r$	$V_r$
Alcance de un buque en el menor tiempo posible	$R_A$	$V_A$	$R_B$	$V_B$	$R_r$	$V_r$
Alcance de un buque sin variar nuestro rumbo	$R_A$	$V_A$	$R_B$	$V_B$	$R_r$	$V_r$
Alcance de un buque en un tiempo determinado	$R_A$	$V_A$	$R_B$	$V_B$	$R_r$	$V_r$
Rumbo para pasar a una distancia determinada de otro buque	$R_A$	$V_A$	$R_B$	$V_B$	$R_r$	$V_r$

En las figuras se utilizan distintos colores para dibujar:

- Negro: velocidad  $\vec{V}$
- Rojo: ¿incógnitas?
- Azul: posición, distancias

## La rosa de maniobra

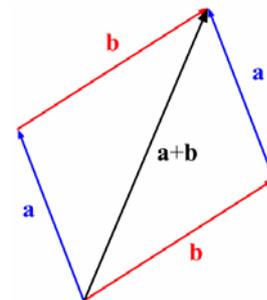
Consiste en una circunferencia graduada con los rumbos y distintas escalas para las velocidades y distancias.



Es utilizada para resolver de forma grafica los problemas de cinemática:

- **Distancias.** Se supone el buque propio, A, fijo en el centro de la rosa de maniobras. Las distintas posiciones relativas de B están localizadas sobre la derrota relativa definida por  $\vec{V}_r$ .
- **Velocidades.** Se resuelve la ecuación vectorial del movimiento relativo para las dos incógnitas del problema.
- **Tiempos:**  $t = d_r/V_r$

La suma gráfica de vectores se efectúa como se indica en la figura:



En cinemática RADAR, se emplea para dibujar, (*puntear*), las distintas demoras y distancias a otro buque, obtenidas a lo largo de un intervalo de tiempo, a partir de una posición inicial, y poder estudiar su movimiento.

## Posiciones absolutas correspondientes a una determinada posición relativa

### Datos / Incógnitas

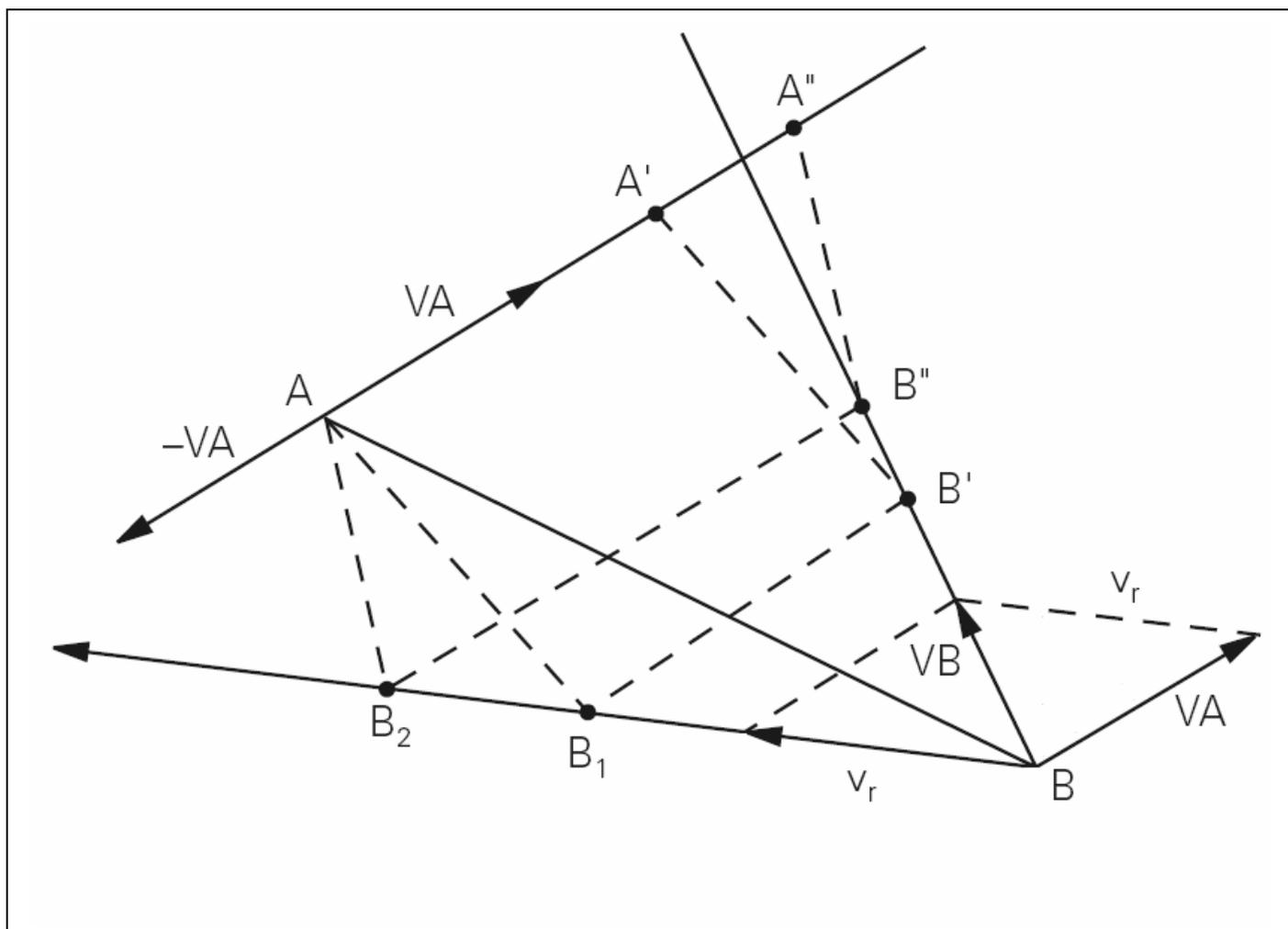
- Posición absoluta del buque A y B
- Movimiento relativo:  $B_1, B_2$
- ¿Posiciones absolutas de A y B, correspondientes a esos instantes de tiempo?

### Cálculos

- $R_r = B_1 B_2 =$  Derrota relativa
- $V_r = B_1 B_2 / (t_2 - t_1)$
- $\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{V}_r$

Posiciones absolutas correspondientes al instante  $B_1$ :

- $[B_1 // R_A] \cap$  derrota B =  $B'$
- $[B' // D_{AB1}] \cap$  derrota A =  $A'$



## Rumbo y velocidad de otro buque conocido su movimiento relativo

### Cinemática RADAR

El RADAR proporciona las posiciones relativas de B:

- $B_1(t_1) = ( D_{AB}(t_1), d_{AB}(t_1) )$
- $B_2(t_2) = ( D_{AB}(t_2), d_{AB}(t_2) )$

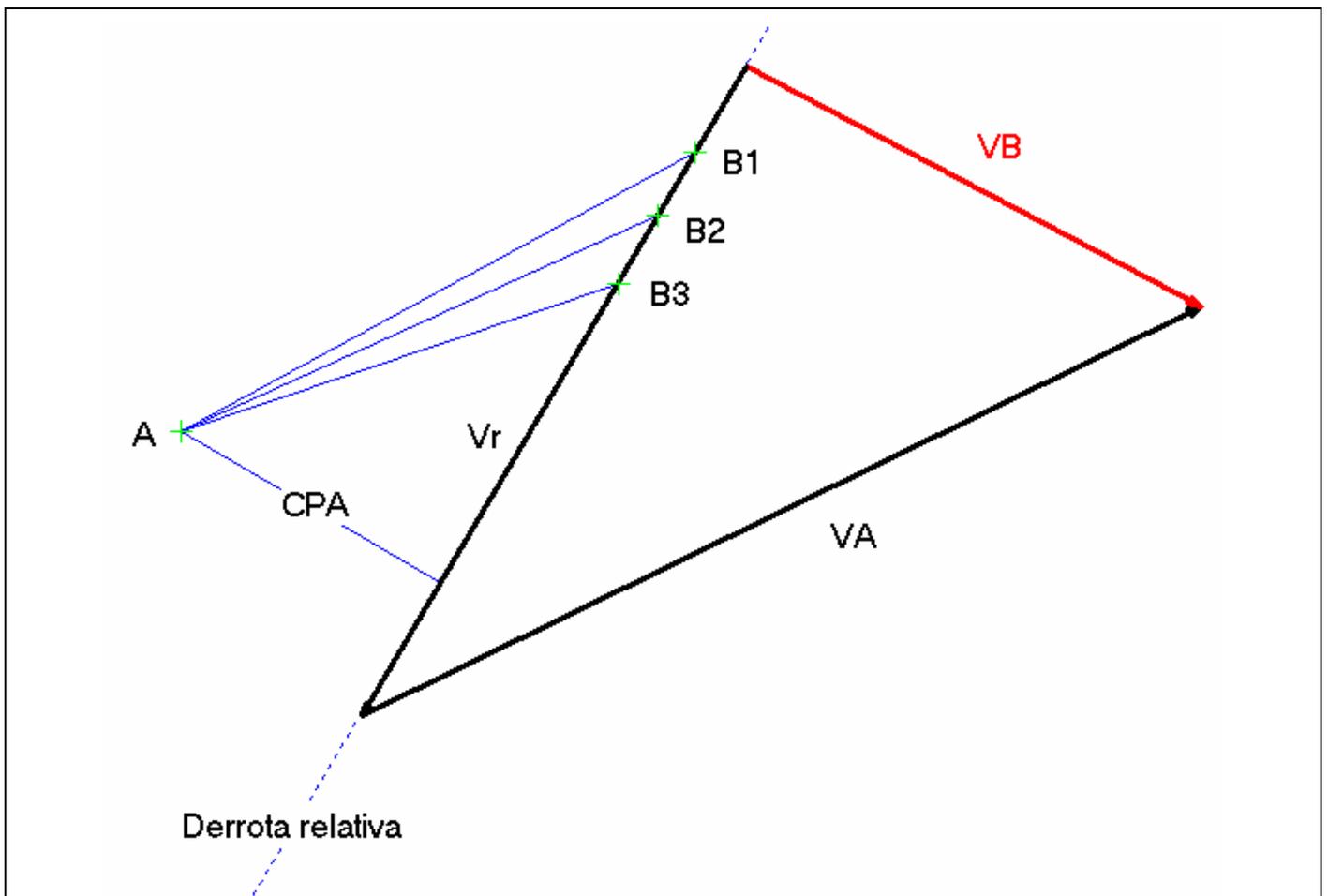
Conociendo el movimiento de nuestro buque y el movimiento relativo de otra embarcación respecto a nosotros, es posible calcular las posiciones del otro buque a una hora determinada, o al encontrarse en una demora o distancia dada.

#### Datos / Incógnitas

$R_A$     $V_A$   
 $R_B$     $V_B$   
 $R_r$     $V_r$

#### Cálculos

- $R_r = B_1 B_2 =$  Derrota relativa
  - $V_r = B_1 B_2 / (t_2 - t_1)$
  - $\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{V}_r$
- CPA =  $\perp$  por A a la indicatriz =  $d_{\min}$



## Instante en que otro buque se encontrará a una distancia $d$ de nosotros

### Datos / Incógnitas

- Posición de B respecto de A: (  $D_{AB}$ ,  $d_{AB}$  )
- $d$

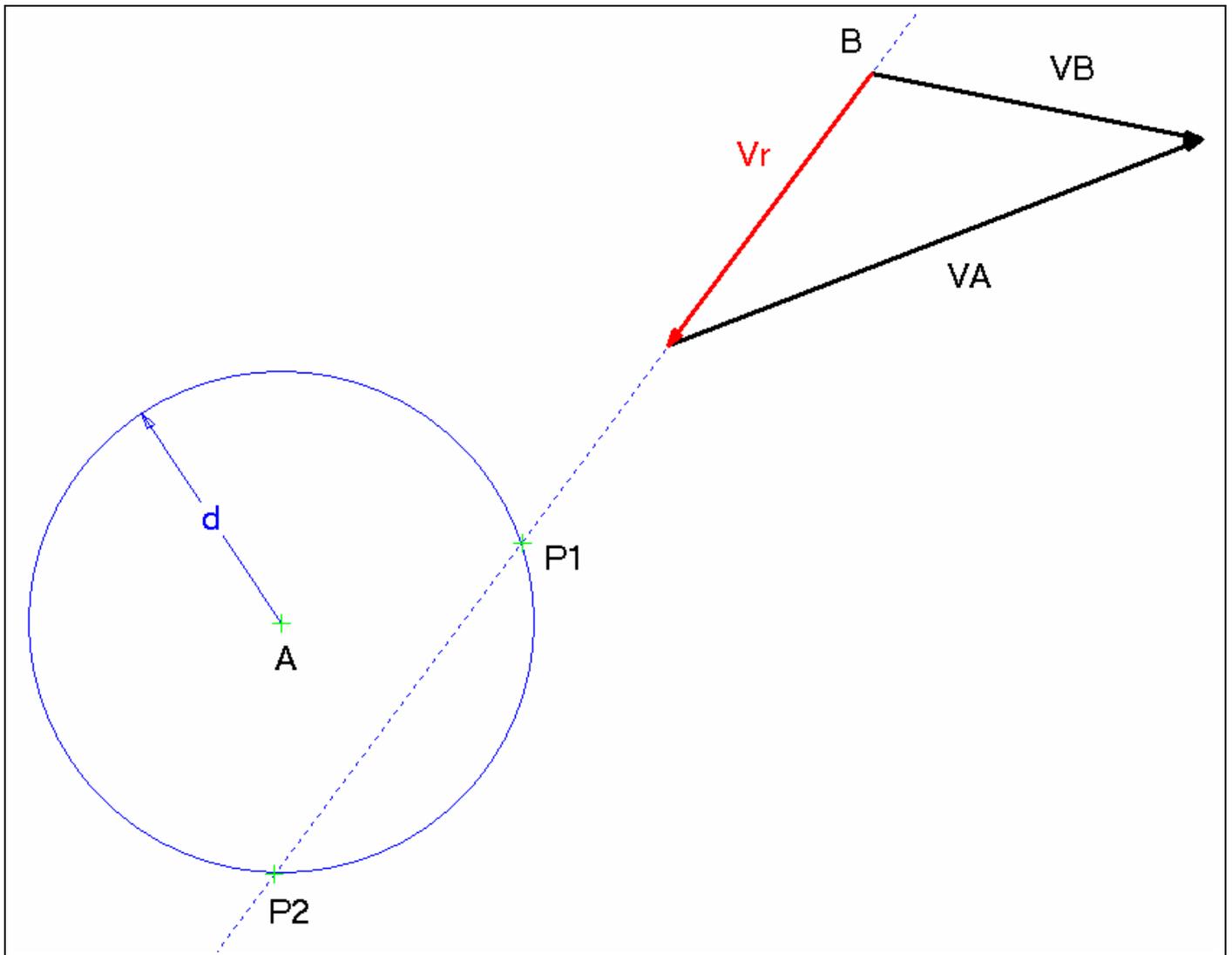
$R_A$     $V_A$

$R_B$     $V_B$

$R_r$     $V_r$

### Cálculos

- $\vec{V}_r = \vec{V}_B - \vec{V}_A$
- $t_c = BP1 / V_r$
- 2 soluciones: P1 y P2



## Instante en que otro buque nos pasa por la proa

### Datos / Incógnitas

- Posición de B respecto de A:  $(D_{AB}, d_{AB})$

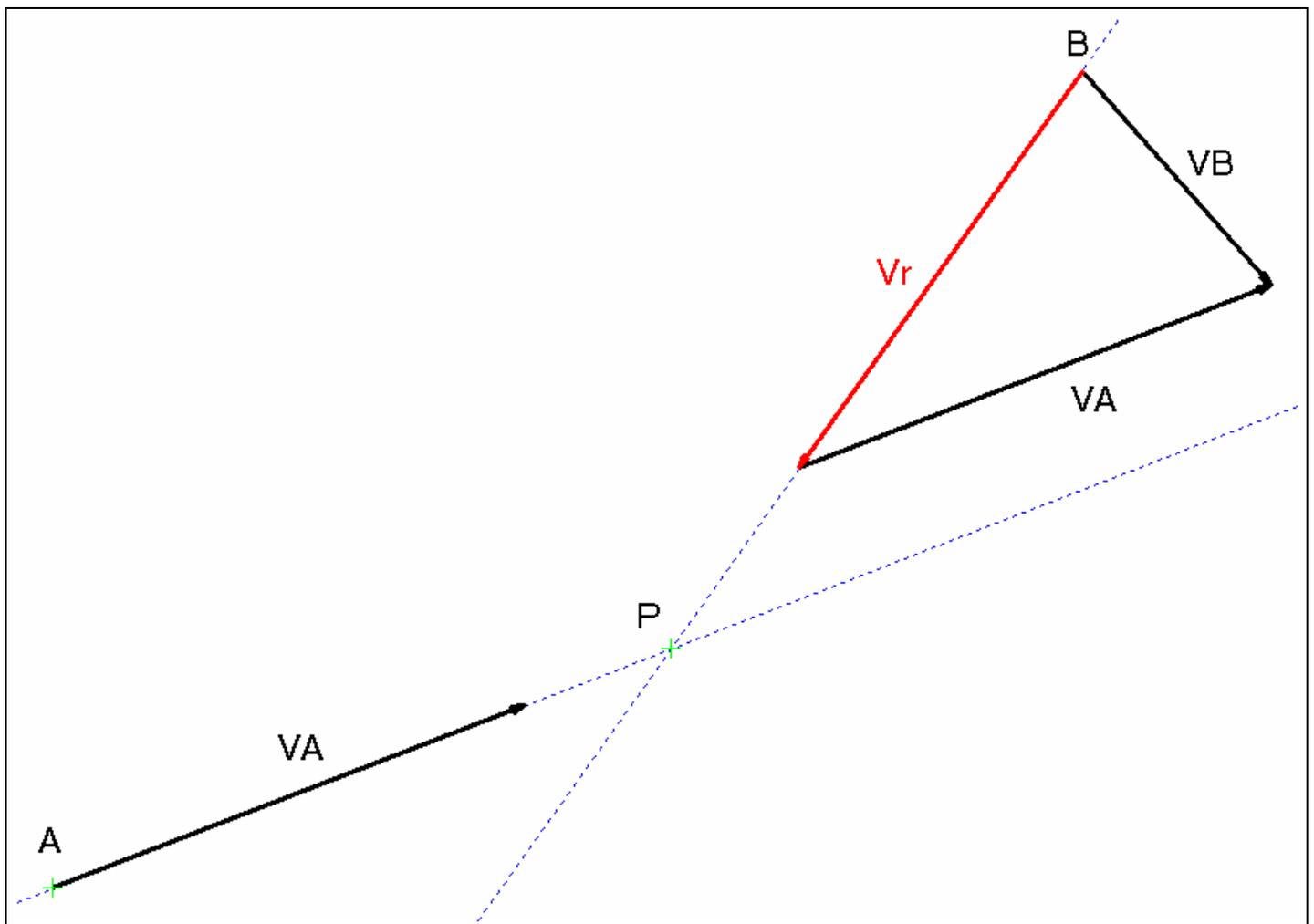
$R_A$     $V_A$

$R_B$     $V_B$

$R_r$     $V_r$

### Cálculos

- Dirección requerida: proa, popa, través, MAB
- $\vec{V}_r = \vec{V}_B - \vec{V}_A$
- $R_r =$  indicatriz
- $P = \vec{V}_r \text{ por } B \cap \vec{V}_A \text{ por } A$
- $t = BP / V_r$



## Alcances

Para dar alcance a un buque de situación, rumbo y velocidad conocidos, hay que maniobrar de forma que la demora,  $D_{AB}$ , del otro buque no varíe, y que la distancia entre ambos vaya disminuyendo.

La posición de A esta incluida en la derrota relativa definida por  $\vec{V}_r$ , y el rumbo propio,  $R_A$ , recibe el nombre de *rumbo de colisión*.

En este tipo de problemas se conoce, (*Previamente calculada por cinemática RADAR*):

- Posición de B
- $R_B$  y  $V_B$
- $R_r = D_{AB} = D_{B/A}$  = indicatriz del movimiento relativo

Se dan situaciones en las que la maniobra de alcance no es premeditada. Cuando la demora se mantiene y la distancia disminuye, existe riesgo de colisión. La forma de actuar cuando se determina una situación de riesgo de abordaje es la siguiente:

### **Evasión variando el rumbo**

La maniobra, que en la mayoría de las ocasiones, será caer a estribor, se realizará con el tiempo suficiente para evitar el siniestro, calculando en primer lugar el nuevo rumbo relativo que le queremos dar a la embarcación B. La velocidad se mantiene.

### **Evasión variando la velocidad**

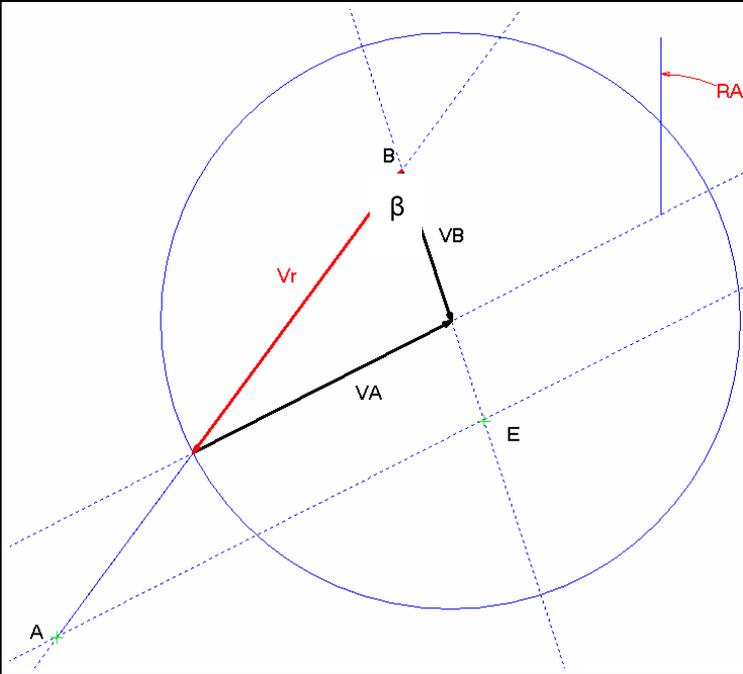
Se altera solamente la velocidad. El rumbo se mantiene.

En cada caso se ha de determinar que es lo más adecuado.

# Alcance de un buque en el menor tiempo posible

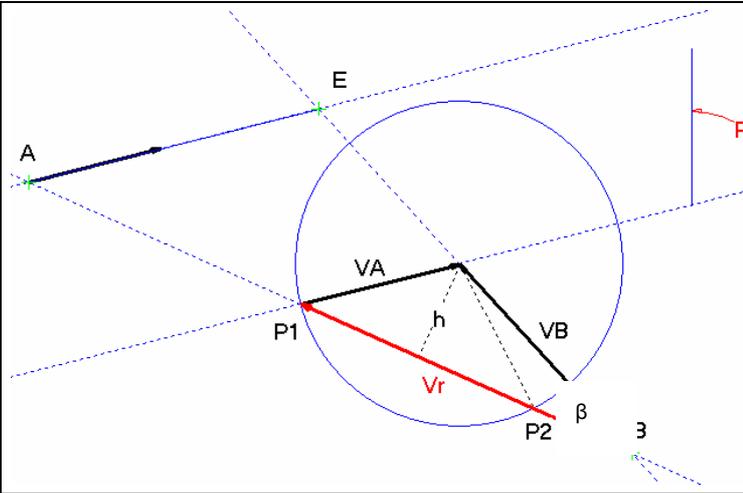
Datos / Incógnitas	
• Posición inicial de A y B	
• Posición de B respecto de A: ( $D_{AB}$ , $d_{AB}$ )	
$R_A$ $V_A$	
$R_B$ $V_B$	
$R_r$ $V_r$	

Cálculos
• $R_r = BA$
• Circunferencia de radio $V_A$ por el extremo de $V_B$
• $R_A = R_{colision}$
• $t = BA / V_r$ <i>tiempo de alcance</i>



**Aspecto:** marcación de B al buque A, ángulo  $\beta$ . Es la apariencia con que B se ve desde A

Si  $\beta \geq 90^\circ$  la derrota de A y B son paralelas:  $V_r = 0$  y el alcance se da en el infinito.



**Condiciones para que existe solución:**

- $V_A > V_B$  siempre
- $V_A = V_B$  si  $\beta < 90^\circ$
- $V_A < V_B$  si  $\beta < 90^\circ$  y  $V_A \geq h$ 
  - $V_A = h$   $R_A \perp R_r$   $V_A = \min$
  - $V_A > h$  2 soluciones
    - P1  $V_r = \max$   $t = \min$
    - P2  $V_r = \min$   $t = \max$

## Alcance de un buque sin variar nuestro rumbo

### Datos / Incógnitas

- Posición inicial de A y B
- Posición de B respecto de A:  $(D_{AB}, d_{AB})$

$R_A$   $V_A$

$R_B$   $V_B$

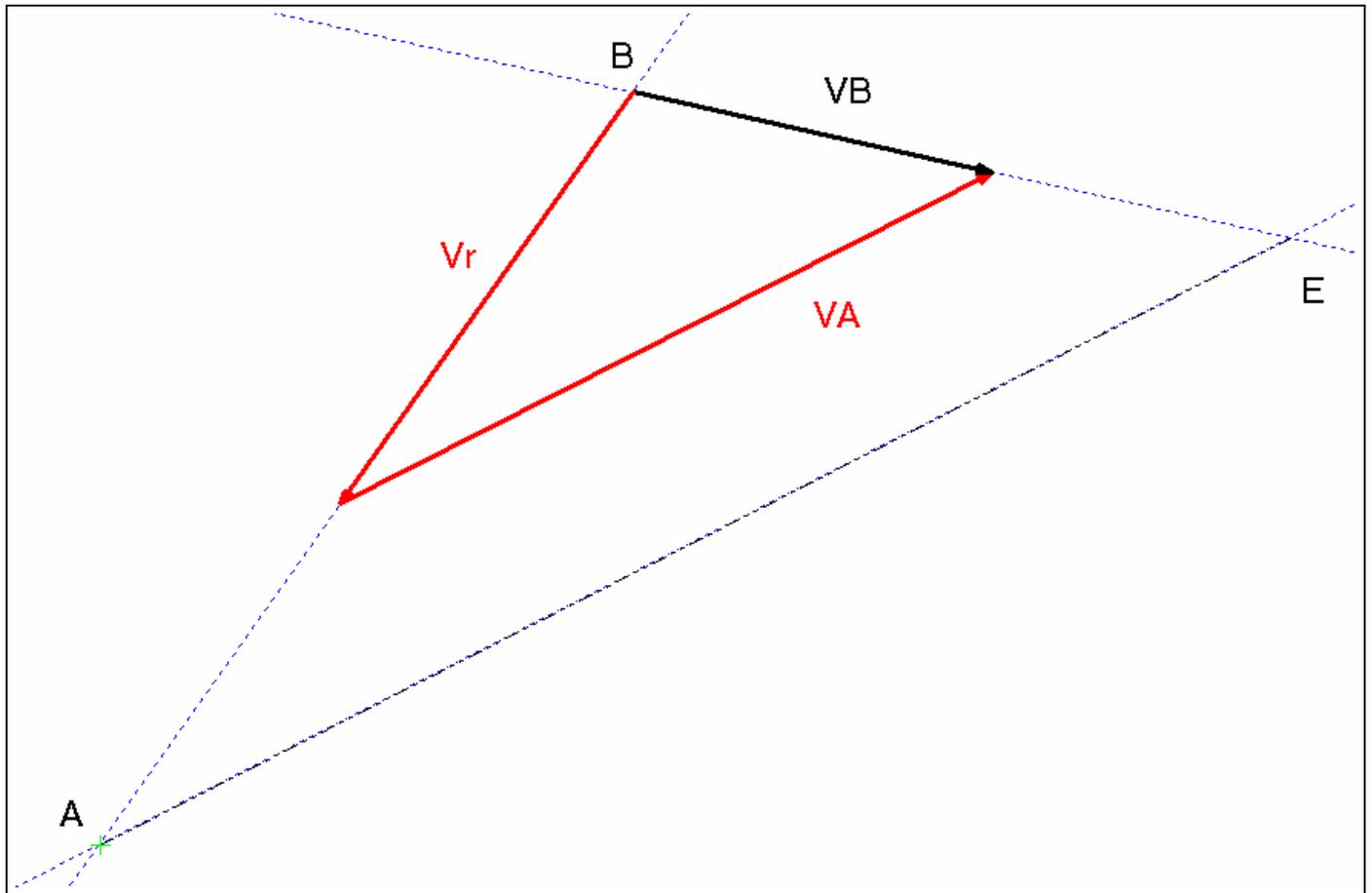
$R_r$   $V_r$

### Cálculos

Existe solución si ambas derrotas son convergentes.

- $R_r = BA$
- $RA = R_{colisión}$
- Paralela a  $R_A$ , por el extremo de  $V_B$
- $E = \text{derrota } A \cap \text{derrota } B \text{ (absolutas)}$
- $t = BA/V_r = AE/V_A = BE/V_B$

Se debe cumplir:  $V_A \leq V_{propulsora}$



## Alcance de un buque en un tiempo determinado

### Datos / Incógnitas

- Posición inicial de A y B
- Posición de B respecto de A: (  $D_{AB}$ ,  $d_{AB}$  )
- t

$R_A$     $V_A$

$R_B$     $V_B$

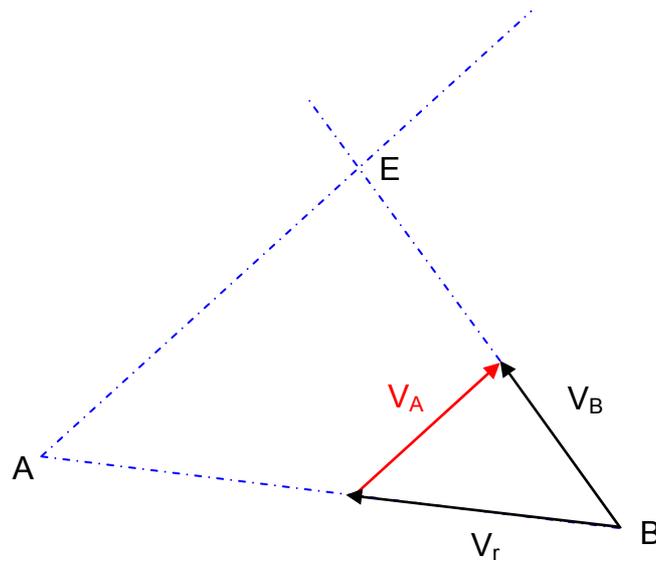
$R_r$     $V_r$

### Cálculos

- $R_r = BA$
- $V_r = BA / t$
- $\vec{V}_A = \vec{V}_B - \vec{V}_r$

E: punto de encuentro de los dos buques

Se debe cumplir:  $V_A \leq V_{propulsora}$



# Rumbo para pasar a una distancia determinada de otro buque

## Datos / Incógnitas

- Posición inicial de A y B
- Posición de B respecto de A: (  $D_{AB}$ ,  $d_{AB}$  )
- $d$

$R_A$   $V_A$

$R_B$   $V_B$

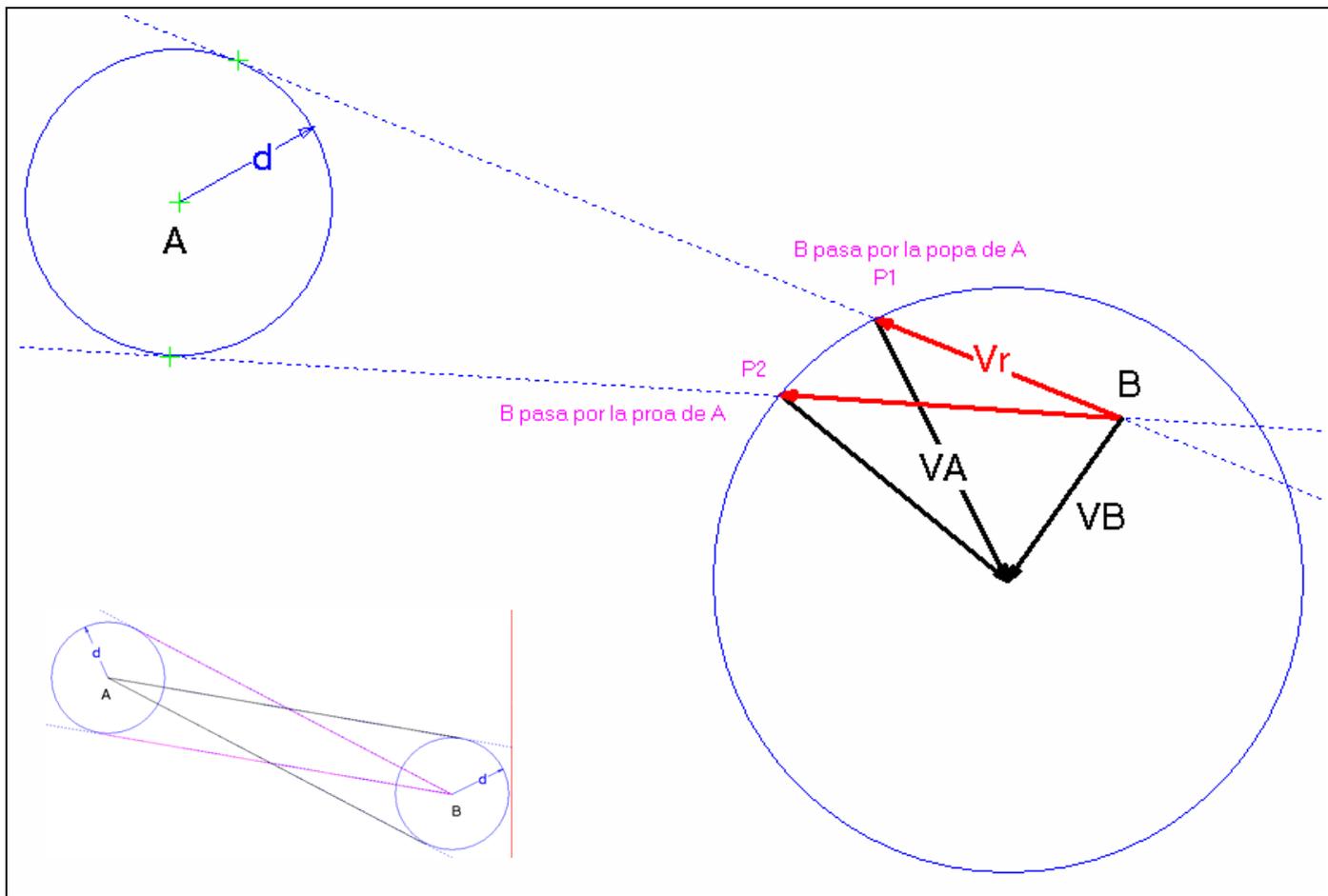
$R_r$   $V_r$

## Cálculos

Para estudiar el movimiento supóngase que  $V_A=0$ , y que B se mueve con  $V_B=V_r$ , y pasa a una distancia  $d$  de A.

Con  $d = 0$ , es un problema análogo al del alcance

- $R_r = \text{Indicatriz} = B$ ,  $\text{tg}(\text{circulo } d \text{ por } A)$  ó
- $R_r = \text{Indicatriz} = A$ ,  $\text{tg}(\text{circulo } d \text{ por } B)$
- 2 soluciones P1 y P2 para  $R_r$   $V_r$  y  $R_A$   
(Para  $t = \min$  tomar la  $V_r = \max$ )



# Cinemática RADAR

## El RADAR

El término RADAR deriva del acrónimo inglés **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anking, (detección y medición de distancias por radio). Es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados, formaciones meteorológicas y el propio terreno. Su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio, que se refleja en el objetivo y se recibe en la misma posición del emisor. A partir de este eco se extrae gran cantidad de información.

En navegación se utiliza para **evitar colisiones** en situaciones de tráfico denso, con visibilidad reducida, con niebla, o de noche; (*SOLAS y Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes*). Sus funciones principales son:

- Detección de objetos: costa, embarcaciones, obstáculos,...
- Obtención de líneas de posición: distancia y demora.
- Obtención de información acerca del movimiento de los buques cercanos.

## Punteo en movimiento relativo

La técnica por la que se extrae, procesa y analiza la información obtenida de RADAR se conoce como *plotting* o *punteo*.

Para cálculos cinemáticos el RADAR se utiliza generalmente en:

- Movimiento relativo: El barco aparece fijo en el centro de la pantalla
- Norte arriba: la pantalla no cambia con el rumbo, (*Es necesario que este conectado a una aguja giroscópica*).

Se utiliza la siguiente sintaxis:

- **WO:** *Way Own Ship* =  $\vec{V}_A$
- **WA:** *Way Another Ship* =  $\vec{V}_B$
- **OA:** *Origin Apparent motion* =  $\vec{V}_r$
- **CPA:** *Closest Point of Approach* - mínima distancia a la que la embarcación B pasará de A.
- **TCPA:** *Time to CPA* - intervalo de tiempo en el que el buque B estará a la mínima distancia.

La información obtenida es: velocidad aparente del eco, velocidad absoluta del eco, naturaleza del eco, marcación y distancia del eco, CPA, TCPA.

## Efectos de la maniobra del buque propio

Suponiendo que no varía el movimiento real de los ecos; WA se mantiene, se pueden dar dos situaciones en donde el triángulo de velocidades se altera cambiando la derrota aparente de los ecos:

### Cambio de rumbo

El vector WO gira respecto al punto W

### Cambio de velocidad

El punto O se traslada según WO.

## RADAR ARPA

*Automatic RADAR plotting Aid*

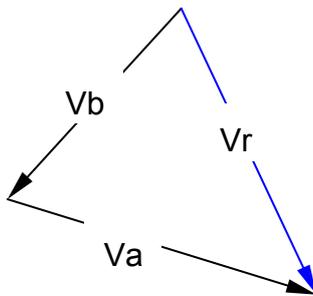
Este tipo de sistemas proporcionan de forma automática las velocidades absolutas y relativas de los ecos percibidos en pantalla, así como los distintos CPA y TCPA. Están provistos de diversas alarmas acústicas y ópticas que se activan cuando un eco invade el círculo de seguridad definido para el buque propio (diámetro > 3 mn).

# Otros cálculos cinemáticos

## Viento real y viento aparente

	Vector	Módulo	Sentido
Viento real	$\vec{V}_r$	Vr	Rr
Viento aparente	$\vec{V}_{ap}$	Vap	Rap
Velocidad de la embarcación	$\vec{V}_b$	Vb	Rb

$$\vec{V}_r = \vec{V}_{ap} + \vec{V}_b$$

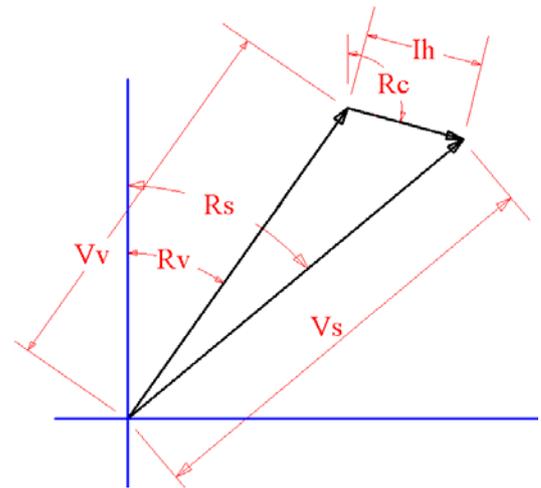


El viento aparente es el medido a bordo de la embarcación.

## Corrientes marinas

	Vector	Módulo	Sentido
Corredera	$\vec{V}_v$	Vv	Rv
Corriente	$\vec{I}h$	Ih	Rc
Embarcación sobre el fondo	$\vec{V}_e$	Vs	Rs

$$\vec{V}_e = \vec{V}_v + \vec{I}h$$



La corriente se caracteriza por:

- Ih – Intensidad horaria
- Rc – rumbo de la corriente

## Bibliografía

1. Manual de Navegación. Martínez Jiménez, Enrique, 1978. ISBN: 84-400-5327-4
2. La calculadora a bordo. Ignacio Barbudo
3. Cinemática náutica. E. García, A. C. Bermejo, A. J. Poleo
4. Navigation and Piloting Dutton 14th ed. ISBN: 0-87021-157-9
5. Astronomía náutica y navegación I y II. Fausto Castelló Mora
6. Astronomía náutica y navegación. Moreu Curbera