

Estudio de las áreas de peligro previstas (PADs) con el objetivo de poder ser tratadas como áreas a evitar en el ECDIS

TRABAJO FINAL DE GRADO



Facultad de Náutica de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña

Trabajo realizado por:
DIEGO GARCÍA SÁNCHEZ

Dirigido por:
JORGE MONCUNILL MARIMÓN

Grado en Náutica y Transporte Marítimo

Barcelona, 10 de enero de 2020

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas



Agradecimientos

La elaboración de este TFG cierra una de las etapas más bonitas de mi vida. Mi pasión por la mar es vocacional y viene desde pequeño, aun no teniendo ningún antecedente familiar en la profesión naval. Tras mis inicios en la Facultad de Náutica de Barcelona (FNB), nunca imaginé llegar hasta donde he llegado hoy. He de reconocer que el camino hasta aquí no ha sido fácil. Esta carrera requiere vocación y sacrificio, además de conocimiento, y es a este último aspecto al que me quiero referir de ahora en adelante.

Han sido muchas las personas que han aportado sus conocimientos a mi formación académica (e incluso personal) y me sería imposible citarlas a todas. Por ello, de antemano hago una mención general a todas ellas, gracias a las cuales, el espíritu de la Institución irá conmigo allá donde vaya, en mi compromiso personal al desempeñar la profesión para la cual he sido formado.

De forma especial, quiero agradecer la encomiable dedicación que realiza el decano de la Facultad, el capitán D. Agustí Martín Mallofré, por su buen criterio y buen hacer, que en mi opinión, está llevando esta institución a altos niveles de profesionalidad, sin menospreciar la larga trayectoria de los decanos anteriores de la FNB.

Asimismo, este trabajo no se hubiese podido llevar a cabo sin la inestimable ayuda del profesor y capitán D. Jorge Moncunill Marimón, por su supervisión, consejos y evaluación continua, que han motivado, si más cabe, un mayor interés en la elaboración y en la profundización sobre el tema trabajado. Cada reunión incrementaba mi curiosidad y mi interés por llevar este TFG a buen puerto.

Finalmente, agradezco a mi familia su constante e incondicional apoyo, así como el hecho de saber transmitirme los valores que hoy me definen como persona.



Resumen

En este TFG, se analizan las *áreas de peligro previstas* (PAD: *Predicted Area of Danger*) asociadas a los ecos de la ARPA. Se entiende por PAD la zona donde existe un riesgo de abordaje alrededor de un *punto de posible colisión* (PPC: *Point of Possible Collision*). El objetivo es poder considerar las PADs como *áreas a evitar* en el ECDIS. De esta manera, se obtendría una ayuda anticolidión en la que el concepto de *riesgo de abordaje* se traduciría en un *área geográfica*. Puesto que el sistema de alarmas del ECDIS se basa principalmente en la determinación de *áreas a evitar*, la inclusión de las PADs de los buques sería totalmente coherente con el funcionamiento del ECDIS.

En primer lugar, se ha realizado una breve explicación sobre los fundamentos del radar, en lo referente a la obtención de la demora y la distancia de un eco, así como a los errores en su detención y a los falsos ecos.

En segundo lugar, se han tratado los aspectos básicos de la cinemática naval, enfocada a la prevención de abordajes, a fin de introducir los conceptos de PPC y PAD. A continuación, se ha realizado un estudio basado en casos prácticos, donde se analiza la casuística de las PADs. Todo este desarrollo ha sido de tipo gráfico sobre la *rosa de maniobra*, y constituye el núcleo central del TFG.

En tercer lugar, se ha tratado la cinemática naval de forma analítica, ya que el tratamiento de los datos que debería realizar el sistema ECDIS, al igual que el de la ARPA, es de este tipo. Para ello, se ha aplicado la geometría analítica en un espacio euclídeo bidimensional, en conjunción con las fórmulas de navegación de estima. Con este tratamiento, queda sentada la base para desarrollar una capa en el ECDIS que contenga las PADs de los ecos de la ARPA.

Finalmente, se ha realizado una propuesta de cómo podría ser la selección, visualización y alarma de PADs en el ECDIS.

Resum

En aquest TFG, s'analitzen les àrees en perill previstes (PAD: *Predicted Area of Danger*) associades als ecos de l'ARPA. S'entén per PAD la zona on existeix un risc d'abordatge al voltant d'un punt de possible col·lisió (PPC: *Point of Possible Collision*). L'objectiu és poder considerar les PADs com àrees a evitar a l'ECDIS. D'aquesta manera, s'obtidria un ajut anticol·lisió en el que el concepte de *risc d'abordatge* es traduiria en una *àrea geogràfica*. Atès que el sistema d'alarmes de l'ECDIS es basa principalment en la determinació d'àrees a evitar, la inclusió de les PADs dels vaixells seria totalment coherent amb el funcionament de l'ECDIS.

En primer lloc, s'ha realitzat una breu explicació sobre els fonaments del radar, pel que fa a l'obtenció de la demora i la distància d'un eco, així com als errors en la seva detecció i als falsos ecos.

En segon lloc, s'han tractat els aspectes bàsics de la cinemàtica naval, enfocada a la prevenció d'abordatges, a fi d'introduir els conceptes de PPC i PAD. A continuació, s'ha realitzat un estudi basat en casos pràctics, on s'analitza la casuística de les PADs. Tot aquest desenvolupament ha estat de tipus gràfic sobre la rosa de maniobra, i constitueix el nucli central del TFG.

En tercer lloc, s'ha tractat la cinemàtica naval de forma analítica, ja que el tractament de les dades que hauria de realitzar el sistema ECDIS, a l'igual que el de l'ARPA, es d'aquest tipus. Per això, s'ha aplicat la geometria analítica en un espai euclidi bidimensional, en conjunció amb fórmules de navegació d'estima. Amb aquest tractament, queda assentada la base per desenvolupar una capa en l'ECDIS que contingui les PADs dels ecos de l'ARPA.

Finalment, s'ha realitzat una proposta de com podria ser la selecció, visualització i alarma de PADs a l'ECDIS.

Abstract

In this TFG, the *predicted areas of danger* (PAD) associated with the ARPA's echoes are analysed. PAD is the area where there is a risk of collision around a *point of possible collision* (PPC). The objective consists in considering PADs as areas to be avoided in ECDIS. In this way, an anti-collision aid would be obtained, where the concept of *risk of collision* would be translated into a *geographical area*. Since the ECDIS alarm system is mainly based on the determination of areas to be avoided, the inclusion of the PADs of vessels would be totally coherent with the operation of the ECDIS.

First, a brief explanation has been made about the fundamentals of radar, in relation to obtaining the bearing and distance of an echo, as well as the errors in its detection and the false echoes.

Secondly, the basic aspects of naval kinematics, focused on the prevention of collisions, have been treated in order to introduce the concepts of PPC and PAD. Next, a study based on practical cases has been carried out, where all cases of PADs are analysed. All this development has been of graphic type on the manoeuvring board, and constitutes the central core of the TFG.

Thirdly, the naval kinematics has been treated analytically, since the treatment of the data that should be performed by the ECDIS system, like that of the ARPA, is of this type. For this purpose, the analytical geometry has been applied in a bidimensional Euclidean space, in conjunction with the dead reckoning formulae. With this treatment, the basis for developing a layer in the ECDIS containing the PADs of ARPA's echoes is laid.

Finally, a proposal has been made of how the selection, visualization and alarm of PADs in the ECDIS could be.

Tabla de contenidos

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	iii
Resum.....	iv
Abstract.....	v
Tabla de contenidos.....	vi
Objetivo y Motivación.....	ix
Metodología.....	x
Lista de siglas y nomenclatura.....	xi
Lista de figuras.....	xiv
Lista de tablas.....	xvi
Introducción.....	1
Capítulo 1. Principios fundamentales del radar.....	2
1-1 Introducción.....	2
1-2 Medición de la distancia a un blanco.....	2
1-2-1 La distancia en función del tiempo.....	2
1-2-2 La base de tiempo y su calibración.....	2
1-2-3 Pantalla sintética.....	3
1-3 Medida de la demora.....	4
1-3-1 Fundamento para la obtención de la demora.....	4
1-3-2 Almacenamiento de la demora en la pantalla sintética.....	4
1-4 Frecuencias de emisión de los radares marinos.....	6

Capítulo 2. Errores en la detección de blancos.....	8
2-1 Introducción.....	8
2-2 Error en el impulso radar.....	8
2-3 Falsos ecos.....	9
2-3-1 Ecos indirectos y ecos reflejados.....	9
2-3-2 Ecos múltiples.....	10
2-3-3 Ecos de segunda traza.....	11
2-3-4 Sectores ciegos y zonas de sombra.....	11
2-3-5 Ecos debido a los lóbulos laterales.....	12
Capítulo 3. Cinemática, PPCs y PADs.....	13
3-1 Introducción.....	13
3-2 Movimiento verdadero y relativo en el radar.....	14
3-2-1 Movimiento verdadero.....	14
3-2-2 Movimiento relativo.....	14
3-3 Rosa de maniobra.....	15
3-4 Triángulo de velocidades.....	15
3-5 Criterio de colores para representar el triángulo de velocidades y las PADs.....	16
3-6 Representación de casos básicos de cinemática náutica en la rosa de maniobra.....	16
3-6-1 Caso nº 1: Obtención del rumbo y velocidad de otro buque, conociendo su movimiento relativo.....	16
3-6-2 Caso nº 2: Obtención del rumbo para pasar a una distancia dada de otro buque.....	21
3-7 Estudio de los posibles puntos de colisión (PPCs) y de las áreas de peligro previstas (PADs).....	24
3-7-1 Posible punto de colisión (PPC).....	24
3-7-2 Área de peligro prevista (PAD).....	24
3-7-3 Caso nº 3: Situación del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD) en una situación genérica.....	24

3·7·4 Caso nº 4: Estudio de la PAD cuando $V_A > V_B$	27
3·7·5 Caso nº 5: Estudio de la PAD cuando $V_A < V_B$	28
3·7·6 Caso nº 6: Verificación de que: cuando $V_A < V_B$, cuanto más parecida sea la velocidad entre ambos buques, más alejados se encontrarán los PPCs.....	29
3·7·7 Caso nº 7: Determinación de si el eje mayor de la PAD es igual o varía (y por tanto, la PAD tiene el mismo tamaño o varía) cuando cambia la distancia a la que se encuentra el buque observado.....	31
3·7·8 Caso nº 8: Determinación analítica de si el eje mayor de la PAD es igual o varía (y por tanto, la PAD tiene el mismo tamaño o varía) cuando cambia la distancia a la que se encuentra el buque observado, y determinación analítica de las coordenadas del PPC.....	35
3·7·9 Caso nº 9: Buque B parado: situación del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD).....	47
3·7·10 Caso nº 10: Buque B de vuelta encontrada: situación del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD).....	48
3·7·11 Caso nº 11: Situación de alcance (el buque A alcanza al B; $V_A > V_B$): posición del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD).....	50
3·7·12 Caso nº 12: Situación de ser alcanzados (el buque B alcanza al A; $V_A < V_B$): posición del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD).....	51
Capítulo 4. Aplicación al ECDIS.....	53
4·1 Introducción.....	53
4·2 Funcionamiento de las capas del ECDIS.....	53
4·3 Propuesta de visualización de PADS en el ECDIS.....	60
Conclusiones.....	62
Bibliografía.....	63
Anexo: Cálculo analítico de la cinemática mediante Excel.....	65

Objetivo

El objetivo de este TFG es analizar las áreas de peligro previstas (PADs: *Predicted Areas of Danger*) para poder aplicarlas como áreas a evitar en el ECDIS, a fin de proporcionar al marino un sistema de ayuda anticollisión, mediante la visualización de las PADs (de los ecos ploteados en la ARPA) en la pantalla del ECDIS, así como la correspondiente alarma de área.

Motivación

Durante el estudio del grado en Náutica y Transporte Marítimo, me motivó de manera especial la asignatura de Maniobra y reglamentos, tanto en lo referente a la maniobra de los buques, como en la importancia que tiene, para los oficiales de Puente, la comprensión y cumplimiento del Reglamento de Abordajes. Aparte del interés que me suscitó en sí esta asignatura, también me permitió interrelacionar conceptos de otras asignaturas que ya había cursado, como Navegación costera y Sistemas de ayuda a la navegación.

Asimismo, durante mis prácticas de alumno, he podido constatar como, por un lado, una de las funciones principales del oficial de guardia es la prevención de abordajes, y por otro, que las maniobras en puerto consisten en acciones y procedimientos muy técnicos.

Es por estos motivos, que me puse en contacto con el profesor de Maniobra y reglamentos, a fin proponerle realizar mi TFG sobre un tema relacionado con dicha asignatura. Mi sorpresa fue que me planteó un tema relacionado con la cinemática naval, la cual tenía algo olvidada. Pero tras reflexionar sobre las explicaciones y aplicación que me dio el profesor, creí que, realmente, este era el tema que estaba buscando. Así pues, animado, empecé con este TFG, durante el cual cada vez he estado más motivado, al constatar la importancia que tiene la comprensión de la cinemática naval a la hora de tomar decisiones para prevenir los abordajes, y especialmente, lo *potente* que resulta el concepto de las PADs, y por supuesto, la gran ayuda que supondría su visualización y alarma en el ECDIS.

Metodología

La metodología y desarrollo de este TFG se puede sintetizar en los siguientes cuatro puntos:

1. Recopilación y profundización de conceptos adquiridos en el grado, mediante apuntes de la asignatura de Sistemas electrónicos de ayuda a la navegación, bibliografía de cinemática naval y directrices del tutor:

- Cinemática: este punto se ha centrado en la prevención de abordajes; no así en la cinemática enfocada a otros fines como los militares o policiales (navegación en convoy, encuentro entre buques, persecución de contrabando, etc.).
- Principios del funcionamiento del radar, así como sus errores.

2. Estudio de los posibles puntos de colisión (PPC: *Possible Point of Collision*) y de sus áreas de peligro asociadas (PAD: *Predicted Area of Danger*):

- Búsqueda de bibliografía sobre PPCs y PADs, donde se observa la inexistencia de un tratamiento profundo de las PADs.

3. Análisis de la casuística de los PPCs y sus PADs asociadas:

- Estudio de casos según las velocidades de *nuestro buque* y del *buque observado*, así como de la situación entre ambos de acuerdo con el Reglamento de Abordajes. Los casos de estudio se han desarrollado sobre rosas de maniobra, y constituyen el cuerpo principal del TFG.
- Determinación de si la PAD correspondiente al *buque observado* cambia de tamaño según la distancia a la que se encuentre este.
- Preparación de una base analítica como método para determinar los PPCs y las PADs en equipos electrónicos como el ECDIS.

4. Propuesta de introducción de la función PAD en el ECDIS: formato de la *pestaña* para visualizar las PADs y activar la correspondiente alarma de área.

Lista de siglas y nomenclatura

Abordaje: Colisión entre dos buques.

AIS: *Automatic Identification System* / Sistema de Identificación Automática.

ARPA: *Automatic Radar Plotting Aid* / Ayuda Radar de Punteo Automático.

Blanco: Cualquier objeto que se encuentre dentro del alcance radar, sea detectado o no.

BCR: *Bow Crossing Range* / distancia a la que un blanco cruzará la proa del observador.

BCT: *Bow Crossing Time* / intervalo para estar en la situación BCR, o tiempo que falta para que un blanco cruce la proa del observador.

CPA: *Closest Point of Approach* / punto de máximo acercamiento de un blanco, o distancia mínima de paso de este.

Discriminación: Grado con que un radar puede separar, en pantalla, los ecos de dos blancos que se encuentran muy próximos en demora y/o distancia.

ECDIS: *Electronical Chart Display and Information System* / Sistema de Información y Visualización de Cartas Electrónicas (SIVCE)

Eco: Señal de radiofrecuencia devuelta por un blanco; representación de un blanco sobre la pantalla.

Escala: Alcance que se muestra en la pantalla del radar o de la ARPA. En inglés se denomina *range*. Con una escala de 12 millas, por ejemplo, aparecen los blancos y la costa detectados hasta 12 millas.

IHO: *International Hydrographic Organization* / Organización Hidrográfica Internacional (OHI)

IMO: *International Maritime Organization* / Organización Marítima Internacional (OMI)

Indicatriz de movimiento: Rumbo relativo de un blanco con respecto al observador.

Movimiento relativo: Desplazamiento aparente de un blanco. Viene dado por su indicatriz de movimiento y su velocidad relativa.

Movimiento verdadero: Desplazamiento real de un blanco. Viene dado por su rumbo verdadero (HDG: *heading*) y su velocidad propia (STW: *speed through water*).

OMI: *Vide* IMO.

OHI: *Vide* IHO.

PAD: *Predicted Area of Danger* / Área de Peligro Prevista. Área de forma elíptica o hexagonal (por aproximación gráfica al sustituir una elipse por un hexágono), cuya diagonal mayor coincide con la prolongación del rumbo del blanco observado, y cuyos vértices situados en esta línea (L_1 y L_2) son los puntos de paso del observador por la proa y por la popa del blanco. Cada PAD va asociada a un PPC (*vide* PPC), y corresponde a un área geográfica concreta, la cual se toma como una zona en la que puede haber un riesgo de abordaje o una aproximación excesiva.

Ploteo: *Vide* Punteo. Adaptación al español de la palabra inglesa *plot*, cuyo significado es el de puntear, *i.e.* marcar o trazar.

Punteo: Operación que consiste en marcar las posiciones relativas (demora y distancia) de determinados ecos que aparezcan en la pantalla del radar o de la ARPA. El punteo puede ser manual (marcando con un lápiz grueso la posición de los ecos sobre la pantalla del radar, o marcando dichas posiciones en una rosa de maniobra); semiautomático (marcando con cursores específicos del radar las posiciones de los ecos), o automático, que es el sistema que emplea la ARPA, en el cual, solo marcando una vez un determinado eco, el punteo se efectúa automáticamente a lo largo del tiempo, y actualizándose si un blanco observado o el observador cambian de rumbo y/o velocidad.

PPC: *Possible Point of Collision* / Posible Punto de Colisión. Punto geográfico en el que el observador y un blanco observado se encontrarían, siempre y cuando el blanco mantuviera su rumbo y velocidad. El rumbo del observador al cual colisionaría con el blanco, se denomina rumbo de alcance. El PPC es la intersección del rumbo de alcance con el rumbo del blanco. Si la velocidad del observador es mayor que la del blanco, hay un solo rumbo de alcance y un solo PPC, mientras que si la velocidad del observador es menor que la del blanco, existen dos rumbos de alcance y dos PPCs.

Radar: Acrónimo inglés de Radio Detection and Ranging, *i.e.* radiodetección y distancia. Sistema que permite determinar distancias mediante la medición del tiempo que transcurre entre la emisión y el regreso de una señal electromagnética que ha sido reflejada hacia el receptor por un blanco.

Range: *Vide* Escala.

RIPA: Reglamento internacional para prevenir los abordajes, 1972, enmendado.

ROT: *Rate Of Turn*. Velocidad angular a la que un buque efectúa una caída. Se expresa en grados/minuto.

Rumbo de alcance: *Vide* PPC.

Sector ciego: Sector de la pantalla de radar donde los ecos no pueden ser detectados debido a obstrucciones cerca de la antena. Una variante son las zonas de sombra, en las que, solo en una parte del sector, los ecos no pueden ser detectados. Así por ejemplo, las chimeneas pueden generar sectores ciegos, y los mástiles, zonas de sombra.

SOLAS: Convenio Internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974, enmendado. Es conocido internacionalmente por las siglas inglesas de *Safety Of Life At Sea*. Está publicado por la OMI y es la base de toda la normativa marítima a nivel mundial. La última edición refundida es de 2009.

SIVCE: *Vide* ECDIS.

Target: *Vide* Blanco.

TCPA: Time to Closest Point of Approach (CPA) / intervalo para estar en la situación CPA, o tiempo que falta para que un blanco se encuentre a la mínima distancia del observador.

Triángulo de velocidades: Triángulo formado por los siguientes tres vectores: **A** = (rumbo del observador, velocidad del observador); **B** = (rumbo de un blanco, velocidad de un blanco); **R** = (velocidad relativa del blanco, indicatriz de movimiento del blanco). Se cumple que $\mathbf{R} = \mathbf{B} - \mathbf{A}$. El triángulo de velocidades se puede trazar a diferentes escalas, según el tiempo empleado entre ploteos sucesivos.

UTC: Universal Time Coordinated /Tiempo Universal Coordinado.

Velocidad relativa: Velocidad a la que se mueve un blanco con respecto al observador.

Zero speed position: Origen de los vectores verdaderos **A** y **B** (*vide* triángulo de velocidades), y por tanto, uno de los tres vértices del triángulo de velocidades. Corresponde a la posición relativa (demora y distancia) a la que se encontraría un blanco que estuviera parado, una vez transcurrido el tiempo empleado para el ploteo.

Zona de sombra: *Vide* Sector ciego.

Lista de figuras

Figura 1. Almacenamiento y representación de las distancias en una pantalla sintética para la escala 12 millas. Fuente: propia.....	4
Figura 2. Codificador de demora. Fuente: [6].....	6
Figura 3. Incidencia del ángulo de abertura del haz en la medida de la demora. Fuente: [6].....	9
Figura 4. Eco indirecto debido a la chimenea del buque. Fuente: [6].....	10
Figura 5. Eco indirecto producido por un puente y el casco del propio buque. Fuente: [6].....	10
Figura 6. Múltiples ecos generados al encontrarse dos buques través con través. Fuente: [6].....	11
Figura 7. Sectores ciegos y zonas de sombra. Fuente: [6].....	12
Figura 8. Lóbulos laterales y falsos ecos que generan. Fuente: [6].....	12
Figura 9. Riesgo de abordaje. Fuente: [19].....	13
Figura 10. Vector relativo $\overline{B_1B_3}$. Fuente: propia.....	17
Figura 11. Obtención del punto O: zero speed position. Fuente: propia.....	18
Figura 12. Vector del buque observado: $\overline{OB_3}$. Fuente: propia.....	18
Figura 13. Distancia mínima de paso (CPA). Fuente: propia.....	19
Figura 14. Distancia de cruce por la proa (BCT). Fuente: propia.....	20
Figura 15. Triángulo de velocidades del caso nº 2. Fuente: propia.....	21
Figura 16. Obtención de los rumbos para pasar al CPA indicado. Fuente: propia.....	22
Figura 17. Posible punto de colisión (PPC). Fuente: propia.....	25
Figura 18. Obtención de los vértices L_1 y L_2 de una PAD. Fuente: propia.....	26
Figura 19. Área de peligro (PAD). Fuente: propia.....	27
Figura 20. Situación $V_A > V_B$ (PAD). Fuente: propia.....	28
Figura 21. Situación $V_A < V_B$ (PAD). Fuente: propia.....	29
Figura 22. Comparación de PADs: $V_A = 18'$. Fuente: propia.....	30

Figura 23. Comparación de PADs: $V_A = 12'$. Fuente: propia.....	30
Figura 24. Comparación de PADs: $V_A = 10'$. Fuente: propia.....	31
Figura 25. PPC y PAD para B_4 a 5 millas. Fuente: propia.....	32
Figura 26. PPC y PAD para B_4 a 7 millas. Fuente: propia.....	33
Figura 27. PPC y PAD para B_4 a 9 millas. Fuente: propia.....	33
Figura 28. Incidencia de los errores ε y η al trazar rectas perpendiculares. Fuente: propia.....	34
Figura 29. Incidencia de los errores ε y η al trazar rectas oblicuas. Fuente: propia.....	35
Figura 30. Indicatrices de movimiento de alcance y para pasar a un determinado CPA ($2'$). Fuente: propia.....	41
Figura 31. Extremos de la PAD. Fuente: propia.....	44
Figura 32. PPC y PAD en una situación buque parado. Fuente: propia.....	48
Figura 33. PPC y PAD en una situación de vuelta encontrada. Fuente: propia.....	49
Figura 34. PPC y PAD en una situación de alcance, donde $V_A > V_B$. Fuente: propia.....	51
Figura 35. PPC y PAD en una situación de alcance, donde $V_A < V_B$. Fuente: propia.....	52
Figura 36. Categoría de la pantalla <i>Standard</i> . Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	54
Figura 37. Categoría de la pantalla <i>Custom</i> . Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	55
Figura 38. Categoría de la pantalla <i>All</i> . Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	55
Figura 39. Integración del AIS en el ECDIS. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	56
Figura 40. Integración de la ARPA en el ECDIS. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	56
Figura 41. Diferencia entre el vector de la ARPA y el del AIS. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	57
Figura 42. Información proporcionada por el AIS. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	57
Figura 43. Superposición de la imagen de la ARPA en el ECDIS (Overlay). Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	58
Figura 44. Overlay ajustado con la función Radar Settings. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	58
Figura 45. Capa A activada. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	59

Figura 46. Capa A desactivada. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	59
Figura 47. Capa B activada. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	59
Figura 48. Capa B desactivada. Fuente: propia, del simulador de la FNB.....	59
Figura 49. Opciones de superposición de información en el ECDIS. Fuente: propia.....	60
Figura 50. Opción de visualización PAD en el ECDIS. Fuente: propia.....	61

Lista de tablas

Tabla 1. Base de tiempos. Fuente: [6].....	3
Tabla 2. Clasificación de los radares en función de la banda de trabajo. Fuente: [6].....	7
Tabla 3. Nomenclatura del triángulo de velocidades usada en el TFG. Fuente: propia.....	15
Tabla 4. Datos cinemáticos correspondientes a los proporcionados por la ARPA. Fuente: propia.....	21
Tabla 5. Tiempos de respuesta al efectuar una maniobra. Fuente: propia.....	23
Tabla 6. Estándares de la OHI. Fuente: [10].....	53

Introducción

La prevención de abordajes es un aspecto fundamental en el ejercicio de la guardia, y por tanto, una tarea primordial de todo piloto. Dicha prevención se debe realizar en estricto cumplimiento del RIPA, y no existe ninguna disposición en este reglamento para el uso de la información del AIS. En consecuencia, todas las decisiones se deben tomar basándose en la información visual y/o del radar o ARPA, y dado que en los buques de arqueo igual o superior a 10 000 TRB deben estar equipados con una ARPA, además de que la mayoría de buques mercantes de menor arqueo también la llevan, se puede considerar, de forma general, a la ARPA como el sistema anticolidión adicional a la información visual.

Por su parte, los requerimientos del AIS están contenidos en la regla V19 del Convenio SOLAS, en su anexo V17 y en la Resolución A.917 (22) de la OMI, y a pesar de que el Convenio SOLAS requirió que el AIS se instalara en ciertos buques durante un periodo de implementación gradual que abarcó desde el 1 de julio del 2002 hasta el 1 de julio del 2008, se debe tener en cuenta que:

- i) Hay buques específicos, como los barcos de guerra o ciertas embarcaciones de recreo, que no están obligados a llevar AIS. Asimismo, hay objetos sin AIS, los cuales solo pueden ser detectados visualmente o por medio del radar/ARPA.
- ii) El sistema AIS de un buque cercano puede estar inoperativo por problemas técnicos.
- iii) La información derivada del punteo radar se basa únicamente en los datos medidos por el radar del propio buque, y proporciona una medición precisa del rumbo y la velocidad relativos del buque observado, que es el factor más importante para decidir la maniobra a realizar para evitar el abordaje; mientras que la información del AIS proviene de posiciones GPS y de velocidad propia y rumbo verdadero que transmite el otro buque, lo cual puede ser poco fiable, especialmente en lo referente a rumbo verdadero en embarcaciones menores (anexo V17.3 d) y e) de SOLAS).

Por consiguiente, el AIS no es un sistema anticolidión, aunque sí es muy útil para obtener cierta información de otro buque (nombre, call sign, destino, etc.). El sistema anticolidión, como ya se ha indicado, es la ARPA, la cual proporciona una información de cinemática muy precisa y de gran utilidad, que asimismo, hoy día, se puede trasladar al ECDIS.

Dentro de esta información, se encuentran las PADs, las cuales han sido poco desarrolladas hasta el momento, debido a que no *encajan* muy bien con el funcionamiento de la ARPA y tampoco han sido obligatorias por la normativa OMI. No obstante, se adaptarían muy bien al funcionamiento del ECDIS.

En este sentido, este TFG se centra en realizar un estudio de las PADs para su incorporación en el ECDIS.

Capítulo 1. Principios fundamentales del radar

1.1 Introducción

El nombre de radar procede del acrónimo inglés *Radio Detection And Ranging*; es decir: radiodetección y distancia. Es un sistema que permite determinar distancias mediante la medición del tiempo que transcurre entre la emisión y el regreso de una señal electromagnética que ha sido reflejada hacia el receptor por un blanco. Actualmente, el radar no solamente facilita al marino la distancia a un blanco, sino también su demora.

Desde que se postuló la teoría sobre la naturaleza de la luz y las radiaciones, publicada en 1871 por James J. Maxwell, y posteriormente, el estudio del comportamiento de las ondas electromagnéticas por Heinrich R.Hertz, han sucedido múltiples avances tecnológicos; pero el avance definitivo sucedió durante la Segunda Guerra Mundial. En 1940, los físicos Boot y Randall inventaron el magnetrón de cavidades resonantes. Su funcionamiento consiste en convertir los impulsos procedentes del modulador en oscilaciones de radiofrecuencia.

Asimismo, la aparición de los microprocesadores a principios de los años 70 del pasado siglo, permitió el almacenamiento de los datos de los blancos para su fácil presentación sobre una pantalla sintética. Por otra parte, mediante el empleo de un ordenador, es factible la resolución de la cinemática por el propio radar. [Jaime et al., 1995, pp. 19-20]

1.2 Medición de la distancia a un blanco

1.2.1 La distancia en función del tiempo

El radar transmite un impulso que viaja a la velocidad de la luz y que, al colisionar con un blanco, llega a la antena en un intervalo de tiempo después de iniciada la emisión. La velocidad de propagación del impulso se expresa en m/μs. La velocidad de 300 000 km/s equivale a 300 m/μs. [Jaime et al., 1995, p. 22]

$$d = \frac{c}{2} \cdot t = \frac{300:2}{1\ 852} \cdot t$$

1.2.2 La base de tiempo y su calibración

La base de tiempo se define como el intervalo de tiempo transcurrido desde que un impulso es emitido por la antena hasta que llega de vuelta al emisor. [Jaime et al., 1995, p. 23]

Ejemplo 1·1:

Calcular la base de tiempo (B/T) correspondiente a una escala de 12 millas. [Jaime et al., 1995, p. 24]

$$d = \frac{c}{2} \cdot t = \frac{300 \text{ m}/\mu\text{s}}{2} \cdot B/T \rightarrow B/T = \frac{12 \text{ millas} \cdot 1852 \text{ m/milla}}{\frac{300 \text{ m}/\mu\text{s}}{2}} = 148,2 \mu\text{s}$$

En la Tabla 1, se indican las bases de tiempo que corresponde a cada una de las escalas que el radar marino puede emplear.

ESCALA	BASE DE TIEMPOS (B/T)
0,5 millas	6,2 μs
0,75 millas	9,3 μs
1,5 millas	18,5 μs
3 millas	37,0 μs
6 millas	74,1 μs
12 millas	148,2 μs
24 millas	296,3 μs
48 millas	592,6 μs

Tabla 1. Base de tiempos. Fuente: [6].

1·2·3 Pantalla sintética

Antiguamente, los radares representaban la imagen de un blanco sobre la pantalla prácticamente en el mismo instante que el eco llegaba al receptor, y se conocían como radares a tiempo real. Hoy día, los radares reciben, procesan y almacenan en la memoria de un microprocesador los datos obtenidos en cuanto a la distancia y demora del eco, y estos se presentan en la pantalla radar. Estas pantallas son conocidas como pantallas sintéticas.

El funcionamiento de la pantalla sintética consiste en dividir cada traza en un número determinado de celdas, asignándoles un 1 o un 0, dependiendo de si se detecta o no un blanco a la distancia correspondiente, y estos valores se almacenan en la memoria de un ordenador, formando un código binario para ser leído posteriormente en la pantalla radar.

Ejemplo 1·2:

Se decide escoger una escala de trabajo del radar de 12 millas. Esta escala se dividirá en doce celdas de una milla náutica cada una. Si la antena radar recibe un único eco de un blanco situado a una distancia de 4 millas, el microprocesador archivará un 1 en la celda correspondiente al cuatro, indicando que existe un blanco entre cuatro y cinco millas, y en el resto de celdas, archivará un 0.

0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 1. Almacenamiento y representación de las distancias en una pantalla sintética para la escala 12 millas. Fuente: propia.

Si la división de la base de tiempos fuese de 12 000 celdas, un 1 en la celda 4 000 nos indicaría la presencia de un objeto entre 4 y 4,001 millas. El tiempo de almacenamiento correspondiente a la escala de trabajo de 12 millas es de 148,2 μs. [Jaime et al., 1995, p. 26]

1·3 Medida de la demora

1·3·1 Fundamento para la obtención de la demora

El radar de navegación tiene que ser capaz de detectar la distancia y la demora a un blanco. Para ello, debe tener una sincronización entre la antena y la traza. La traza deberá girar sobre la pantalla radar en sentido horario a la misma velocidad angular que la antena. La normativa OMI establece una revolución de la antena que no exceda de 5 s. Asimismo, para una correcta determinación de la demora, la apertura de la traza no debe ser mayor de 2,5 grados. [Jaime et al., 1995, pp. 27-28]

1·3·2 Almacenamiento de la demora en la pantalla sintética

El sistema más empleado para el almacenamiento de la demora consiste en un codificador de eje mecánico parecido al que se muestra en la Figura 2, que va acoplado a la antena. La normativa OMI exige una exactitud en demora que supere los 0,1 grados. [Jaime et al., 1995, p. 29]

Fórmula matemática:

$$\frac{360}{2^n} = 0,1 \rightarrow \ln \frac{360}{2^n} = \ln 0,1$$

$$\ln 360 - \ln 2^n = \ln 0,1 \rightarrow \ln 360 - \ln 0,1 = n \cdot \ln 2$$

$$n = \frac{\ln 360 - \ln 0,1}{\ln 2} = 11,8138$$

$$2^{11,8138} = 3600$$

Se comprueba para una progresión binaria de 12 bits:

$$\frac{360 \text{ grados}}{2^{12}} = \frac{360 \text{ grados}}{4\,096} \approx 0,088 \text{ grados}$$

Se comprueba si es preciso realizar una progresión binaria de 11 bits:

$$\frac{360 \text{ grados}}{2^{11}} = \frac{360 \text{ grados}}{2\,048} \approx 0,176 \text{ grados}$$

Una progresión de 11 bits supera los 0,1 grados exigidos por la normativa OMI. Por tanto, se dividirá en un número igual de sectores que vayan creciendo en cada anillo de acuerdo a una progresión binaria hasta la potencia de 12.

Para explicar el funcionamiento del codificador, se supondrá que la precisión requerida es de una cuarta. Una cuarta es el nombre que se da a cada uno de los 32 rumbos principales en que está dividida la rosa de los vientos. Por tanto, una cuarta equivale a 11,25 grados, que resulta de la división de 360 grados entre 32.

Si se aplica la fórmula matemática del apartado 1·3·2, se podrá obtener el número de anillos (n) necesarios para tener la precisión de una cuarta:

$$\frac{360}{2^n} = 11,25 \rightarrow \ln \frac{360}{2^n} = \ln 11,25$$

$$\ln 360 - \ln 2^n = \ln 11,25 \rightarrow \ln 360 - \ln 11,25 = n \cdot \ln 2$$

$$n = \frac{\ln 360 - \ln 11,25}{\ln 2} = 5 \rightarrow n = 5$$

Por tanto, la pantalla se dividirá en 5 anillos concéntricos, los cuales estarán divididos en sectores de acuerdo con la progresión geométrica ya apuntada:

$$2^1 = 2 \quad 2^2 = 4 \quad 2^3 = 8 \quad 2^4 = 16 \quad 2^5 = 32$$

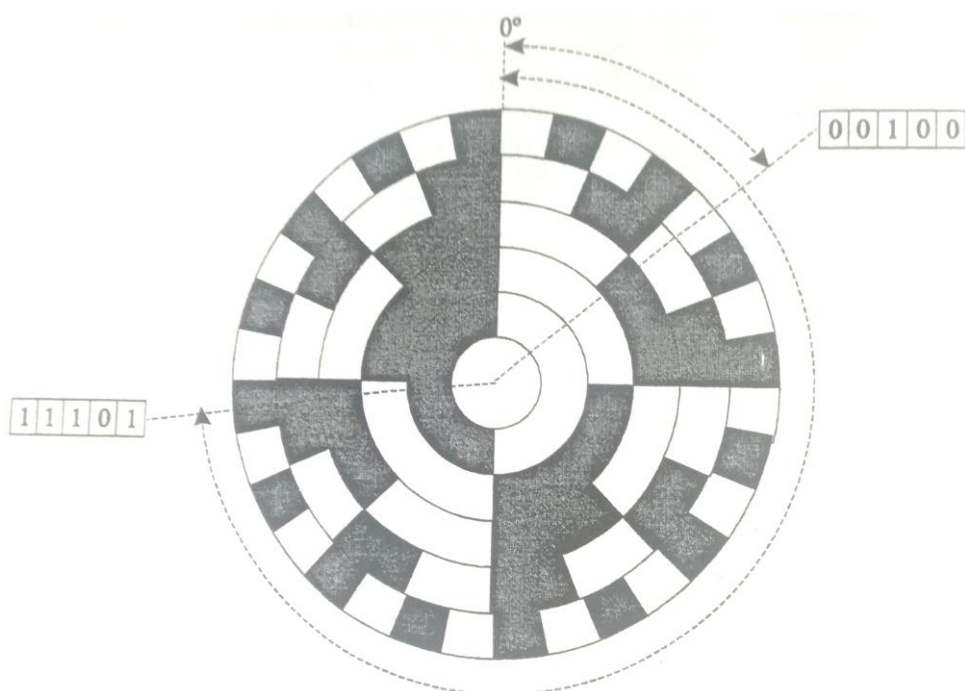


Figura 2. Codificador de demora. Fuente: [6].

Suponiendo que cada sector sombreado indica la presencia de un 1 y cada sector en blanco corresponde a un 0, entonces, si un blanco se encuentra entre las demoras 000 y 011,25, el codificador leerá 00000, es decir, la cuarta 0. Si el blanco se encuentra en la cuarta 4, el valor leído será 00100; es decir: $0 \times 2^0 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^4 = 4$. [Jaime et al., 1995, p. 29]

1·4 Frecuencias de emisión de los radares marinos

Los radares marinos se pueden clasificar en base a su frecuencia de emisión. Las unidades marinas de uso civil trabajan en las bandas X y S, correspondientes a longitudes de onda de 3 y 10 cm respectivamente. En frecuencia, la banda S va de 2 a 4 GHz, y la banda X, de 8 a 12 GHz.

La ventaja de los radares que trabajan en la banda X es que la respuesta en cuanto a la detección de un blanco es mayor en comparación a los radares de banda S, permitiendo detectar objetos de pequeño tamaño. Su desventaja principal es que sufren más fácilmente las interferencias debidas al oleaje y a la mar, enmascarando al blanco. En cambio, el uso del radar en banda S no se ve tan afectado por las condiciones meteorológicas adversas como la banda X. Por esta misma razón, en el puente de navegación, se suelen utilizar dos radares, uno en banda X y otro en banda S. [Jaime et al., 1995, pp. 34-35]

Denominación	Frecuencia
VHF	30 a 300 MHz
UHF	300 a 3000 MHz
Banda L	1 a 2 GHz
Banda S	2 a 4 GHz
Banda C	4 a 8 GHz
Banda X	8 a 12 GHz
Banda K	12 a 40 GHz

Tabla 2. Clasificación de los radares en función de la banda de trabajo. Fuente: [6].

Capítulo 2. Errores en la detección de blancos

2.1 Introducción

En este capítulo, se exponen los errores más comunes en cuanto a la detección de un blanco y el uso del equipo radar, puesto que, de acuerdo con la normativa OMI, el oficial de guardia debe tener en cuenta las limitaciones del equipo.

Los errores se pueden clasificar en dos grupos: los que hacen aparecer en la pantalla blancos inexistentes, y los que causan que ciertos blancos sean ocultados y no aparezcan. En condiciones de visibilidad reducida, la presencia de ecos inexistentes, la obtención de posiciones erróneas de blancos, o la no detección de un blanco real, pueden llevar al buque a una situación de riesgo de abordaje.

2.2 Error en el impulso radar

El radar marino transmite impulsos de radiofrecuencia de forma repetitiva, y registra en recepción aquellos impulsos que le son devueltos por un blanco. La forma, la potencia y la frecuencia de repetición de los impulsos dependen de la escala empleada, y determinan la exactitud de la distancia a un blanco. En cuanto a la forma, el impulso debe tener su máxima amplitud en el instante en que inicia la emisión. Por el contrario, si el impulso adopta un perfil acampanado, se produce un error en la medida de la distancia. [Jaime et al., 1995, p. 35]

Otro aspecto a considerar es que cualquier objeto que devuelva un eco no lo puede devolver más pequeño que el tamaño del impulso, sin importar el tamaño del objeto en sí. El tamaño del impulso es definido por la longitud del impulso y el ancho del haz. El tamaño del impulso es controlado por el modulador, que depende directamente de la escala de trabajo y de la longitud del impulso. La anchura del haz puede llevar a un error en la lectura de la demora (*vide* epígrafe 1.3.1), que es directamente proporcional a la apertura de dicho ángulo. La apertura del haz, que según la normativa OMI no debe superar los 2,5 grados, depende del tipo de antena empleado y de la longitud de onda con que trabaja la unidad. [Brunicardi, 2012, p. 195]

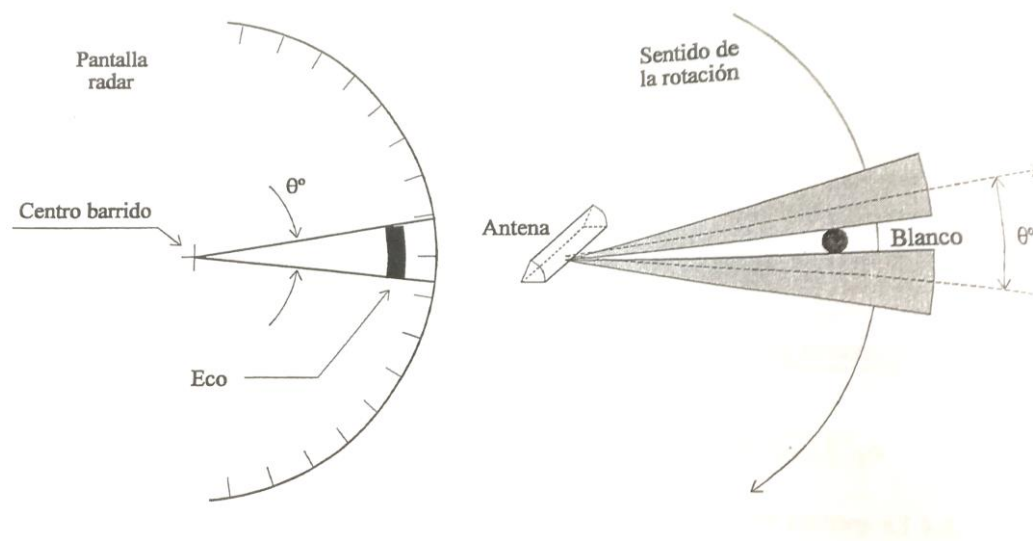


Figura 3. Incidencia del ángulo de apertura del haz en la medida de la demora. Fuente: [6]

2.3 Falsos ecos

2.3.1 Ecos indirectos y ecos reflejados

El fenómeno de los ecos indirectos se produce cuando la energía devuelta por un blanco no llega directamente a la antena, sino que previamente incide sobre otra superficie. Existen dos tipos de ecos indirectos: los producidos por una superestructura del propio buque y los debidos a una superficie ajena al mismo. [Jaime et al., 1995, p. 110]

Los falsos ecos producidos por la estructura del propio buque están relacionados con la posición de la antena. La forma, el tamaño y el material de la estructura del buque pueden provocar una superficie reflectora. Este tipo de ecos indirectos están asociados a los sectores ciegos producidos por chimeneas y mástiles, y también se pueden producir en buques portacontenedores por su carga (*vide* epígrafe 2.3.4). En cuanto a los falsos ecos causados por superficies reflectantes que no forman parte de la estructura del barco, una situación se podría dar cuando nuestro buque está navegando cerca de otro buque de mayores dimensiones. En este caso, el costado del otro buque forma una excelente superficie reflectante que provoca un blanco ficticio en la pantalla radar apareciendo en la misma demora en el que se encuentra la superficie reflectora, aunque la distancia que media entre el blanco y la antena no es la misma, sino que es la suma de los recorridos blanco-estructura y estructura-antena. [Brunicardi, 2012, p. 90]

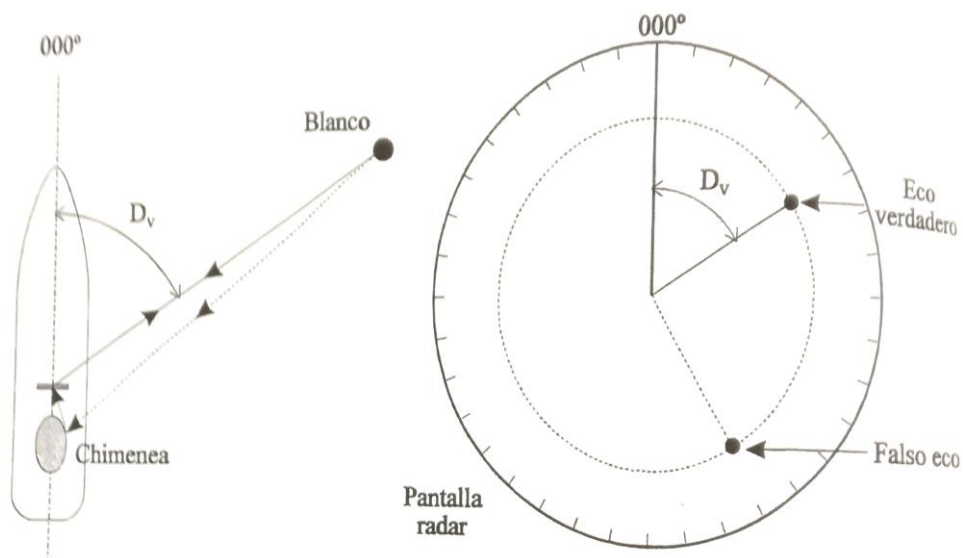


Figura 4. Eco indirecto debido a la chimenea del buque. Fuente: [6]

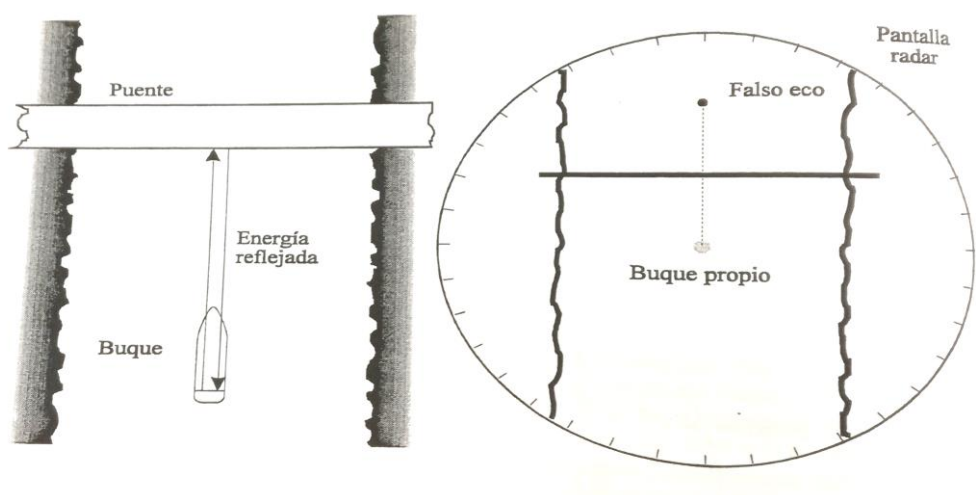


Figura 5. Eco indirecto producido por un puente y el casco del propio buque. Fuente: [6]

2.3.2 Ecos múltiples

Este fenómeno se manifiesta entre dos buques que navegan a rumbos paralelos. La energía transmitida por el blanco rebota una o más veces entre el costado del propio buque y el del blanco. En la pantalla, aparecen uno o más ecos equidistantes (cuya intensidad va atenuándose a medida que se alejan del centro del barrido) y que se mueven al mismo tiempo, siendo el eco verdadero el más cercano. [Jaime et al., 1995, p. 113]

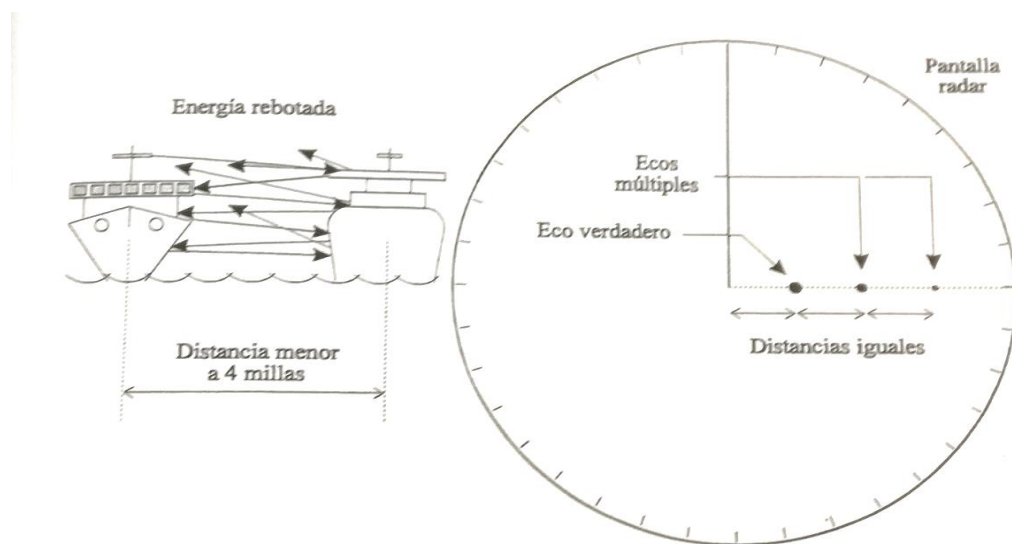


Figura 6. Múltiples ecos generados al encontrarse dos buques través con través. Fuente: [6]

2.3.3 Ecos de segunda traza

Se denominan ecos de segunda traza a aquellos que aparecen sobre la pantalla a una distancia mucho menor de la real. El efecto generalmente se asocia a condiciones meteorológicas donde se produce una atmósfera superrefractiva que aumenta considerablemente el horizonte radar. Se trata de ecos provenientes de blancos situados a gran distancia, que llegan al radar cuando se ha iniciado el siguiente ciclo de transmisión. [Brunicardi, 2012, p. 93]

2.3.4 Sectores ciegos y zonas de sombra

Los *sectores ciegos* corresponden a sectores de la pantalla del radar donde los ecos no pueden ser detectados debido a obstrucciones cerca de la antena. Una variante son las *zonas de sombra*, en las que, solo en una parte del sector, los ecos no se pueden detectar. Así por ejemplo, las chimeneas pueden generar sectores ciegos, y los mástiles, zonas de sombra. También se denomina sector ciego a la zona alrededor del buque donde las partes elevadas más salientes impiden que los ecos sean detectados, como se ilustra en la Figura 7.

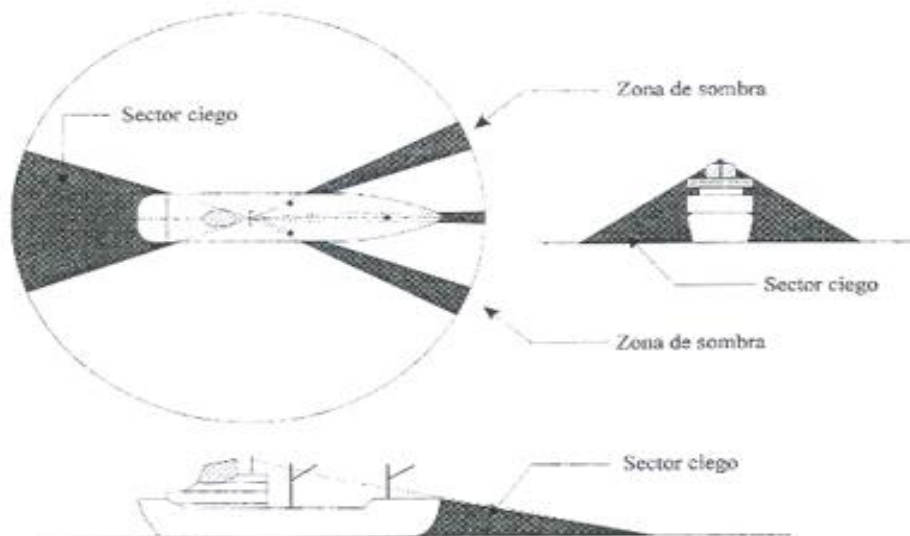


Figura 7. Sectores ciegos y zonas de sombra. Fuente: [6].

2.3.5 Ecos debidos a los lóbulos laterales

Además de la energía radiada perpendicularmente al plano de emisión, en la antena se producen otros lóbulos de mucha menor energía, que suelen estar simétricamente a banda y banda del principal. Cuando se trabaja con una escala grande (poca distancia representada en la pantalla), un blanco próximo puede ser detectado por el lóbulo principal y también por los secundarios. [Jaime et al., 1995, p. 114]

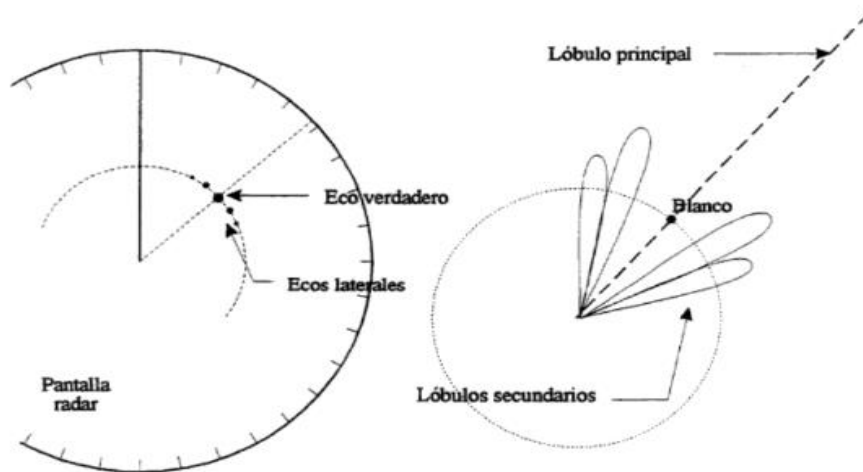


Figura 8. Lóbulos laterales y falsos ecos que generan. Fuente: [6].

Capítulo 3. Cinemática, PPCs y PADs

3.1 Introducción

La palabra *cinemática* proviene del griego κίνημα (kínêma), que significa movimiento. Por tanto, la cinemática náutica estudia el movimiento de nuestro buque con relación a otro cuando uno de los dos está en movimiento [García et al., 1994, p. 17]. En este TFG, se enfoca a la prevención de abordajes.

Según la regla 7 del RIPA: *Riesgo de abordaje*, se considera que existe riesgo de abordaje *si la demora de un buque que se aproxima no varía en forma apreciable*.

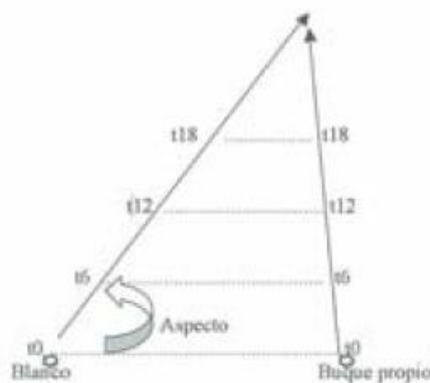


Figura 9. Riesgo de abordaje. Fuente: [19]

Asimismo, según la regla 8: *Maniobra para evitar el abordaje*, se debe tener en cuenta que: a) *Toda maniobra que se efectúe para evitar un abordaje será llevada a cabo [...] en forma clara, con la debida antelación y respetando las buenas prácticas marineras.* b) *Si las circunstancias del caso lo permiten, los cambios de rumbos y/o velocidad que se efectúen para evitar un abordaje serán lo suficientemente amplios para ser fácilmente percibidos por otro buque que los observe visualmente o por medio del radar. Deberá evitarse una sucesión de pequeños cambios de rumbo y/o velocidad.* c) *Si hay espacio suficiente, la maniobra de cambiar solamente de rumbo puede ser la más eficaz para evitar una situación de aproximación excesiva, a condición que se haga con bastante antelación, sea considerable y no produzca una situación de aproximación excesiva.* d) *La maniobra que se efectúe para evitar un abordaje será tal que el buque pase a una distancia segura del otro [...].*

En este capítulo, se desarrollarán unos conceptos y casos de cinemática náutica. Para ello, se realizarán las siguientes consideraciones [García et al., 1994, p. 17]:

- Las derrotas de los buques son rectilíneas y uniformes.
- Los cambios de rumbos son instantáneos.
- No se efectúa ningún cambio de velocidad (regla 8 c)).

3·2 Movimiento verdadero y relativo en el radar

3·2·1 Movimiento verdadero

Cuando el radar trabaja con movimientos verdaderos (TM: *true motion*), se caracteriza porque el buque propio se desplaza continuamente sobre la pantalla. Los elementos que lo caracterizan son el rumbo verdadero y la velocidad propia o de máquina, así como la distancia. El rumbo se cuenta de 000 a 360 grados; la velocidad se expresa en nudos o millas por hora, y la distancia, en millas náuticas. Conocidas la posición de un buque y los elementos de su movimiento verdadero, se podrán hallar las sucesivas posiciones que vaya ocupando sobre la derrota. [García et al., 1994, p. 18]

3·2·2 Movimiento relativo

Cuando el radar trabaja con movimientos relativos (RM: *relative motion*), se caracteriza porque el buque propio ocupa el centro de la pantalla de manera permanente, y los movimientos que se detectan de los ecos que aparecen en la pantalla radar son movimientos relativos. [Jaime et al., 1995, p. 188]

Según la línea de fe siga las evoluciones de nuestra proa o permanezca fija, se distingue entre [Jaime et al., 1995, p. 191]:

i) Movimiento relativo estabilizado:

Se puede trabajar con movimientos estabilizados de dos maneras: con la línea de fe señalando el rumbo verdadero (norte arriba, NU: *north up*) o con la línea de fe señalando el cero (rumbo arriba, CU: *course up*). Llevar el radar con norte arriba, tiene la ventaja de que: al determinar el rumbo de los blancos observados, este se puede obtener directamente del triángulo de velocidades (*vide* epígrafe 3·4); mientras que si se trabaja con el rumbo arriba, se tendrá que sumar al rumbo obtenido de cada blanco, el valor del nuestro.

ii) Movimiento relativo sin estabilizar:

Se puede trabajar con movimiento sin estabilizar (proa arriba, HU: *head up*), pero la desventaja en cuanto a la cinemática es que: cuando el buque da guiñadas, el blanco se desplaza sobre la pantalla. Si se quiere hacer un punteo sobre un blanco, midiendo exactamente los intervalos de tiempo entre ellos, es muy probable que en el instante en que se puntee el eco, se haya desplazado sobre la pantalla y dé una información de movimiento relativo erróneo, ya que el movimiento relativo obtenido incluye: tanto el propio del eco, como su desplazamiento sobre la pantalla. Por consiguiente, el movimiento no estabilizado no es adecuado para realizar un punteo, bien sea manual o automático mediante la ARPA.

3.3 Rosa de maniobra

La resolución de los problemas que plantea la cinemática náutica se realiza por métodos gráficos con la ayuda de las denominadas rosas de maniobra.

La rosa de maniobra consiste en un impreso en el que aparece dibujada una circunferencia dividida en 360 partes, que representan los 360 grados de horizonte, además de estar dibujados un mínimo de 36 radios, correspondientes a los diámetros de cada 10 grados. Asimismo, la rosa suele estar impresa en tinta de color verde claro, para que contrasten suficientemente los trazos con lápiz sobre la misma. [García et al., 1994, p. 18]

3.4 Triángulo de velocidades

El triángulo de velocidades está formado por seis parámetros: el rumbo verdadero y la velocidad de máquina (o propia) de nuestro buque (R_A, V_A); el rumbo verdadero y la velocidad propia del buque observado (V_B, R_B), y la indicatriz de movimiento (o rumbo relativo) y la velocidad relativa (IM, V_R). Conociendo cuatro de ellos, se podrá calcular los otros. [García et al., 1994, p. 22]

Estos seis parámetros, tomados por pares de rumbo y velocidad, forman tres vectores. A continuación, se muestra una tabla donde se indica como han sido denominados, en este TFG, los tres vectores que forman el triángulo de velocidades.

	Nomenclatura	Significado
Vectores	B_1B_3	Indicatriz de movimiento y velocidad relativa: IM, V_R
	OB_1	Rumbo y velocidad del buque propio: R_A, V_A
	OB_3	Rumbo y velocidad del buque observado: V_B, R_B

Tabla 3. Nomenclatura del triángulo de velocidades usada en el TFG. Fuente: propia.

El punto O es el origen de los vectores verdaderos ($R_A, V_A; V_B, R_B$), y los puntos B_1, B_2 y B_3 , corresponden a los punteos realizados en los tiempos UTC_1, UTC_2 y UTC_3 respectivamente. B_2 es solo un punto de verificación (*vide* epígrafe 3.5), y por este motivo, no figura en la tabla.

3-5 Criterio de colores para representar el triángulo de velocidades y las PADs

Para la representación del triángulo de velocidades y de las PADs, se han utilizado los siguientes colores:

- Negro: punteo de los ecos en las posiciones del buque observado (B): B_1 , B_2 y B_3 . La posición intermedia (B_2) solo tiene por objetivo verificar el punteo; es decir: constatar que B_1 , B_2 y B_3 están alineados, y que B_1B_2 y B_1B_3 son iguales (los intervalos de tiempo entre las posiciones son iguales; normalmente, 3 minutos). Si B_1 , B_2 y B_3 no estuvieran alineados y/o B_1B_2 y B_1B_3 no fueran iguales, habría que realizar un nuevo punteo. En todos los casos, también se ha trazado en negro, la línea que une los puntos B_1 , B_2 y B_3 , así como su prolongación hacia el centro de la pantalla, la cual es la indicatriz de movimiento.
- Azul marino: vector de movimiento del buque propio (R_A , V_A).
- Lila: vector de movimiento del buque observado (R_B , V_B).
- Rojo: Rumbo de alcance (R_a) e indicatriz de movimiento de alcance (IM_a). También se ha utilizado el color rojo para trazar el contorno de las PADs.
- Color verde: Indicatriz de movimiento y R_A para una caída a estribor (IM_1 y R_{A1}') e indicatriz de movimiento y R_A para una caída a babor (IM_2 y R_{A2}'). Estas caídas se refieren a las maniobras para pasar a una determinada distancia de B.

3-6 Representación de casos básicos de cinemática náutica en la rosa de maniobra

3-6-1 Caso nº 1: Obtención del rumbo y la velocidad de otro buque, conociendo su movimiento relativo.

Navegando al $R_A = 340$ y $V_A = 18$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A $UTC_1 = 16:00$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 026$ y distancia $d_{B1} = 9$ millas.
- ✓ A $UTC_2 = 16:06$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 025$ y distancia $d_{B2} = 8$ millas.
- ✓ A $UTC_3 = 16:12$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 024$ y distancia $d_{B3} = 7$ millas.

En esta primera situación, se dará el conocimiento básico de cómo construir el triángulo de velocidades. También se explicará cómo calcular la distancia mínima de paso (en inglés, CPA: *closest point of approach*), el tiempo para encontrarnos a la mínima distancia de paso (en inglés, TCPA: *time to CPA*), la distancia a la que B pasará por nuestra proa (en inglés, BCR: *bow crossing range*) y el tiempo que falta para que B nos corte la proa (en inglés, BCT: *bow crossing time*).

Resolución:

En primer lugar, se trazan las demoras observas (indicatriz de movimiento inicial, IM_i).

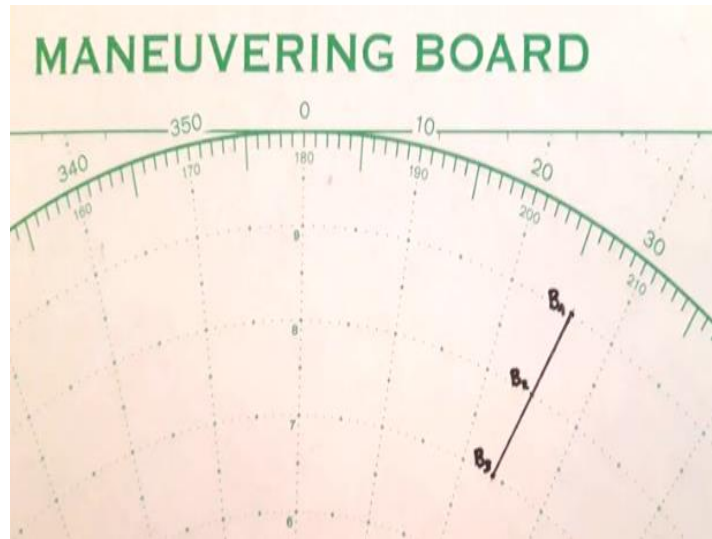


Figura 10. Vector relativo $\overline{B_1B_3}$. Fuente: propia.

Cálculo de la velocidad relativa (V_r)

Para calcular la velocidad relativa (expresada en nudos), se dividirá la distancia relativa (distancia entre B_1 y B_3 , expresada en millas náuticas) entre el intervalo de tiempo transcurrido (intervalo entre UTC₁ y UTC₃, expresado en horas).

$$V_r = \frac{d_r}{I}$$

Cálculo de la distancia relativa (d_r) entre las posiciones B_3 y B_1 :

$$\begin{array}{ccc} d_1 = 9' & \longrightarrow & d_r = 2' \\ d_3 = 7' & & \end{array}$$

Cálculo del intervalo (I) transcurrido entre las posiciones B_3 y B_1 :

$$\begin{array}{ccc} \text{UTC}_3 = 16:12 & \longrightarrow & I = 0 \text{ h } 12 \text{ min} = 0,2 \text{ h} \\ \text{UTC}_1 = 16:00 & & \end{array}$$

$$V_r = \frac{2}{0,2} = 10 \text{ nudos}$$

Construcción del triángulo de velocidades

Desde B_1 , se traza el R_A en sentido opuesto, hasta un punto O situado a la distancia navegada por el buque A en el intervalo de tiempo transcurrido entre el primer ploteo (UTC₁) y el tercero (UTC₃). El punto O, llamado *zero speed position*, corresponde a la posición que ocuparía el buque B en el instante UTC₃ si hubiera estado parado durante dicho intervalo.

En este caso, puesto que A recorre 18 millas náuticas en un intervalo de 60 minutos, en 12 minutos recorre una distancia de 3,6 millas. Luego, desde B₁, se toma la distancia de 3,6 millas sobre el opuesto de R_A, y se encuentra el punto O.

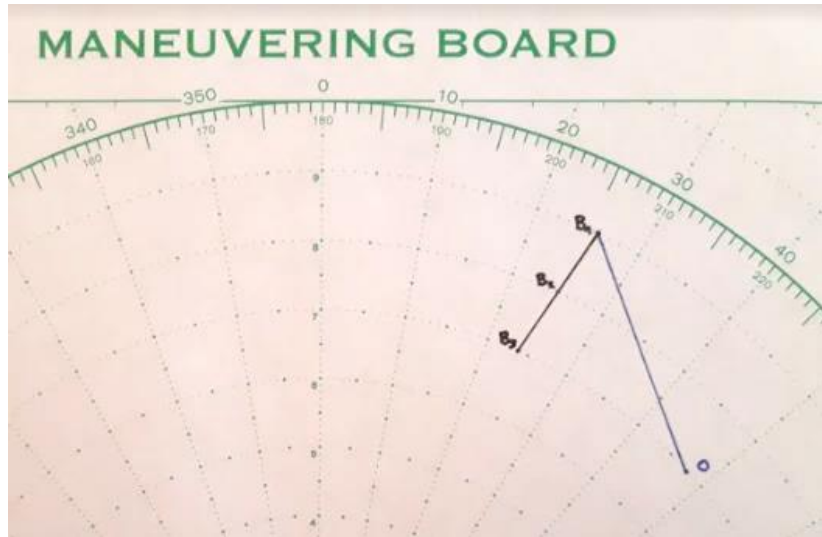


Figura 11. Obtención del punto O: zero speed position. Fuente: propia.

Uniéndolo los puntos O y B₃, se obtiene el segmento $\overline{OB_3}$, y trasladándolo por paralelas al centro de la rosa de maniobra (punto A), se obtiene el R_B y la V_B.

$$R_B = 307$$

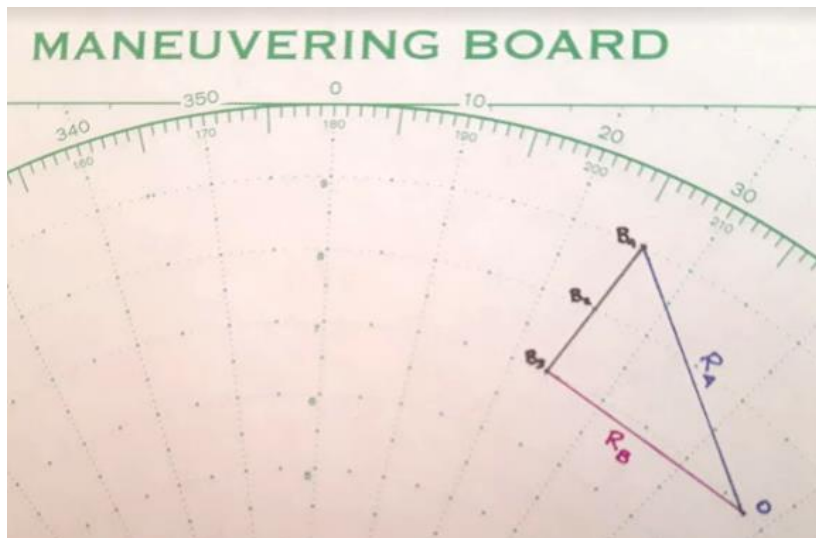


Figura 12. Vector del buque observado: $\overline{OB_3}$. Fuente: propia.

Midiendo la distancia $\overline{OB_3}$, se obtiene que el buque B ha recorrido 2,9 millas náuticas en 12 minutos. Luego, la velocidad de B es:

$$V_B = \frac{\overline{OB_3}}{t} = \frac{2,9}{0,2} = \mathbf{14,5 \text{ nudos}}$$

Cálculo de la distancia mínima de paso (CPA)

Se prolonga el segmento $\overline{B_1B_3}$ más allá del centro de la rosa de maniobra (punto A). A continuación, se traza una recta perpendicular que pase por A y corte con la recta prolongada al segmento $\overline{B_1B_3}$. En este caso, al punto de corte se le llamará B_4 , siendo el segmento $\overline{AB_4}$ la distancia mínima de paso (CPA).

CPA= 1,2 millas náuticas

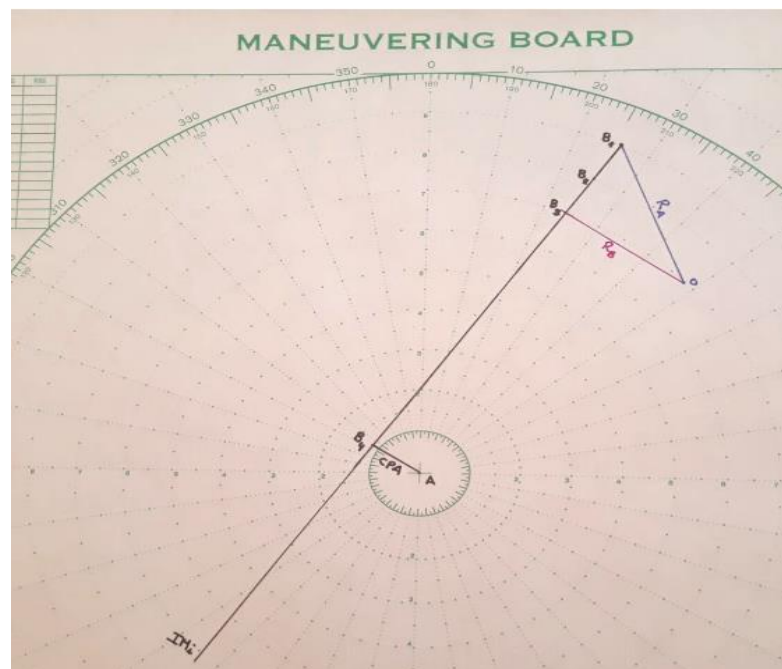


Figura 13. Distancia mínima de paso (CPA). Fuente: propia.

Tiempo de la mínima distancia de paso (TCPA)

Se mide la distancia $\overline{B_3B_4}$, siendo de 6,9 millas. Luego,

$$TCPA = \frac{\overline{B_3B_4}}{V_r} = \frac{6,9}{10} = 0,69 = 0 \text{ h } 41,4 \text{ min}$$

Los TCPAs se expresan en minutos y décimas de minuto. Por tanto,

TCPA = 41,4 min

La hora a la que B estará a la mínima distancia (UTC_4) será:

$$UTC_4 = UTC_3 + TCPA = 16:12 + 00:41,4 = \mathbf{16:53,4}$$

Cálculo de la distancia de cruce por la proa (BCR)

Desde el centro de la rosa (punto A), se traza $R_A = 340$. El punto de corte del R_A con la IM_i corresponde a la posición de B al estar por la proa del buque A. En este caso, a dicha posición, se la llamará B_5 , siendo el segmento $\overline{AB_5}$ la distancia de cruce por la proa (BCR).

BCR = 1,4 millas náuticas

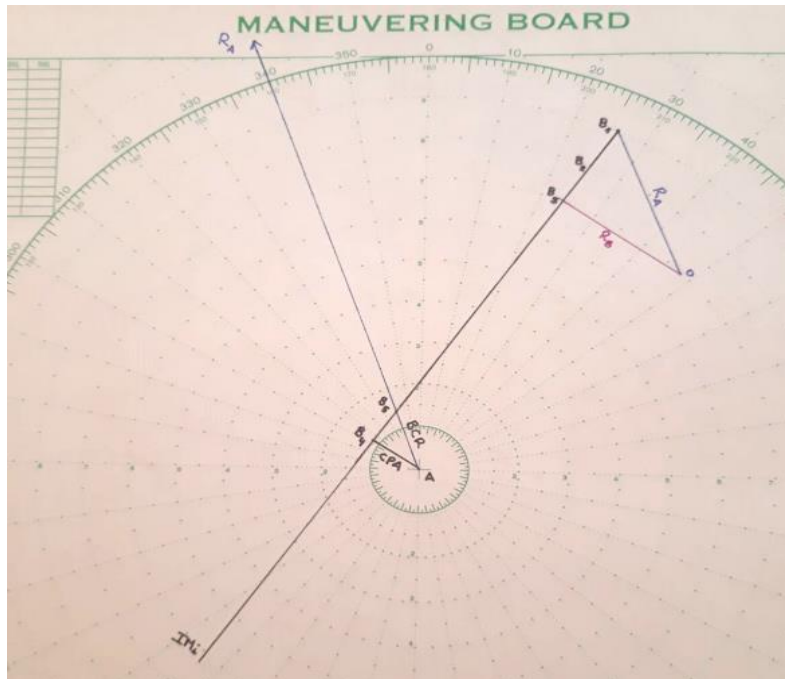


Figura 14. Distancia de cruce por la proa (BCT). Fuente: propia.

Cálculo del tiempo de cruce por la proa (BCT)

Se mide la distancia $\overline{B_3B_5}$, siendo de 6,1 millas. Luego,

$$BCT = \frac{\overline{B_3B_5}}{V_r} = \frac{6,1}{10} = 0,61 = 0 \text{ h } 36,6 \text{ min}$$

Los BCTs también se expresan en minutos y décimas de minuto. Por tanto,

BCT = 36,6 min

La hora a la que B estará por la proa del buque A (UTC₅) será:

$$UTC_5 = UTC_3 + BCT = 16:12 + 00:36,6 = \mathbf{16:48,6}$$

A continuación, se muestra una tabla con la información cinemática que proporciona la ARPA, y que el piloto puede visualizar en la pantalla de la misma.

TARGET		
RANGE	Distancia al eco	7.0 NM
COURSE	Rumbo verdadero del eco	307 °
STW (speed through water)	Velocidad propia del eco	14.5 KT
CPA	Mínima distancia de paso	1.2 NM
TCPA	Tiempo para la mínima distancia de paso	41.4 MIN
BCR	Distancia de cruce por la proa	1.4 NM
BCT	Tiempo para el cruce por la proa	36.6 MIN

Tabla 4. Datos cinemáticos correspondientes a los proporcionados por la ARPA. Fuente: propia.

3-6-2 Caso nº 2: Obtención del rumbo para pasar a una distancia dada de otro buque.

Navegando al $R_A = 285$ y $V_A = 12$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A $UTC_1 = 23:00$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 340$ y distancia $d_{B1} = 9$ millas.
- ✓ A $UTC_2 = 23:12$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 340$ y distancia $d_{B2} = 7$ millas.
- ✓ A $UTC_3 = 23:24$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 340$ y distancia $d_{B3} = 5$ millas.

Resolución:

Construcción del triángulo de velocidades

En la rosa de maniobra, se confecciona el triángulo de velocidades (*vide* Caso nº1), obteniendo:

$$R_B = 232,3 \quad V_B = 10,25 \text{ nudos} \quad V_r = 10 \text{ nudos} \quad CPA = 0' \quad TCPA = 30 \text{ min (UTC = 23:54)}$$

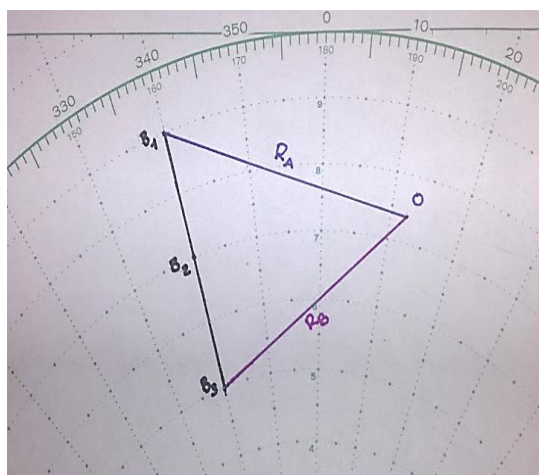


Figura 15. Triángulo de velocidades del caso nº 2. Fuente: propia.

En cumplimiento del RIPA, regla 15: *Situación de cruce*, se decide maniobrar a $UTC_3 = 23:24$ para pasar a $2'$ de B por nuestro babor.

Nota: La maniobra real se efectuaría más tarde, ya que se requiere un tiempo para resolver el ejercicio de cinemática, y además, el TCPA es considerable. No obstante, se ha escogido el momento del tercer ploteo (UTC₃) para realizar la maniobra, con el objetivo de centrar el caso únicamente en dicha maniobra.

Cálculo para pasar a 2 millas náuticas

Con centro en O, se coge la distancia $\overline{OB_1}$, y se traza un círculo, el cual corresponde a V_A según la escala del triángulo de velocidades, que en este caso, es de 1:5 (12 minutos = 1/5 de hora).

Desde el centro de la rosa de maniobra, se describe un círculo con radio igual a la distancia de paso, es decir, CPA = 2 millas náuticas.

Desde B₃, se trazan las dos rectas tangentes al círculo de CPA = 2 millas. Estas tangentes corresponden a las indicatrices de movimiento para pasar a 2 millas de B. Se llamará IM₁ a la IM correspondiente a la caída en la que el buque B pasará por la proa del A (maniobra habitual: el buque A busca la popa del B), e IM₂ a la IM correspondiente a la caída en la que el buque B pasará por la popa del A (maniobra no habitual). Para distinguir entre IM₁ e IM₂, se puede trazar (o simplemente imaginar) el R_A en el centro de la pantalla, y ver cuál de las dos tangentes lo corta (*i.e.* el buque B pasará por la proa de A), siendo IM₁ la que corta el R_A. Aunque el nuevo rumbo de A será diferente al R_A, el criterio es suficientemente preciso para distinguir entre las dos IMs.

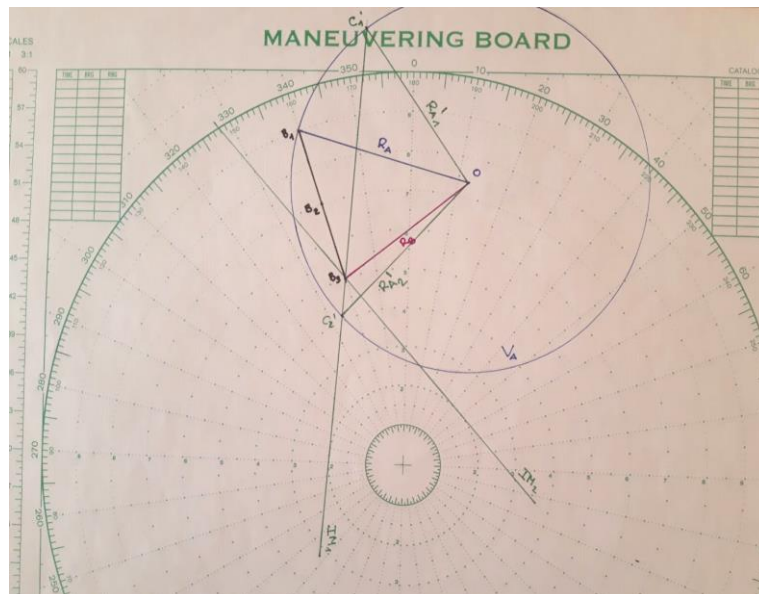


Figura 16. Obtención de los rumbos para pasar al CPA indicado. Fuente: propia.

Indicatriz de movimiento y rumbos de A para pasar a 2 millas, pasando el buque B por la proa del A

La IM_1 se prolonga hasta que corte con el círculo trazado desde O con distancia V_A . Hay dos puntos de corte: C_1 y C_2 . Estos dos puntos dan lugar a dos rumbos de A: $R_{A1}' = \overline{OC_1}$, que corresponde a una caída a estribor, y $R_{A2}' = \overline{OC_2}$, que corresponde a una caída a babor. En ambos casos, el buque B pasará por la proa del A. En el caso de R_{A2}' , se observa que el buque B se alejará del A, ya que el movimiento relativo siempre tiene el sentido que va del extremo del vector **A** (R_A, V_A) al extremo del vector **B** (R_B, V_B), i.e. de C_x a B_3 .

De acuerdo con lo indicado, se obtiene:

$$R_{A1}' = 323,8 \quad R_{A2}' = 224,0$$

Indicatriz de movimiento y rumbos de A para pasar a 2 millas, pasando el buque B por la popa del A

En la Figura 16, se observa que: aunque no se hayan trazado, hay dos rumbos para efectuar esta maniobra, ambos a babor del R_A , e igual que en el caso anterior, uno se acerca y otro se aleja de B.

Consideraciones de la maniobra

Como se ha mencionado en el epígrafe 3.1, los cambios de rumbos se consideran instantáneos, y así se refleja en la Figura 16. No obstante, el buque tiene una respuesta de caída según su ROT (*rate of turn / velocidad de caída*). En términos generales, esta respuesta se indicada en la Tabla 5, considerando un ROT de 20 grados/min y una velocidad de 15 nudos.

Caída	Tiempo	Distancia
10 grados	0,5 min	Casi 0 (0,125')
20 grados	1 min	0,25'
40 grados	2 min	0,5'
60 grados	3 min	0,75'
80 grados	4 min	1'

Tabla 5. Tiempos de respuesta al efectuar una maniobra. Fuente: propia.

3·7 Estudio de los posibles puntos de colisión (PPCs) y de las áreas de peligro previstas (PADs)

3·7·1 Posible punto de colisión (PPC)

El posible punto de colisión, en inglés *Possible Point of Collision* (PPC), es el punto en que dos buques se encontrarán, al navegar cada uno a un rumbo y una distancia determinados. [Jaime et al., 1996, p. 97]

3·7·2 Área de peligro prevista (PAD)

El área de peligro prevista, en inglés *Predicted Area of Danger* (PAD), es un área de forma hexagonal cuya diagonal mayor coincide con la prolongación del rumbo del buque observado y cuyos vértices situados en esa línea (L_1 y L_2) representan los puntos límites de paso por la proa y por la popa del buque observado. [Jaime et al., 1996, p. 97]

3·7·3 Caso nº 3: Situación del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD) en una situación genérica

Navegando al $R_A = 160$ y $V_A = 12$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A UTC₁ = 11:00, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 188$ y distancia $d_{B1} = 8$ millas.
- ✓ A UTC₂ = 11:05, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 187$ y distancia $d_{B2} = 7$ millas.
- ✓ A UTC₃ = 11:10, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 186$ y distancia $d_{B3} = 6$ millas.

Se trata de determinar el PPC y la PAD, sabiendo que la mínima distancia a la que se quiere pasar del buque B es de 2 millas náuticas.

Resolución:

En este caso, se ha trazado el triángulo de velocidades (*vide* Caso nº 1) ampliado 3 veces (*i.e.* las distancias B_1B_3 y OB_3 se prolonga 3 veces), obteniendo:

$$R_B = 087 \quad V_B = 7,0 \text{ nudos} \quad V_r = 12 \text{ nudos}$$

A la UTC₃ = 11:10, cuando $d_{B3} = 6'$, se decide maniobrar para pasar a una distancia de seguridad de $2'$ (*vide* Caso nº 2).

Posible Punto de Colisión (PPC)

El segmento $\overline{O'B_3'}$ (perteneciente al triángulo de velocidades ampliado 3 veces) se traslada al punto $B_4 \equiv 6'$. Igual que en el Caso 2, se hace coincidir el *punto de maniobra* (B_4) con el punto B_3 , y se prolonga, trazando así el rumbo de B, sobre el cual, se situará el PPC y el eje mayor de la PAD.

La indicatriz de movimiento correspondiente al rumbo de alcance (indicatriz de movimiento de alcance, IM_a) es el segmento $\overline{AB_4}$. A continuación, se traslada la IM_a al punto B_3' , y con centro en O' y distancia $\overline{O'B_1} = V_A$, se describe un círculo que corta la IM_a en el punto C_a , siendo $\overline{O'C_a}$ el rumbo de alcance (R_a). Trasladando $\overline{O'C_a}$ al centro de la rosa de maniobra, se obtiene

$$R_a = 150,8$$

El PPC es el punto donde corta el $R_a = 150,8$, trazado desde el centro de la rosa, con el rumbo de B, trazado desde B_4 (prolongación del segmento $\overline{O'B_3'}$ trasladado al punto $B_4 \equiv 6'$) (vide Figura nº 17).

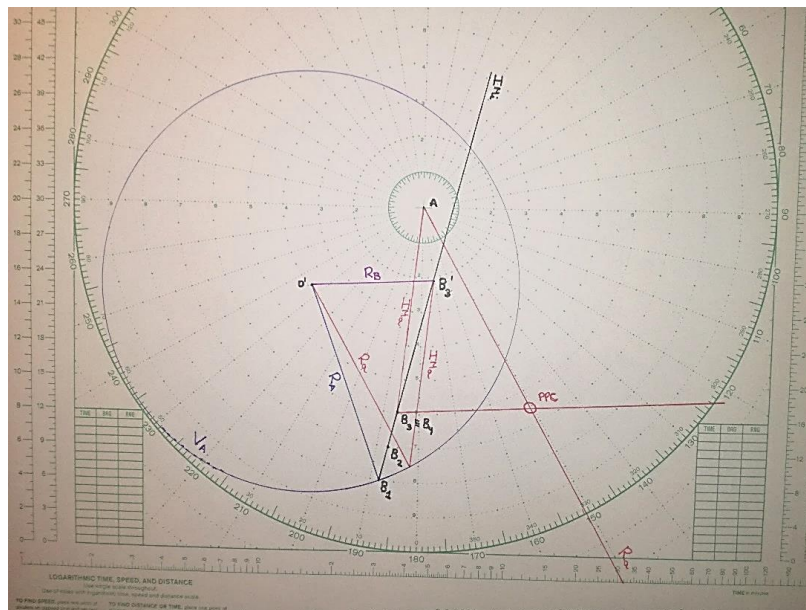


Figura 17. Posible punto de colisión (PPC). Fuente: propia.

Área de Peligro Prevista (PAD)

Vértice de estribor de la PAD (L_1)

Para obtener el vértice L_1 , se debe trazar la IM_1 (IM de cruce por la popa de B) para pasar a una distancia de $2'$ de B, y a partir de ella, se encuentra el $R_{A1}' = 175$ (vide Caso nº 2). Desde el centro de la rosa, se traza el $R_{A1}' = 175$, y donde corte con el rumbo de B ($O'B_3'$ trasladado al punto B_4), se obtiene el vértice L_1 (límite de la PAD por la popa de B) (vide Figura 18).

Vértice de babor de la PAD (L_2)

Para obtener el vértice L_2 , se debe trazar la IM_2 (línea de cruce por la proa de B) para pasar a una distancia de $2'$ de B, de manera análoga a como se ha hecho con la IM_1 . Una vez trazada, se encuentra el $R_{A2}' = 131$. Desde el centro de la rosa, se traza el $R_{A2}' = 131$, y donde corte con el rumbo de B ($O'B_3'$ trasladado al punto B_4), se obtiene el vértice L_2 (límite de la PAD por la proa de B) (vide Figura 18).

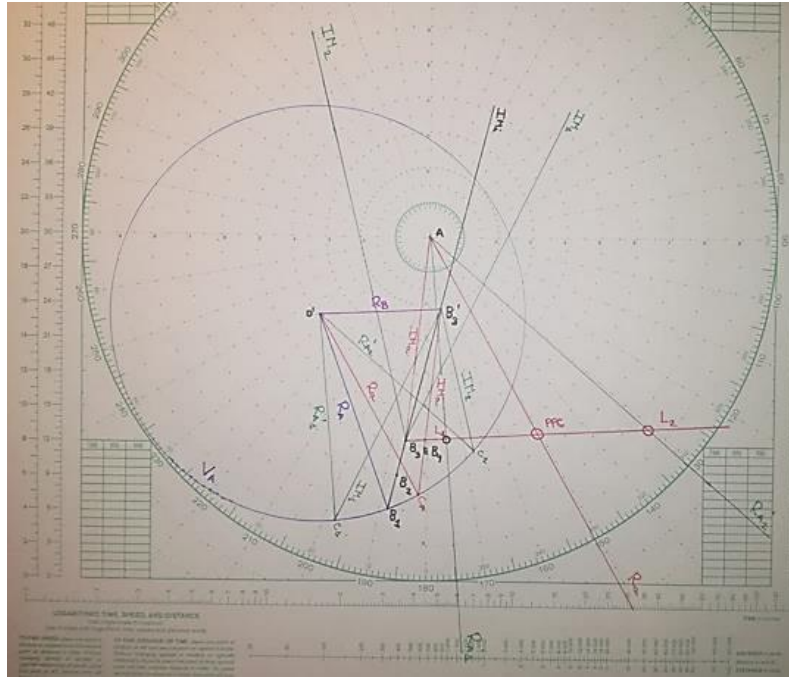


Figura 18. Obtención de los vértices L_1 y L_2 de una PAD. Fuente: propia.

Trazado del área de peligro (PAD)

Para trazar la PAD, en primer lugar, se halla el punto medio del segmento $\overline{L_1L_2}$, que por lo general, no coincide con el PPC. Para ello, se traza la mediatriz del segmento $\overline{L_1L_2}$. A continuación, se repite el proceso en cada uno de los dos segmentos obtenidos, resultando que: tal como se observa en la Figura 19, el segmento $\overline{L_1L_2}$ queda dividido en cuatro partes igual, con tres perpendiculares a él, que son las mediatrices trazadas (líneas discontinuas en la Figura 19).

Luego, la construcción de la PAD se puede realizar de dos maneras:

- i) El semieje menor es la mitad del semieje mayor. [Jaime et al., 1996, p. 107]
- ii) El semieje menor es la mínima distancia de paso (CPA). [García et al., 1994, p. 137]

En el caso i), la cuarta parte del segmento $\overline{L_1L_2}$ se lleva sobre las mediatrices, y uniendo los seis puntos obtenidos con los límites L_1 y L_2 , se configura el contorno de la PAD, la cual queda asimilada a un hexágono. Así es como se ha trazado la PAD en este ejemplo (Caso 3-7-3) (vide Figura 19).

En el caso ii), en lugar de llevar sobre las mediatrices, la cuarta parte del segmento $\overline{L_1L_2}$, se toma la mínima distancia de paso (CPA). El resto del trazado es igual: se unen los seis puntos obtenidos con los límites L_1 y L_2 .

En ambos casos, el hexágono es una simplificación de una elipse. [García et al., 1994, p. 137]

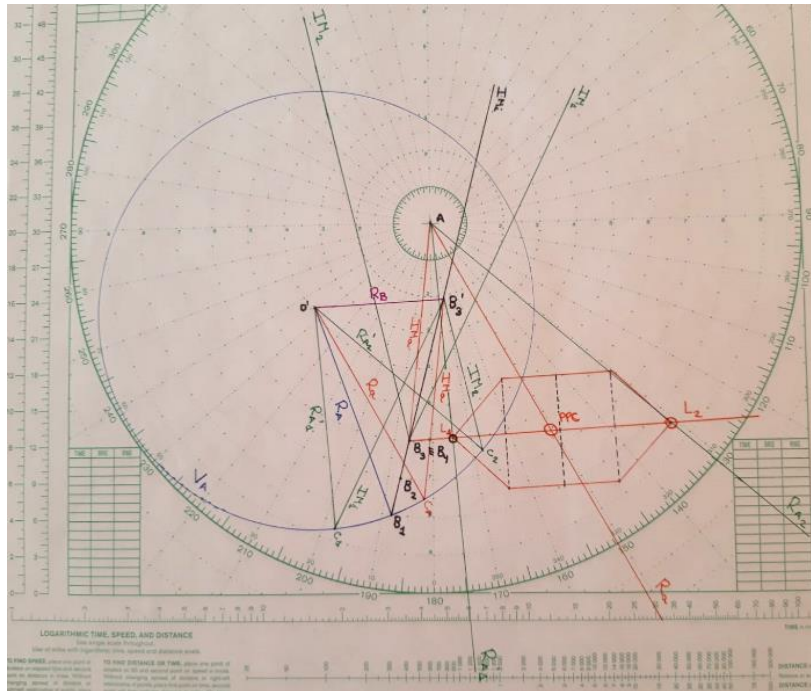


Figura 19. Área de peligro (PAD). Fuente: propia.

3-7-4 Caso nº 4: Estudio de la PAD cuando $V_A > V_B$

Navegando al $R_A = 180$ y $V_A = 18$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A UTC₁ = 10:00, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 220$ y distancia $d_{B1} = 10$ millas.
- ✓ A UTC₂ = 10:03, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 219$ y distancia $d_{B2} = 9$ millas.
- ✓ A UTC₃ = 10:06, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 218$ y distancia $d_{B3} = 8$ millas.

Resolución:

En el presente caso, también se ha trazado el triángulo de velocidades (*vide* Caso nº 1) ampliado 3 veces, obteniendo:

$$R_B = 107 \quad V_B = 15,7 \text{ nudos} \quad V_r = 20 \text{ nudos} \quad V_A > V_B$$

Se decide maniobrar a 6 millas para pasar a una mínima distancia de seguridad de $1'$ (*vide* Caso nº 2), obteniendo:

$$R_a = 158,4 \quad R_{A1}' = 173,3 \quad R_{A2}' = 145,8$$

Se procede a determinar el PPC y los vértices L_1, L_2 . A continuación, se traza la PAD, considerando el semieje menor es la mitad del semieje mayor (*vide* Caso nº 3).

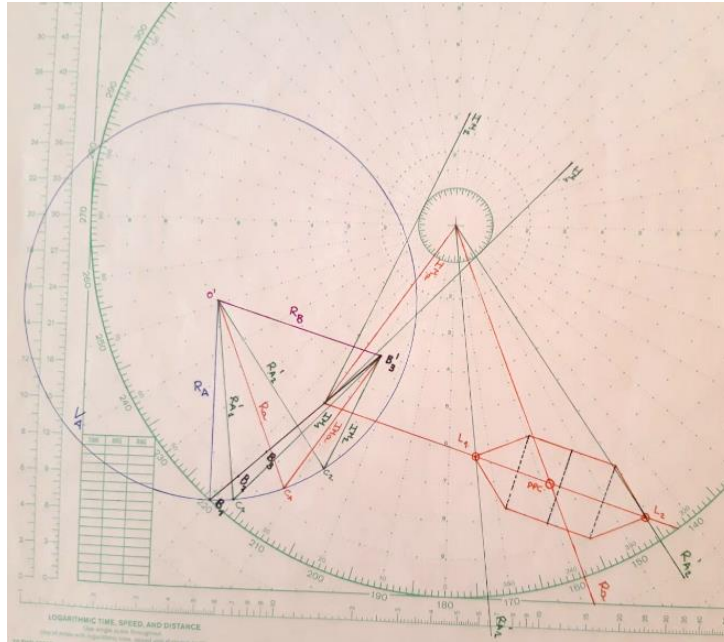


Figura 20. Situación $V_A > V_B$ (PAD). Fuente: propia.

Conclusión:

Se observa que cuando $V_A > V_B$ solamente hay un rumbo de alcance (R_a) y un posible punto de colisión (PPC), y por tanto, una sola área de peligro (PAD). (vide Figura 20)

3·7·5 Caso nº 5: Estudio de la PAD cuando $V_A < V_B$

Navegando al $R_A = 000$ y $V_A = 15$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A $UTC_1 = 00:00$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 049$ y distancia $d_{B1} = 10$ millas.
- ✓ A $UTC_2 = 00:03$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 050$ y distancia $d_{B2} = 8,5$ millas.
- ✓ A $UTC_3 = 00:06$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 051$ y distancia $d_{B3} = 7$ millas.

Resolución:

En este caso, se ha trazado el triángulo de velocidades (vide Caso nº 1) ampliado 3 veces, obteniendo:

$$R_B = 253,2 \quad V_B = 22 \text{ nudos} \quad V_r = 30 \text{ nudos} \quad V_A < V_B$$

Se decide maniobrar a 6 millas para pasar a una mínima de seguridad de $1'$ (vide Caso nº 2), observando que: cuando $V_A < V_B$, la IM_a , la IM_1 y la IM_2 cortan la circunferencia en dos puntos. Por tanto, se obtendrá dos R_a , dos PPCs y dos PADs (vide Figura 21). Se obtiene:

$$R_{a1}' = 020,1 \quad R_{A1}' = 044,9 \quad R_{A2}' = 354,2 \quad R_{a2}'' = 263,8 \quad R_{A1}'' = 270,3 \quad R_{A2}'' = 259,0$$

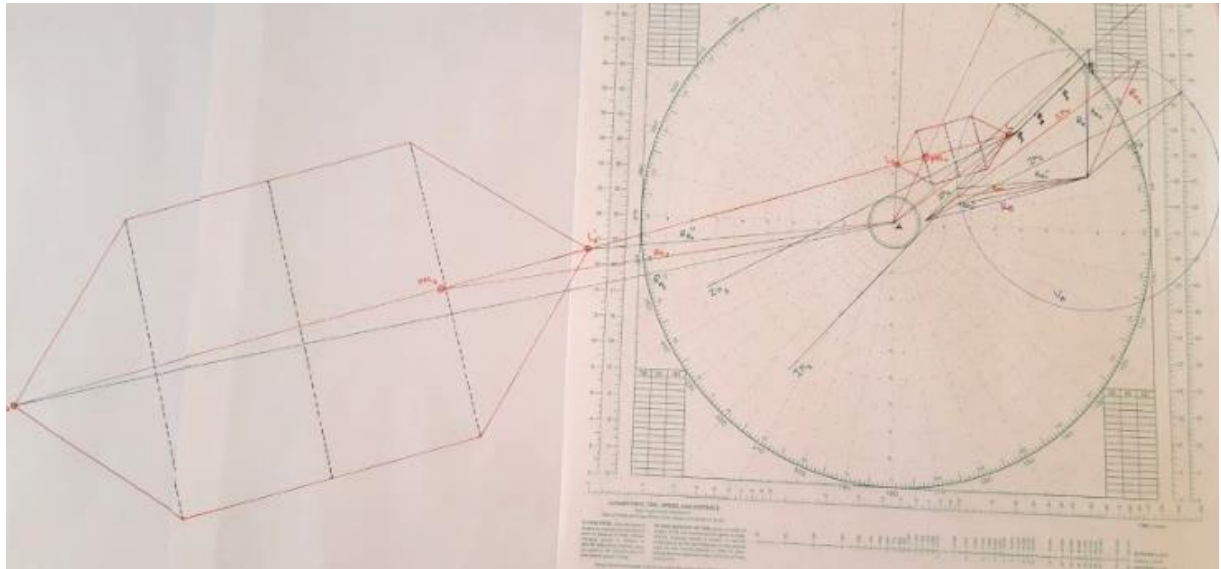


Figura 21. Situación $V_A < V_B$ (PAD). Fuente: propia.

Conclusión:

Se observa que una caída del buque A hacia estribor libra fácilmente la zona de peligro; pero una caída a babor no es recomendable, porque se tarda mucho tiempo en dejar claro al buque B, ya que el buque A es más lento que el B. Este hecho se refleja con **una PAD considerablemente grande a la banda de babor, que corresponde a la maniobra en la que A corta la proa a B**. También por este motivo, la regla 15 del RIPA dice: *Cuando dos buques de propulsión mecánica se crucen con riesgo de abordaje, el buque que tenga al otro por su costado de estribor, se mantendrá apartado de la derrota de este otro y, si las circunstancias lo permiten, evitará cortar la proa.*

3-7-6 Caso nº 6: Verificación de que: cuando $V_A < V_B$, cuanto más parecida sea la velocidad entre ambos buques, más alejados se encontrarán los PPCs.

Se consideran los puntos B_1 , B_2 y B_3 que determinan el movimiento relativo del buque B. Se mantiene el triángulo de velocidades ampliado 3 veces, como en el Caso 5.

Para $V_A = 18$ nudos, se obtienen los datos que se especifican a continuación, así como los PPCs y las PADs que se muestran en la Figura 22.

$$R_{A1}' = 024,9 \quad R_{A1}' = 047,4 \quad R_{A2}' = 001,9 \quad R_{A2}'' = 259,9 \quad R_{A1}'' = 263,2 \quad R_{A2}'' = 256,4$$

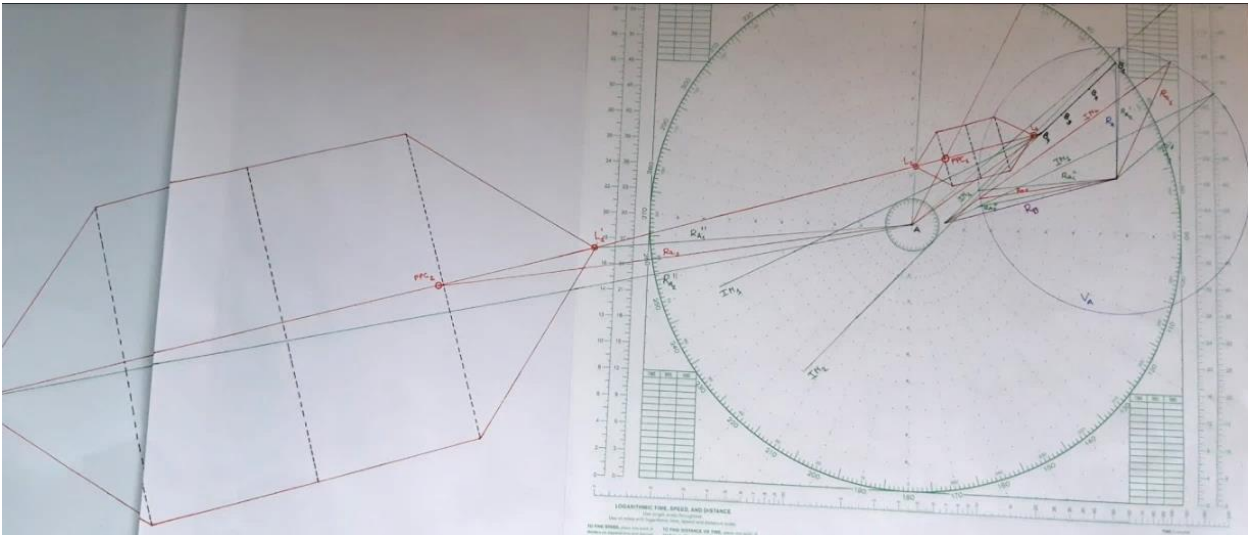


Figura 22. Comparación de PADs: $V_A = 18'$. Fuente: propia.

Para $V_A = 12$ nudos, se obtienen los datos que se especifican a continuación, así como los PPCs y las PADs que se muestran en la Figura 23.

$$R_{a1}' = 010 \quad R_{A1}' = 039 \quad R_{A2}' = 329 \quad R_{a2}'' = 274,9 \quad R_{A1}'' = 294 \quad R_{A2}'' = 265$$

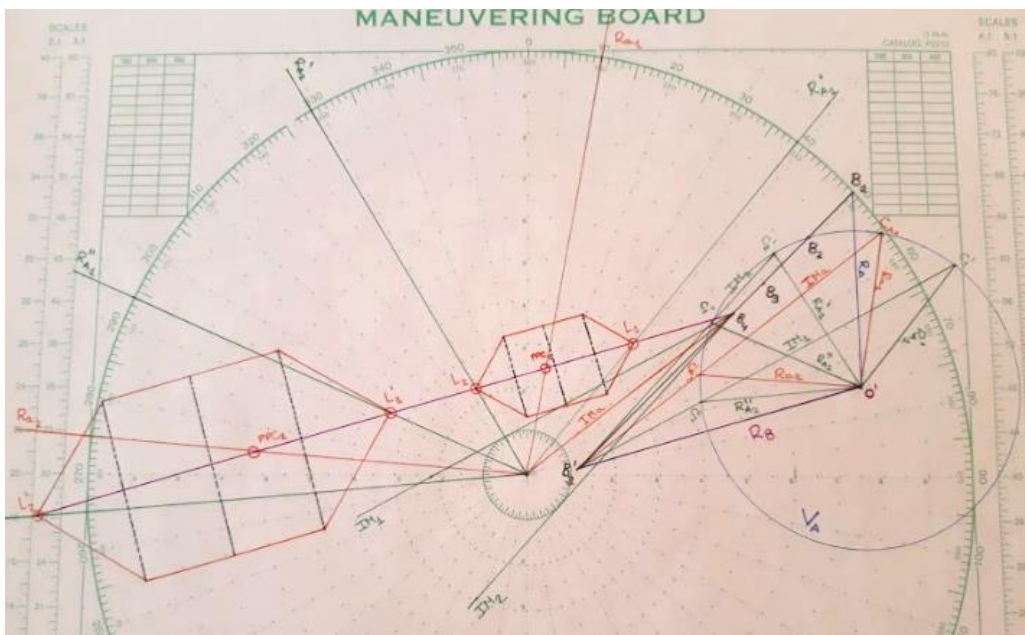


Figura 23. Comparación de PADs: $V_A = 12'$. Fuente: propia.

Conclusión:

Se observa que cuando $V_A < V_B$, cuanto más parecido son las velocidades entre ambos buques, los PPC están más alejados y por consiguiente la PAD de babor se sitúa más alejada. Asimismo, la PAD de babor es más grande a medida que las velocidades son más parecidas.

Para $V_A = 10$ nudos, la IM_1 corta la circunferencia en dos puntos, obteniéndose $R_{A1}' = 027$ y $R_{A2}' = 287$. Sin embargo, la IM_2 no corta. Por tanto, cuando V_A es muy inferior a V_B , solamente se obtendrá el vértice L_1 , correspondiente a la PAD de estribor, y el vértice L_2' , correspondiente a la PAD de babor. **Al no poder determinar las dos PADs, se ha optado en unir las en una sola.** Para esta situación, también se podría considerar el PAD como un rectángulo. (vide Figura 24).

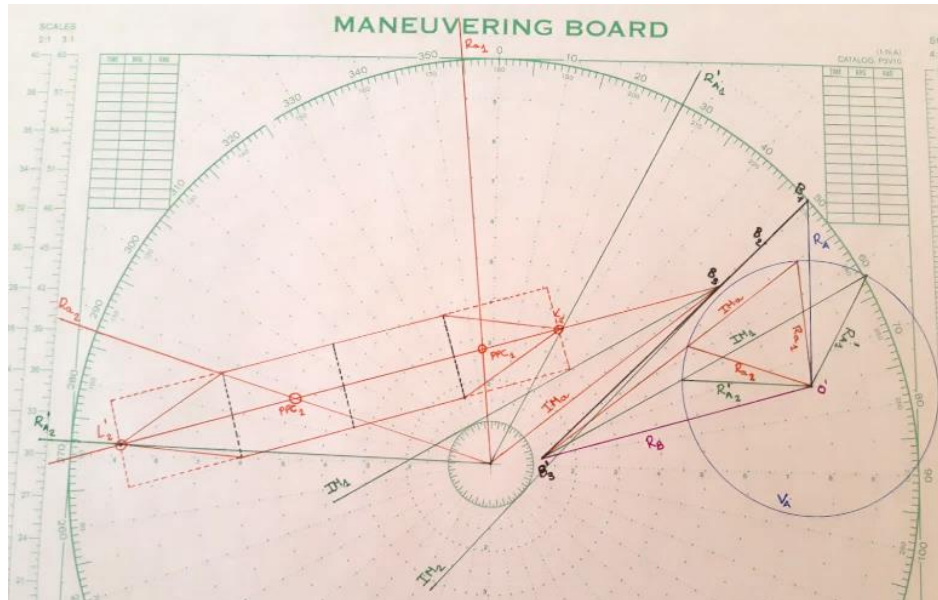


Figura 24. Comparación de PADs: $V_A = 10'$. Fuente: propia.

Conclusión:

En los casos anteriores, con $V_A = 18$; 15 (Caso nº 5) y 12 nudos, se observa que entre las dos áreas de peligro, hay un sector de seguridad. En cambio, con $V_A = 10$ nudos, esta zona desaparece. También se observa que: cuanto más diferencia de velocidad hay entre los buques A y B, este sector de seguridad es más amplio, aunque la PAD de babor es más grande. Luego, hay una V_A , que es la correspondiente a la IM_2 tangente a la circunferencia de radio V_A , a partir de la cual desaparece el sector de seguridad entre ambas PADs, y aunque haya dos PPCs, solo hay una PAD común.

3·7·7 Caso nº 7: Determinación de si el eje mayor de la PAD es igual o varía (y por tanto, la PAD tiene el mismo tamaño o varía) cuando cambia la distancia a la que se encuentra el buque observado

Navegando al $R_A = 095$ y $V_A = 10$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A $UTC_1 = 12:00$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 120$ y distancia $d_{B1} = 9$ millas.
- ✓ A $UTC_2 = 12:05$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 119$ y distancia $d_{B2} = 8$ millas.
- ✓ A $UTC_3 = 12:10$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 118$ y distancia $d_{B3} = 7$ millas.

Se trata de construir diferentes PADs según la distancia a la que se encuentre el buque observado (punto B_4). Para ello, se considera un CPA de 2 millas. Asimismo, para determinar si el eje mayor de la PAD ($\overline{L_1L_2}$) es igual o varía, se analizarán tres casos: B_4 a 5 millas de A; B_4 a 7 millas de A, y B_4 a 9 millas de A.

Resolución:

Para $B_4 \equiv 5'$, se obtienen los datos que se especifican a continuación, así como los PPCs y las PADs que se muestran en la Figura 25.

$$R_B = 003,5 \quad V_B = 6,4 \text{ nudos} \quad R_{a1} = 077,8 \quad R_{A1} = 111 \quad R_{A2} = 051,8 \quad \overline{L_1L_2} = 5,7 \text{ millas}$$

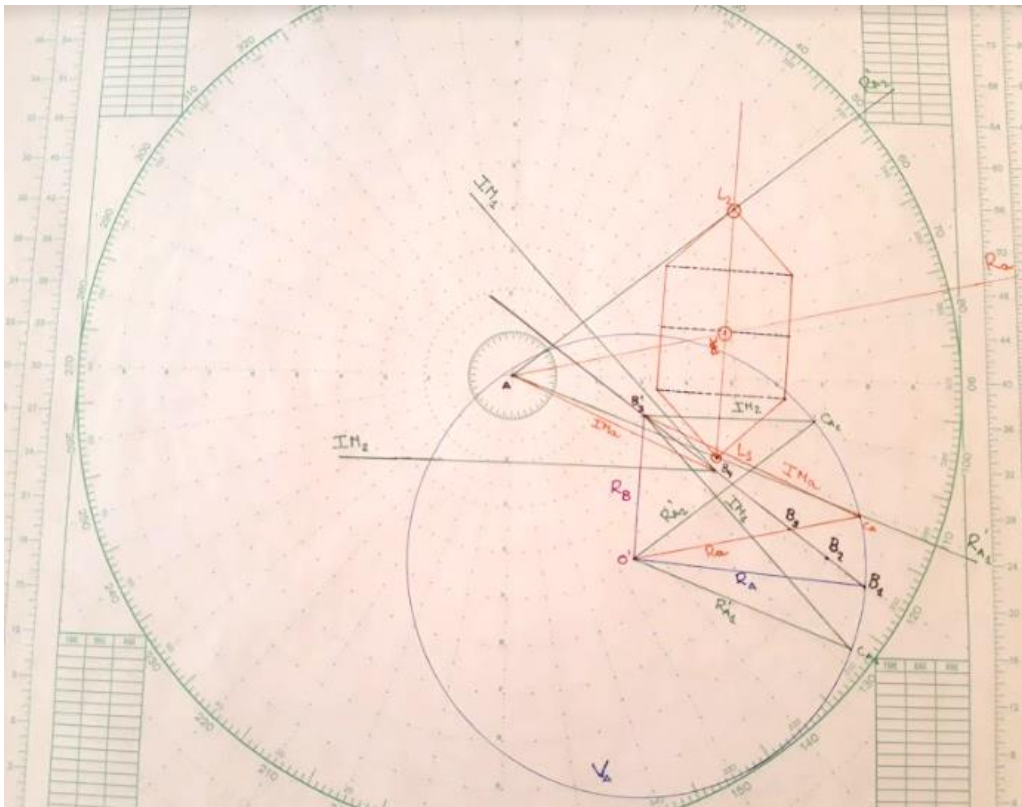


Figura 25. PPC y PAD para B_4 a 5 millas. Fuente: propia.

Para $B_4 \equiv 7'$, se obtienen los datos que se indican a continuación, así como los PPCs y las PADs que se muestran en la Figura 26.

$$R_B = 003,5 \quad V_B = 6,4 \text{ nudos} \quad R_{a1} = 082,4 \quad R_{A1} = 105,9 \quad R_{A2} = 061,9 \quad \overline{L_1L_2} = 5,3 \text{ millas}$$

Para $B_4 \equiv 9'$, se obtienen los datos que se indican a continuación, así como los PPCs y las PADs que se muestran en la Figura 27.

$$R_B = 003,5 \quad V_B = 6,4 \text{ nudos} \quad R_{a1} = 085,3 \quad R_{A1} = 103,6 \quad R_{A2} = 068,0 \quad \overline{L_1L_2} = 5,2 \text{ millas}$$

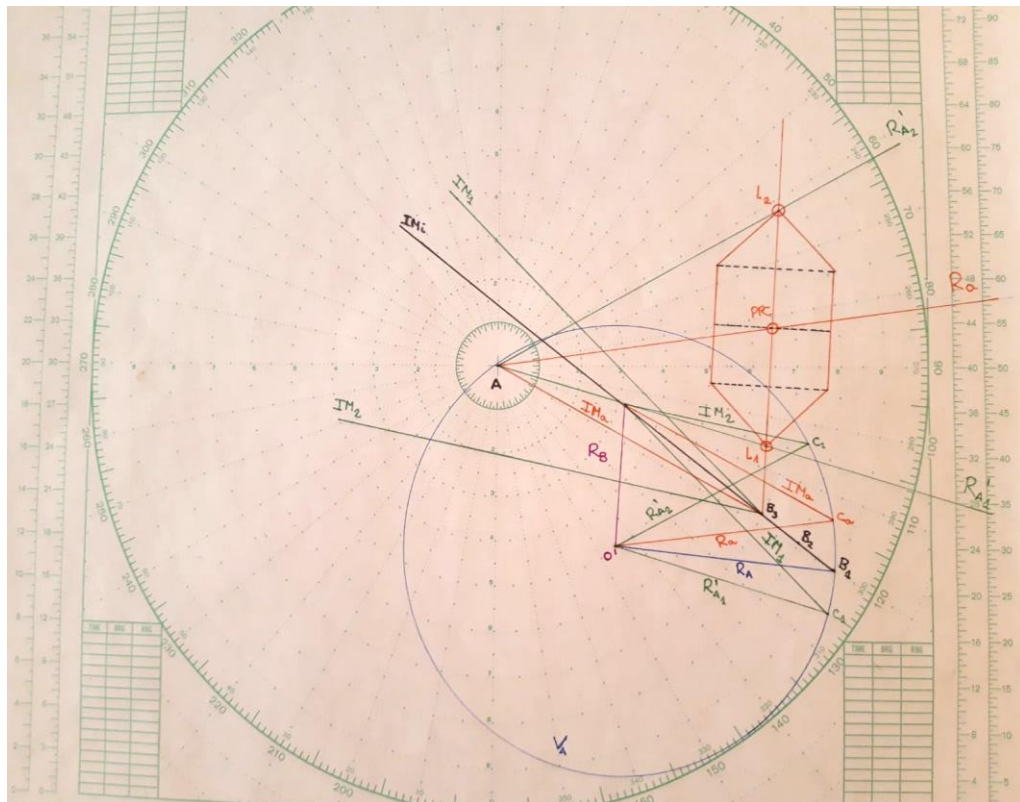


Figura 26. PPC y PAD para B_4 a 7 millas. Fuente: propia.

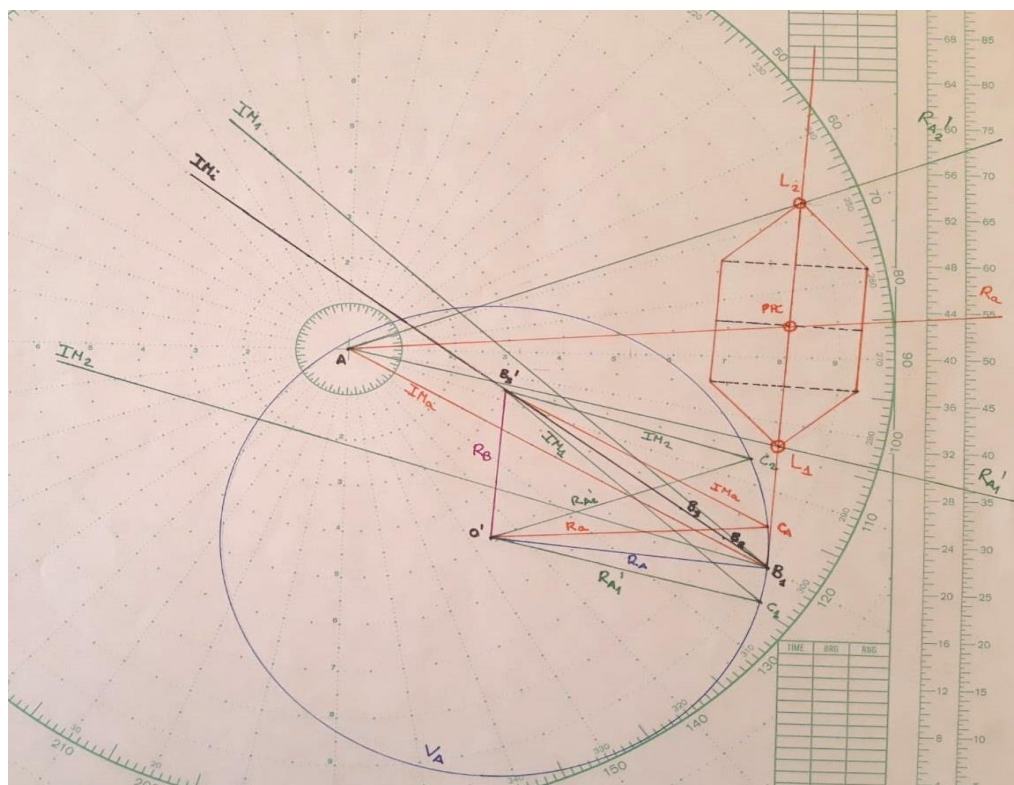


Figura 27. PPC y PAD para B_4 a 9 millas. Fuente: propia.

Conclusión:

Se observa que la PAD cambia de tamaño según a la distancia a la que se encuentre B. A mayor distancia, la PAD es ligeramente más pequeña. En un primer momento, se supuso que el tamaño de la PAD era invariable, pero el resultado gráfico muestra que no es así. Se han planteado dos interpretaciones:

i) El tamaño de la PAD es invariable; pero se ha producido un error sistemático al obtener los rumbos R_{A1} y R_{A2} , de manera que: cuanto menos perpendicular se corten dichos rumbos con el rumbo de B (i.e. cuanto más cerca esté B_4 de A), más se amplificará este error, tal como se muestra en las Figuras 28 y 29. Esta fue la interpretación que inicialmente creyó el tutor.

ii) El resultado gráfico es correcto, de manera que: efectivamente, la PAD cambia de tamaño al variar la distancia de B.

Se decide comprobar el resultado gráfico mediante un cálculo analítico, el cual también estaba previsto desarrollarlo, por cuanto los equipos electrónicos, como la ARPA o el ECDIS, realizan los cálculos de manera analítica y no gráfica.

Visualización de la incidencia del error, en referencia al supuesto i):

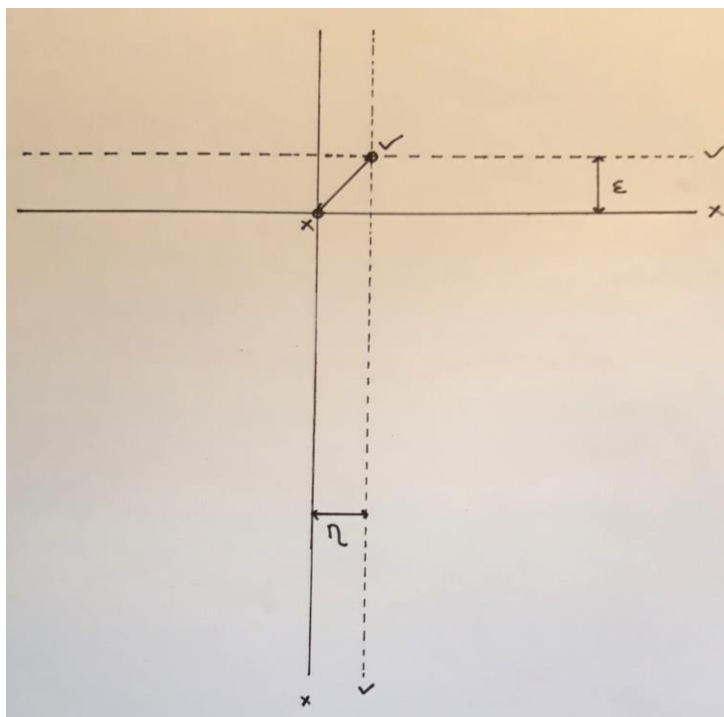


Figura 28. Incidencia de los errores ε y η al trazar rectas perpendiculares. Fuente: propia.

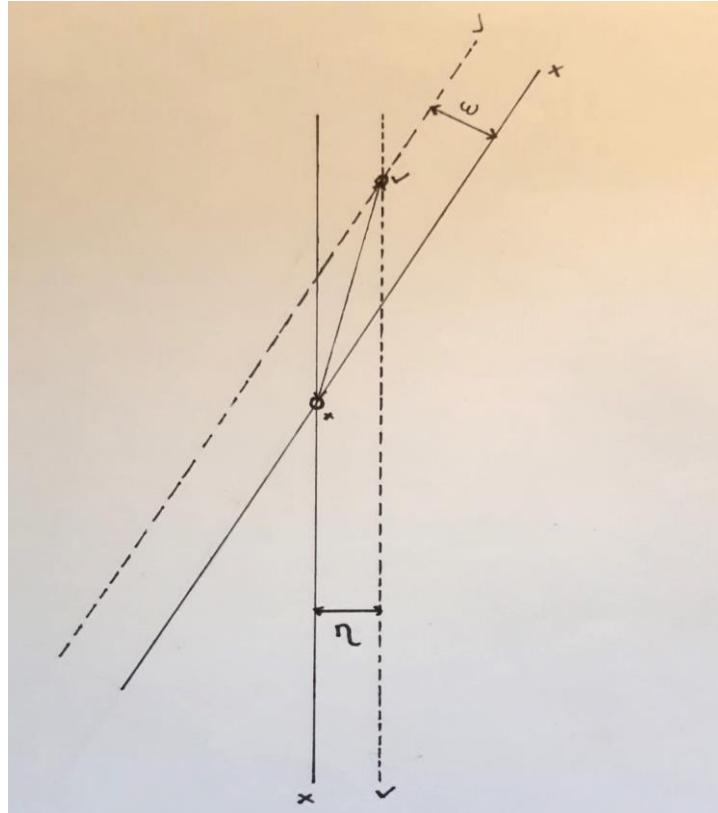


Figura 29. Incidencia de los errores ε y η al trazar rectas oblicuas. Fuente: propia.

3·7·8 Caso nº 8: Determinación analítica de si el eje mayor de la PAD es igual o varía (y por tanto, la PAD tiene el mismo tamaño o varía) cuando cambia la distancia a la que se encuentra el buque observado, y determinación analítica de las coordenadas del PPC

Se toman los datos del caso nº 7, a fin de poder comparar el resultado gráfico con el analítico. El cálculo se ha realizado en Excel (*vide* Anexo). En este epígrafe, se efectúa el cálculo manual con el objetivo de explicar el desarrollo del cálculo analítico, por lo cual, solo se ha considerado el caso de $B_4 \equiv 5'$.

Navegando al $R_A = 095$ y $V_A = 10$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A $UTC_1 = 12:00$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 120$ y distancia $d_{B1} = 9$ millas.
- ✓ A $UTC_2 = 12:05$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 119$ y distancia $d_{B2} = 8$ millas.
- ✓ A $UTC_3 = 12:10$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 118$ y distancia $d_{B3} = 7$ millas.

Resolución:

I. COORDENADAS DE LOS PUNTOS B_1 , B_2 Y B_3 , SIENDO EL CENTRO DE LA PANTALLA (A) EL PUNTO (0; 0)

$$B_1 \equiv (d_1 \cdot \cos D_1; d_1 \cdot \sin D_1) = (9 \cdot \cos 120; 9 \cdot \sin 120) = (-4,5; 7,794) \text{ millas náuticas}$$

$$B_2 \equiv (d_2 \cdot \cos D_2; d_2 \cdot \sin D_2) = (8 \cdot \cos 119; 8 \cdot \sin 119) = (-3,878; 6,997) \text{ millas náuticas}$$

$$B_3 \equiv (d_3 \cdot \cos D_3; d_3 \cdot \sin D_3) = (7 \cdot \cos 118; 7 \cdot \sin 118) = (-3,286; 6,181) \text{ millas náuticas}$$

II. CÁLCULOS ANALÍTICOS DE CINEMÁTICA BÁSICA

Vector de movimiento del buque A:

$$\vec{a} = (V_A \cdot \cos R_A \vec{i} + V_A \cdot \sin R_A \vec{j}) = (10 \cdot \cos 1,658 \vec{i} + 10 \cdot \sin 1,658 \vec{j}) = -0,872 \vec{i} + 9,962 \vec{j}$$

Vector del movimiento relativo:

$$\vec{r} = (d_3 \cdot \cos D_3 - d_1 \cdot \cos D_1) \vec{i} + (d_3 \cdot \sin D_3 - d_1 \cdot \sin D_1) \vec{j}$$

$$IM_x = (d_3 \cdot \cos D_3 - d_1 \cdot \cos D_1) = -3,286 - (-4,5) = 1,214 \text{ nudos}$$

$$IM_y = (d_3 \cdot \sin D_3 - d_1 \cdot \sin D_1) = 6,181 - 7,794 = -1,613 \text{ nudos}$$

Expresando los UTCs en forma decimal, se tiene:

$$V_r = \frac{\sqrt{IM_x^2 + IM_y^2}}{UTC_3 - UTC_1} = \frac{\sqrt{(1,214)^2 + (-1,613)^2}}{12,167 - 12} = 12,115 \text{ nudos}$$

$$\cos IM = \frac{IM_x}{\sqrt{IM_x^2 + IM_y^2}} = \frac{1,214}{\sqrt{(1,214)^2 + (-1,613)^2}}$$

$$IM_{\text{semicircular}} = 0,9259 \text{ rad (las funciones trigonométricas del Excel están en radianes)}$$

$$\text{Si } IM_y \text{ es (+)} \rightarrow IM_{\text{circular}} = IM_{\text{semicircular}}$$

$$\text{Si } IM_y \text{ es (-)} \rightarrow IM_{\text{circular}} = 2\pi - IM_{\text{semicircular}}$$

$$IM_{\text{circular}} \text{ es (-)} \rightarrow IM_{\text{circular}} = 2\pi - 0,9259 = 5,357 \text{ rad} = 306,95 \text{ grados}$$

Cálculo de la velocidad del buque B (V_B):

Componentes V_A :

$$R_A = 095 \text{ grados} = 1,658 \text{ rad}$$

$$V_{Ax} = V_A \cdot \cos R_A = 10 \cdot \cos 1,658 = -0,872 \text{ nudos}$$

$$V_{Ay} = V_A \cdot \sin R_A = 10 \cdot \sin 1,658 = 9,962 \text{ nudos}$$

Componentes V_r :

$$R_r = 306,95 \text{ grados} = 5,357 \text{ rad}$$

$$V_{rx} = V_r \cdot \cos R_r = 12,115 \cdot \cos 5,357 = 7,282 \text{ nudos}$$

$$V_{ry} = V_r \cdot \sin R_r = 12,115 \cdot \sin 5,357 = -9,682 \text{ nudos}$$

Componentes V_B :

$$V_{Bx} = V_{Ax} + V_{rx} = -0,872 + 7,282 = 6,410 \text{ nudos}$$

$$V_{By} = V_{Ay} + V_{ry} = 9,962 + (-9,682) = 0,280 \text{ nudos}$$

$$V_B = \sqrt{V_{Bx}^2 + V_{By}^2} = \sqrt{6,410^2 + 0,280^2} = 6,417 \text{ nudos}$$

Cálculo del rumbo del buque B (R_B):

Se calcula R_B como un arco coseno, puesto que la función arco coseno, a diferencia del arco tangente, es continua en todo su dominio. Esto supone que nunca habrá errores en el Excel.

$$\cos R_B = \frac{V_{B_x}}{\sqrt{V_{B_x}^2 + V_{B_y}^2}} = \frac{6,410}{\sqrt{6,410^2 + 0,280^2}}$$

$$R_{B \text{ semicircular}} = 0,0437 \text{ rad}$$

$$\text{Si } V_{B_y} \text{ es } (+) \rightarrow R_{B \text{ circular}} = R_{B \text{ semicircular}}$$

$$\text{Si } V_{B_y} \text{ es } (-) \rightarrow R_{B \text{ circular}} = 2\pi - R_{B \text{ semicircular}}$$

$$V_{B_y} \text{ es } (+) \rightarrow R_{B \text{ circular}} = 0,0437 \text{ rad} = 2,5 \text{ grados}$$

Coordenadas del punto B₄ (B a 5 millas de A):

$$IM_{\text{circular}} = 2\pi - 0,9259 = 5,357 \text{ rad} = 306,95 \text{ grados (vide Vector del movimiento relativo, p. 36)}$$

$$d_r = AB_3 - AB_4 = 7' - 5' = 2'$$

$$B_{4x} = B_{3x} + d_r \cdot \cos IM = -3,286 + 2 \cdot \cos 5,357 = -2,084 \text{ millas náuticas}$$

$$B_{4y} = B_{3y} + d_r \cdot \sin IM = 6,181 + 2 \cdot \sin 5,357 = 4,582 \text{ millas náuticas}$$

Componentes de la indicatriz de movimiento de alcance (IM_a):

$$A \equiv (0; 0) \quad B_4 \equiv (-2,084; 4,582) \quad \vec{IM} = \vec{B_4A} = (0 - (-2,084); 0 - 4,582) = (2,084; -4,582)$$

$$\cos IM_a = \frac{IM_{a_x}}{\sqrt{IM_{a_x}^2 + IM_{a_y}^2}} = \frac{2,084}{\sqrt{(2,084)^2 + (-4,582)^2}}$$

$$IM_a \text{ semicircular} = 1,144 \text{ rad}$$

$$\text{Si } IM_{a_y} \text{ es } (+) \rightarrow IM_a \text{ circular} = IM_a \text{ semicircular}$$

$$\text{Si } IM_{a_y} \text{ es } (-) \rightarrow IM_a \text{ circular} = 2\pi - IM_a \text{ semicircular}$$

$$IM_{a_y} \text{ es } (-) \rightarrow IM_a \text{ circular} = 2\pi - 1,144 = 5,139 \text{ rad} = 294,46 \text{ grados}$$

Cálculo de la velocidad relativa de alcance (V_r):

En el siguiente desarrollo matemático, se indicará por IM la indicatriz de movimiento de alcance, a fin de simplificar la notación.

$$V_{rx} = V_{Bx} - V_{Ax} \quad V_{ry} = V_{By} - V_{Ay}$$

$$V_r \cdot \cos IM = V_B \cdot \cos R_B - V_A \cdot \cos R_A$$

$$V_r \cdot \sin IM = V_B \cdot \sin R_B - V_A \cdot \sin R_A$$

Se desconoce el nuevo rumbo de A, que es el rumbo de alcance: R_A = R_a. Se procede a eliminar este rumbo elevando al cuadrado, a fin de aplicar la propiedad fundamental de la trigonometría.

$$(V_A \cdot \cos R_A)^2 = (V_B \cdot \cos R_B - V_r \cdot \cos IM)^2$$

$$(V_A \cdot \sin R_A)^2 = (V_B \cdot \sin R_B - V_r \cdot \sin IM)^2$$

Sumando,

$$V_A^2 \cdot \cos^2 R_A + V_A^2 \cdot \sin^2 R_A = V_B^2 \cdot \cos^2 R_B - 2 \cdot V_B \cdot \cos R_B \cdot V_r \cdot \cos IM + V_r^2 \cdot \cos^2 IM$$

$$+ V_B^2 \cdot \sin^2 R_B - 2 \cdot V_B \cdot \sin R_B \cdot V_r \cdot \sin IM + V_r^2 \cdot \sin^2 IM$$

$$V_A^2 \cdot (\cos^2 R_A + \sin^2 R_A) = V_r^2 \cdot (\cos^2 IM + \sin^2 IM) - 2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM + \sin R_B \cdot \sin IM \cdot V_r + V_B^2)$$

$$V_A^2 = V_r^2 - 2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM + \sin R_B \cdot \sin IM) \cdot V_r + V_B^2$$

$$V_r^2 - 2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM + \sin R_B \cdot \sin IM) \cdot V_r + (V_B^2 - V_A^2) = 0$$

Se trata de una ecuación de segundo grado, de la forma $a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0$, donde:

$$x = V_r \quad a = 1 \quad b = -2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM + \sin R_B \cdot \sin IM) \quad c = V_B^2 - V_A^2$$

Para resolver una ecuación de segundo grado, se aplica la fórmula:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Se llama discriminante (Δ) a la expresión que aparece dentro de la raíz: $\Delta = b^2 - 4ac$. Como es sabido, según el valor del discriminante, la ecuación de segundo grado puede tener dos, una o ninguna solución.

A· Si el discriminante es positivo, la ecuación de segundo grado tiene dos soluciones diferentes:

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Esto indica que hay dos velocidades relativas. Si ambas son positivas, quiere decir que habrá dos rumbos de alcance y dos PPCs. Si una es positiva y la otra negativa, quiere decir que el supuesto rumbo de alcance correspondiente a la velocidad relativa negativa, se aleja de B, y por tanto, solo hay un rumbo de alcance y un PPC. De acuerdo con las conclusiones de los Casos 4 y 5, las dos soluciones positivas se dan cuando $V_A < V_B$, y las soluciones de diferente signo, cuando $V_A > V_B$.

B· Si el discriminante es cero, las dos soluciones anteriores coinciden. Por tanto, la ecuación tiene una sola solución. Esto sucede cuando $R_A = R_B$.

C· Si el discriminante es negativo, la ecuación de segundo grado no tiene una solución real, ya que la raíz cuadrada de un número negativo es un número imaginario. Este resultado indica que el círculo trazado con centro en el punto O (zero speed position) y con radio igual a V_A , no corta con la IM_a .

Resolución de la ecuación:

$$a = 1$$

$$b = -2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM + \sin R_B \cdot \sin IM)$$

$$b = -2 \cdot 6,417 \cdot (\cos 0,0437 \cdot \cos 5,139 + \sin 0,0437 \cdot \sin 5,139) = -4,798$$

$$c = V_B^2 - V_A^2 = 6,417^2 - 10^2 = -58,825$$

$$V_r = \frac{-(-4,798) \pm \sqrt{(-4,798)^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-58,825)}}{2 \cdot 1}$$

$$V_{ra1} = 10,435 \text{ nudos} \quad V_{ra2} = -5,637 \text{ nudos}$$

Se trata del caso **A**, con dos soluciones: una positiva (la cual se debe considerar) y otra negativa (que no se debe considerar).

V_{ra1}:

$$\cos R_a = \frac{V_{Bx} - V_{ra1} \cdot \cos IM_a}{V_A} = \frac{6,410 - 10,435 \cdot \cos 5,139}{10} = 0,209$$

$$\sin R_a = \frac{V_{By} - V_{ra1} \cdot \sin IM_a}{V_A} = \frac{0,280 - 10,435 \cdot \sin 5,139}{10} = 0,978$$

Verificación del resultado y obtención del rumbo de alcance:

$$\cos^2 R_a + \sin^2 R_a = 1 \rightarrow 0,209^2 + 0,978^2 = 1$$

$$R_{a \text{ semicircular}} = \arccos 0,209 = 1,360$$

$$\text{Si } \sin R_a \text{ es } (+) \rightarrow R_{a \text{ circular}} = R_{a \text{ semicircular}}$$

$$\text{Si } \sin R_a \text{ es } (-) \rightarrow R_{a \text{ circular}} = 2\pi - R_{a \text{ semicircular}}$$

$$\sin R_a \text{ es } (+) \rightarrow R_{a \text{ circular}} = 1,360 \text{ rad} = \mathbf{77,9 \text{ grados}}$$

V_{ra2}:

$$\cos R_a = \frac{V_{Bx} - V_{ra2} \cdot \cos IM_a}{V_A} = \frac{6,410 - (-5,637) \cdot \cos 5,139}{10} = 0,874$$

$$\sin R_a = \frac{V_{By} - V_{ra2} \cdot \sin IM_a}{V_A} = \frac{0,280 - (-5,637) \cdot \sin 5,139}{10} = -0,485$$

Verificación del resultado y obtención del rumbo de *alcance* (alejamiento por ser V_r negativa):

$$\cos^2 R_a + \sin^2 R_a = 1 \rightarrow 0,874^2 + (-0,485)^2 = 1$$

$$R_{a \text{ semicircular}} = \arccos 0,874 = 0,506$$

$$\sin R_a (-) \rightarrow R_{a \text{ circular}} = 2\pi - 0,506 = 5,777 \text{ rad} = \mathbf{331,0 \text{ grados}}$$

III. CÁLCULO DE LA POSICIÓN GEOGRÁFICA DEL PPC

Se parte de las coordenadas iniciales (posición de A) a $UTC_1 = 12:00$, siendo:

$$\varphi = 40^{\circ}00,0'N \quad \lambda = 40^{\circ}00,0'W$$

Dichas coordenadas, expresadas en radianes y con signo (N, E +; S, W -), son:

$$\varphi = 0,698 \text{ rad} \quad \lambda = -0,698 \text{ rad}$$

Para el cálculo de la situación del PPC, se hará una estima en la que: el buque A navega al $R_A = 095$ hasta que el buque B está a 5 millas (punto B_4), poniendo en este punto, el rumbo de alcance para ir al PPC.

El buque B se encuentra en B_3 a $UTC_3 = 12:10 = 12,167$ h, y la distancia relativa entre B_3 y B_4 (d_{r1}) es de 2 millas (*vide* $B_4 \equiv 5$ millas náuticas, p. 37). Por tanto, la hora del cambio de rumbo (UTC_4) es $UTC_3 + I_1$, siendo:

$$I_1 = \frac{d_{r1}}{V_{r1}} = \frac{2}{12,115} = 0,165 \text{ h}$$

$$UTC_4 = UTC_3 + I_1 = 12,167 + 0,165 = 12,332 \text{ h} = 12:20$$

Luego, la distancia real navegada por el buque A mientras el movimiento relativo de B es sobre la IM_1 , es:

$$d_{n1} \text{ (al } R_A = 095) = (UTC_4 - UTC_1) \cdot V_A = (12,332 - 12) \cdot 10 = 3,32 \text{ millas náuticas}$$

Asimismo, la distancia real navegada por A desde el cambio de rumbo hasta el PPC corresponde al movimiento relativo de B sobre la IM_2 , siendo:

$$d_{n2} \text{ (al } R_A = 77,9) = I_2 \cdot V_A$$

donde el intervalo I_2 es:

$$I_2 = \frac{d_{r2}}{V_{r2}} = \frac{5}{10,435} = 0,479 \text{ h} = 29 \text{ min}$$

Y por tanto,

$$d_{n2} \text{ (al } R_A = 77,9) = I_2 \cdot V_A = 0,479 \cdot 10 = 4,79 \text{ millas náuticas}$$

Además,

$$UTC_{PPC} = UTC_4 + I_2 = 12:20 + 00:29 = \mathbf{12:49}$$

Procediendo a la estima con las distancias d_{n1} y d_{n2} , se obtiene:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{d_{n1}}{60} \cdot \cos R_A = \frac{3,32}{60} \cdot \cos 1,658 = -0,0048 \text{ grados}$$

$$\Delta\lambda_1 = \frac{d_{n1}}{60} \cdot \sin R_A \approx \frac{d_{n1}}{60} \cdot \sin R_A = \frac{3,32}{60} \cdot \sin 1,658 = 0,0719 \text{ grados}$$

$$\Delta\varphi_2 = \frac{d_{n2}}{60} \cdot \cos R_a = \frac{4,79}{60} \cdot \cos 1,360 = 0,0167 \text{ grados}$$

$$\Delta\lambda_2 = \frac{d_{n2}}{60} \cdot \sin R_a \approx \frac{d_{n2}}{60} \cdot \sin R_a = \frac{4,79}{60} \cdot \sin 1,360 = 0,1019 \text{ grados}$$

$$\varphi = 40 - 0,0048 + 0,0167 = 40,0119 \text{ grados} \quad \lambda = -40 + 0,0719 + 0,1019 = -39,826 \text{ grados}$$

Situación del PPC:

$$\varphi_{(PPC)} = 40^{\circ}00,7'N \quad \lambda_{(PPC)} = 39^{\circ}49,6'W$$

IV. CÁLCULO DE R_{A1} Y R_{A2} PARA PASAR A UN DETERMINADO CPA

Cálculo de la IM_1 :

CPA = 2 millas náuticas

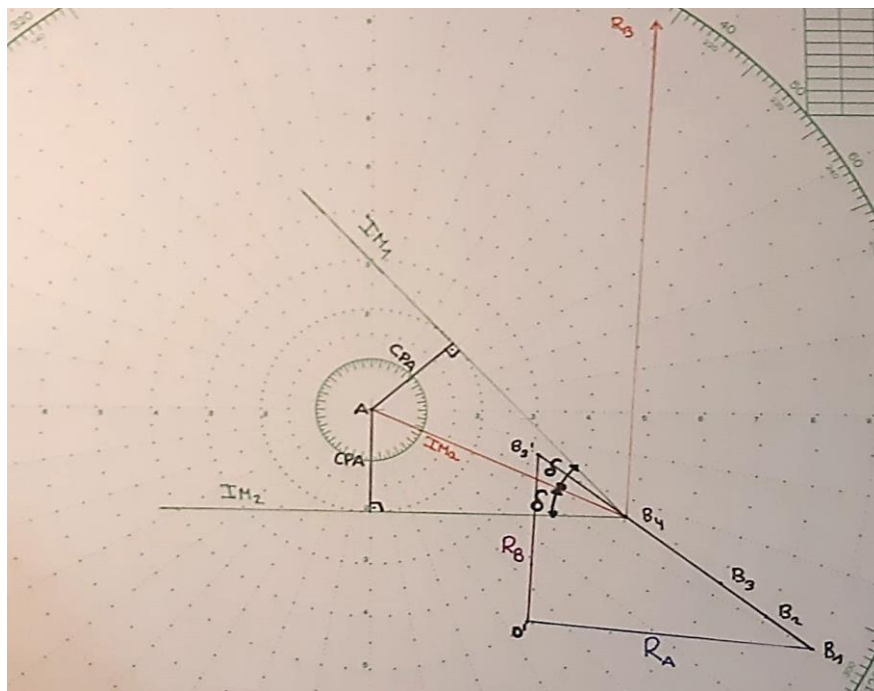


Figura 30. Indicatrices de movimiento de alcance y para pasar a un determinado CPA (2'). Fuente: propia.

La indicatriz de movimiento para pasar por la popa de B (IM_1) es $IM_a + \delta$; mientras que la indicatriz de movimiento para pasar por la proa de B (IM_2) es $IM_a - \delta$. En cada uno de los dos triángulos rectángulos, la distancia de B_4 al centro (A) es la hipotenusa (representada en rojo), de manera que también el ángulo δ es el mismo en ambos triángulos, cuyos elementos comunes son: dos lados (CPA y $\overline{AB_4}$) y el ángulo recto.

Por consiguiente,

$$\sin \delta = \frac{CPA}{AB_4} = \frac{2}{5} = 0,4$$

$$\delta = \arcsin 0,4 = 0,412 \text{ rad} = 23,578 \text{ grados}$$

Con lo cual,

$$IM_1 = IM_a + \delta = 294,456 + 23,578 = 318,034 \text{ grados} \rightarrow IM_1 = 5,550 \text{ rad}$$

$$IM_2 = IM_a - \delta = 294,456 - 23,578 = 270,878 \text{ grados} \rightarrow IM_2 = 4,727 \text{ rad}$$

Cálculo de la velocidad relativa correspondiente a la IM_1 :

Procediendo de manera análoga al cálculo de la velocidad relativa de alcance, se tiene:

$$V_r \cdot \cos IM_1 = V_B \cdot \cos R_B - V_A \cdot \cos R_A$$

$$V_r \cdot \sin IM_1 = V_B \cdot \sin R_B - V_A \cdot \sin R_A$$

$$(V_A \cdot \cos R_A)^2 = (V_B \cdot \cos R_B - V_r \cdot \cos IM_1)^2$$

$$(V_A \cdot \sin R_A)^2 = (V_B \cdot \sin R_B - V_r \cdot \sin IM_1)^2$$

$$V_r^2 - 2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM_1 + \sin R_B \cdot \sin IM_1) \cdot V_r + (V_B^2 - V_A^2) = 0$$

$$a = 1 \quad b = -2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM_1 + \sin R_B \cdot \sin IM_1) \quad c = (V_B^2 - V_A^2)$$

donde:

$$V_B = 6,417 \text{ nudos} \quad R_B = 0,0437 \text{ rad} \quad IM_1 = 5,550 \text{ rad} \quad V_A = 10 \text{ nudos}$$

$$a = 1$$

$$b = -2 \cdot 6,417 \cdot (\cos 0,0437 \cdot \cos 5,550 + \sin 0,0437 \cdot \sin 5,550) = -9,158$$

$$c = 6,417^2 - 10^2 = -58,825$$

$$V_r = \frac{-(-9,158) \pm \sqrt{(-9,158)^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-58,825)}}{2 \cdot 1}$$

$$V_{r1} = 13,511 \text{ nudos} \quad V_{r2} = -4,353 \text{ nudos}$$

La V_{r2} negativa indica que B se aleja de A. En consecuencia, este resultado no se tendrá en cuenta, ya que no va a proporcionar ningún PPC, y por tanto, ninguna PAD. A continuación, solo se calcula el R_{A1}' , correspondiente a la V_{r1} . En la hoja de cálculo que figura en el Anexo, está calculado el R_{A2}' , correspondiente a la V_{r2} .

Comprobación del resultado de V_{r1} y cálculo de R_{A1} (correspondientes a la IM_1):

$$V_{r1x} = V_{r1} \cdot \cos IM_1 = 13,511 \cdot \cos 5,550 = 10,046 \text{ nudos}$$

$$V_{r1y} = V_{r1} \cdot \sin IM_1 = 13,511 \cdot \sin 5,550 = -9,035 \text{ nudos}$$

$$V_{Ax1} = V_{Bx} - V_{r1x} = 6,410 - 10,046 = -3,636 \text{ nudos}$$

$$V_{Ay1} = V_{By} - V_{r1y} = 0,280 - (-9,035) = 9,315 \text{ nudos}$$

$$V_{A1} = \sqrt{V_{Ax1}^2 + V_{Ay1}^2} = \sqrt{(-3,636)^2 + (9,315)^2} = 10 \text{ (comprobación)}$$

$$\cos R_{A1} = \frac{V_{Ax1}}{\sqrt{V_{Ax1}^2 + V_{Ay1}^2}} = \frac{-3,636}{\sqrt{(-3,636)^2 + (9,315)^2}}$$

$$R_{A1} = 1,942 \text{ rad}$$

$$\text{Si } V_{Ay1} \text{ es } (+) \rightarrow R_{A1 \text{ circular}} = R_{A1 \text{ semicircular}}$$

$$\text{Si } V_{Ay1} \text{ es } (-) \rightarrow R_{A1 \text{ circular}} = 2\pi - R_{A1 \text{ semicircular}}$$

$$V_{Ay1} \text{ es } (+) \rightarrow R_{A1 \text{ circular}} = 1,942 \text{ rad} = \mathbf{111,3 \text{ grados}}$$

Cálculo de la velocidad relativa correspondiente a la IM_2 :

De manera análoga a la IM_1 , se tiene:

$$V_r \cdot \cos IM_2 = V_B \cdot \cos R_B - V_A \cdot \cos R_A$$

$$V_r \cdot \sin IM_2 = V_B \cdot \sin R_B - V_A \cdot \sin R_A$$

$$V_r - 2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM_2 + \sin R_B \cdot \sin IM_2) \cdot V_r + (V_B^2 - V_A^2) = 0$$

$$a = 1 \quad b = -2 \cdot V_B \cdot (\cos R_B \cdot \cos IM_2 + \sin R_B \cdot \sin IM_2) \quad c = (V_B^2 - V_A^2)$$

donde:

$$V_B = 6,417 \text{ nudos} \quad R_B = 0,0437 \text{ rad} \quad IM_2 = 4,727 \text{ rad} \quad V_A = 10 \text{ nudos}$$

$$a = 1$$

$$b = -2 \cdot 6,417 \cdot (\cos 0,0437 \cdot \cos 4,727 + \sin 0,0437 \cdot \sin 4,727) = 0,364$$

$$c = 6,417^2 - 10^2 = -58,825$$

$$V_r = \frac{-0,364 \pm \sqrt{(0,364)^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-58,825)}}{2 \cdot 1}$$

$$V_{r1} = 7,489 \text{ nudos} \quad V_{r2} = -7,854 \text{ nudos (B se aleja; no se considera)}$$

El eje mayor de la PAD es la diferencia entre distancias $\overline{B_4L_1}$ y $\overline{B_4L_2}$, las cuales se obtienen de los triángulos AB_4L_1 y AB_4L_2 respectivamente. Asimismo, En el Anexo, se completa el cálculo determinando las posiciones de los extremos de la PAD (L_1 y L_2).

V·1 CÁLCULO DE LA DISTANCIA $\overline{B_4L_1}$

$$\cos D_{B_4} = \frac{B_{4x}}{\sqrt{B_{4x}^2 + B_{4y}^2}} = \frac{-2,084}{\sqrt{(-2,084)^2 + (4,582)^2}}$$

$$D_{B_4 \text{ semicircular}} = 1,998 \text{ rad}$$

$$\text{Si } B_{4y} \text{ es } (+) \rightarrow D_{B_4 \text{ circular}} = D_{B_4 \text{ semicircular}}$$

$$\text{Si } B_{4y} \text{ es } (-) \rightarrow D_{B_4 \text{ circular}} = 2\pi - D_{B_4 \text{ semicircular}}$$

$$B_{4y} (+) = D_{B_4 \text{ circular}} = 1,988 \text{ rad} = \mathbf{114,5 \text{ grados}}$$

$$d_{B_4} = 5 \text{ millas náuticas}$$

Cálculo del ángulo $\widehat{B_4AL_1}$:

$$\widehat{B_4AL_1} = |R_{A1} - D_{B_4}| = |1,942 - 1,998| = 0,056 \text{ rad}$$

$$|R_{A1} - D_{B_4}| \text{ es } > \pi \rightarrow 2\pi - \widehat{B_4AL_1}$$

$$|R_{A1} - D_{B_4}| \text{ es } < \pi \rightarrow \widehat{B_4AL_1}$$

Como,

$$|R_{A1} - D_{B_4}| \text{ es } < \pi \rightarrow 0,056 \text{ rad}$$

Cálculo del ángulo $\widehat{AL_1B_4}$:

$$\widehat{AL_1B_4} = |R_B - R_{A1}| = |0,044 - 1,942| = 1,898 \text{ rad}$$

$$|R_B - R_{A1}| \text{ es } > \pi \rightarrow 2\pi - \widehat{AL_1B_4}$$

$$|R_B - R_{A1}| \text{ es } < \pi \rightarrow \widehat{AL_1B_4}$$

Como,

$$|R_B - R_{A1}| \text{ es } < \pi \rightarrow 1,898 \text{ rad}$$

Cálculo de la distancia $\overline{B_4L_1}$:

Por el teorema de los senos,

$$\frac{\overline{B_4L_1}}{\sin \widehat{B_4AL_1}} = \frac{\overline{AB_4}}{\sin \widehat{AL_1B_4}}$$

$$\overline{B_4L_1} = \frac{\overline{AB_4} \cdot \sin \widehat{B_4AL_1}}{\sin \widehat{AL_1B_4}}$$

$$\overline{B_4L_1} = \frac{5 \cdot \sin 0,056}{\sin 1,898} = 0,289 \text{ millas náuticas}$$

V·2 CÁLCULO DE LA DISTANCIA $\overline{B_4L_2}$

La demora de B_4 es la que se ha calculado en el apartado V·1.

Cálculo $\widehat{B_4AL_2}$:

$$\widehat{B_4AL_2} = |R_{A2} - D_{B4}| = |0,889 - 1,998| = 1,109 \text{ rad}$$

$$|R_{A2} - D_{B4}| \text{ es } > \pi \rightarrow 2\pi - \widehat{B_4AL_2}$$

$$|R_{A2} - D_{B4}| \text{ es } < \pi \rightarrow \widehat{B_4AL_2}$$

Como,

$$|R_{A2} - D_{B4}| \text{ es } < \pi \rightarrow 1,109 \text{ rad}$$

Cálculo $\widehat{B_4L_2A}$:

$$\widehat{B_4L_2A} = |R_B - R_{A2}| = |0,044 - 0,889| = 0,845 \text{ rad}$$

$$|R_B - R_{A2}| \text{ es } > \pi \rightarrow 2\pi - \widehat{B_4L_2A}$$

$$|R_B - R_{A2}| \text{ es } < \pi \rightarrow \widehat{B_4L_2A}$$

Como,

$$|R_B - R_{A2}| \text{ es } < \pi \rightarrow 0,845 \text{ rad}$$

Cálculo de la distancia $\overline{B_4L_2}$:

Por el teorema de los senos, y de manera análoga al cálculo de la distancia $\overline{B_4L_1}$,

$$\overline{B_4L_2} = \frac{\overline{AB_4} \cdot \sin \widehat{B_4AL_2}}{\sin \widehat{B_4L_2A}}$$

$$\overline{B_4L_2} = \frac{5 \cdot \sin 1,109}{\sin 0,845} = 5,975 \text{ millas náuticas}$$

V·3 CÁLCULO DE LA DISTANCIA $\overline{L_1L_2}$

$$\overline{L_1L_2} = \overline{B_4L_2} - \overline{B_4L_1} = 5,975 - 0,289 = 5,686 \text{ millas náuticas}$$

VI. CONCLUSIÓN

Se observa que los resultados del cálculo analítico y del método gráfico coinciden. Se puede comprobar que los demás casos (B a 7 y a 9 millas) también coinciden, contrastando los datos del Caso nº 7 (método gráfico) con los del Anexo (cálculo analítico en hoja de cálculo). En el caso de B a 9 millas, hay una diferencia de 0,1 millas (5,1 analítico y 5,2 gráfico), la cual atribuimos a la menor precisión del método gráfico, ya que 0,1 millas es la máxima precisión en distancia que se puede obtener gráficamente.

Los resultados ponen de manifiesto que la PAD cambia de tamaño según la distancia a la que se encuentre B. Concretamente, cuanto más lejos esté B, más pequeña es la distancia $\overline{L_1L_2}$, y por tanto, el tamaño de la PAD.

También se observa en el cálculo analítico (vide Anexo) que el PPC cambia ligeramente su posición:

Para B a 5 millas: $\varphi = 40^\circ 00,713'N$ $\lambda = 39^\circ 49,569'W$

Para B a 7 millas: $\varphi = 40^\circ 00,680'N$ $\lambda = 39^\circ 49,530'W$

Para B a 9 millas: $\varphi = 40^\circ 00,660'N$ $\lambda = 39^\circ 49,509'W$

No podemos dar una explicación a estos hechos. Entendemos que el PPC debería ser un punto geográfico invariable, y que igualmente, el área de peligro alrededor del PPC debería permanecer constante, ya que solo depende del CPA.

3-7-9 Caso nº 9: Buque B parado: situación del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD)

Cuando el buque observado (B) está parado, el PPC es la posición del propio buque B, y la PAD, el círculo trazado con centro en B y distancia el CPA requerido [García et al., 1994, p. 137]. A continuación, se muestra un caso de buque parado por la proa.

Navegando al $R_A = 020$ y $V_A = 15$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A UTC₁ = 00:00, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 020$ y distancia $d_{B1} = 10$ millas.
- ✓ A UTC₂ = 00:06, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 020$ y distancia $d_{B2} = 8,5$ millas.
- ✓ A UTC₃ = 00:12, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 020$ y distancia $d_{B3} = 7$ millas.

Resolución:

En la rosa de maniobra, se confecciona el triángulo de velocidades (*vide* Caso nº 1), obteniendo que los puntos O y B₃ coinciden, con lo cual,

$$R_B: \text{indefinido} \quad V_B = 0 \text{ nudos}$$

Se decide maniobrar a 6 millas para pasar a una mínima distancia de 2 millas de B (*vide* Caso nº 2), obteniendo:

$$R_a = 020 \quad R_{A1}' = 039,8 \quad R_{A2}' = 000,2$$

En la Figura 32, se muestran los rumbos R_{A1}' y R_{A2}' , así como el área de peligro (PAD), considerada como un círculo con centro en el PPC y tangente a R_{A1}' y R_{A2}' . En los siguientes casos, se explicará cómo situar el PPC.

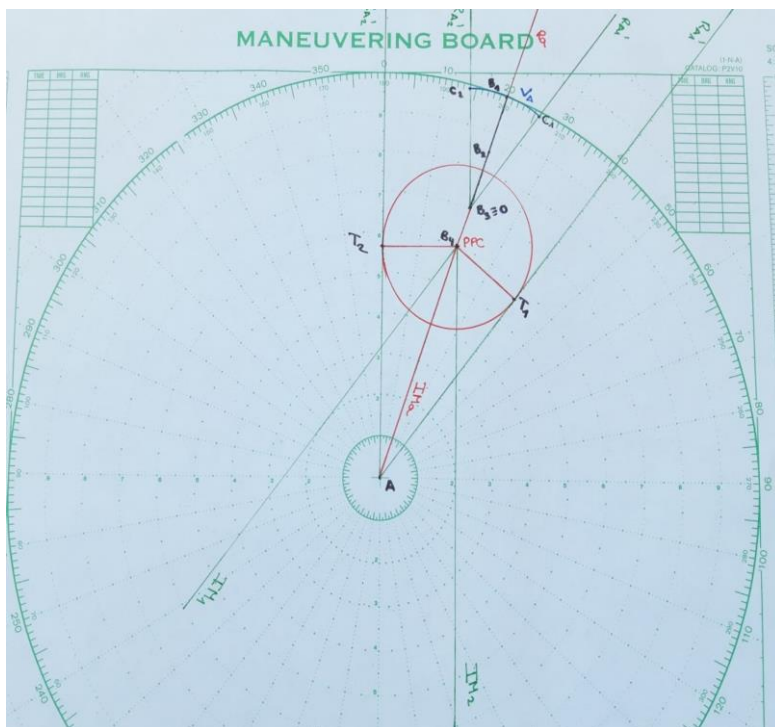


Figura 32. PPC y PAD en una situación buque parado. Fuente: propia.

3·7·10 Caso nº 10: Buque B de vuelta encontrada: situación del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD)

Navegando al $R_A = 000$ y $V_A = 15$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A UTC₁ = 00:00, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 000$ y distancia $d_{B1} = 10$ millas.
- ✓ A UTC₂ = 00:03, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 000$ y distancia $d_{B2} = 8,5$ millas.
- ✓ A UTC₃ = 00:06, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 000$ y distancia $d_{B3} = 7$ millas.

Resolución:

En la rosa de maniobra, se confecciona el triángulo de velocidades (*vide* Caso nº 1), obteniendo:

$$R_B = 180 \quad V_B = 15 \text{ nudos}$$

Asimismo, se decide maniobrar a 6 millas para pasar a una mínima distancia de 2 millas de B (*vide* Caso nº 2), obteniendo:

$$R_a = 000 \quad R_{A1}' = 038,7 \quad R_{A2}' = 321,8$$

Puesto que las trayectorias de A y de B coinciden, no hay un punto de corte definido entre los rumbos de los dos buques, sino que el PPC está sobre la trayectoria común, a la distancia de A que se determina a continuación:

$$\text{Distancia relativa: } d_r = \overline{B_1 B_3} = 3 \text{ millas náuticas}$$

$$V_r = \frac{d_r}{I} = \frac{3 \text{ millas}}{0,1 \text{ h}} = 30 \text{ nudos}$$

$$d_{B4-A} = 6 \text{ millas náuticas}$$

$$\text{TCPA} = \frac{d_{B4-A}}{V_r} \cdot 60 = \frac{6}{30} \cdot 60 = 12 \text{ minutos}$$

$$d_{\text{PPC}} = \overline{A \text{ PPC}} = V_A \cdot \text{TCPA} = 15 \cdot \frac{12}{60} = 3 \text{ millas}$$

Tampoco existen los puntos de corte entre los rumbos R_{A1}' y R_{A2}' con el rumbo de B, a fin de determinar los límites de la L_1 y L_2 de la PAD. Por tanto, se opta por trazar desde el PPC, una circunferencia tangente al R_{A1}' y al R_{A2}' . Esto es equivalente a considerar el buque B parado y el A con una velocidad igual a la V_r , la cual es superior a la V_A .

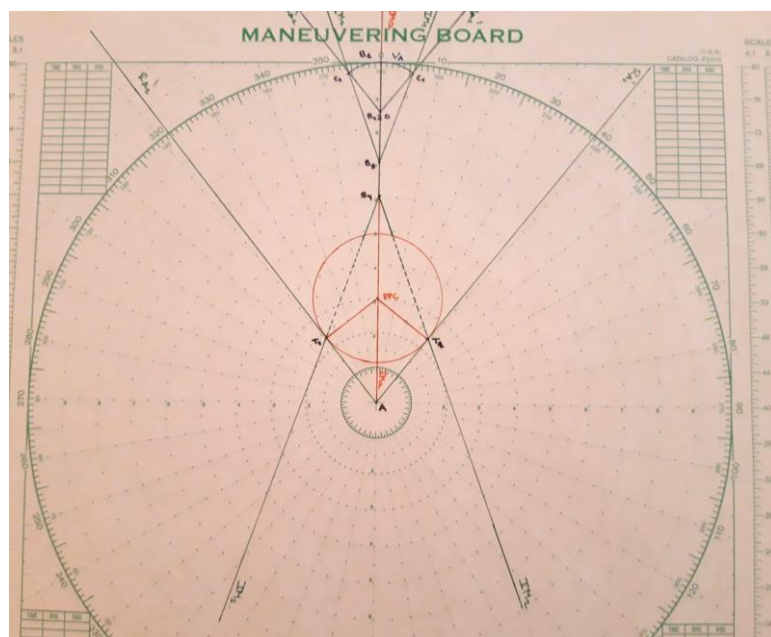


Figura 33. PPC y PAD en una situación de vuelta encontrada. Fuente: propia.

3·7·11 Caso nº 11: Situación de alcance (el buque A alcanza al B; $V_A > V_B$): posición del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD)

Navegando al $R_A = 000$ y $V_A = 15$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A $UTC_1 = 00:00$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 000$ y distancia $d_{B1} = 9$ millas.
- ✓ A $UTC_2 = 00:10$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 000$ y distancia $d_{B2} = 8$ millas.
- ✓ A $UTC_3 = 00:20$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 000$ y distancia $d_{B3} = 7$ millas.

Resolución:

En la rosa de maniobra, se confecciona el triángulo de velocidades (*vide* Caso nº 1), obteniendo:

$$R_B = 000 \quad V_B = 9 \text{ nudos} \quad V_A > V_B$$

Se decide maniobrar a 4 millas para pasar a una distancia de 1,5' millas de B (*vide* Caso nº 2), obteniendo:

$$R_a = 000 \quad R_{A1}' = 009,2 \quad R_{A2}' = 350,8$$

Igual que en el caso de vuelta encontrada, las trayectorias de los buques A y B coinciden, con lo cual, no hay un punto de corte definido entre los rumbos de dichos buques, sino que el PPC está sobre la trayectoria común, a la distancia de A que se determina a continuación:

$$\text{Distancia relativa: } d_r = \overline{B_1 B_3} = 2 \text{ millas náuticas}$$

$$V_r = \frac{d_r}{t} = \frac{2 \text{ millas}}{\frac{1}{3} \text{ h}} = 6 \text{ nudos}$$

$$d_{B4-A} = 4 \text{ millas náuticas}$$

$$TCPA = \frac{d_{B4-A}}{V_r} \cdot 60 = \frac{4}{6} \cdot 60 = 40 \text{ minutos}$$

$$d_{PPC} = \overline{A_{PPC}} = V_A \cdot TCPA = 15 \cdot \frac{40}{60} = \mathbf{10 \text{ millas}}$$

Se obtiene que el PPC está situado a 10 millas por la proa del buque A. Se decide utilizar una escala más pequeña; en este caso, 1:2. Por tanto, el PPC se sitúa de 5 millas por la proa de A. Se observa que tampoco se pueden obtener los límites L_1 y L_2 de la PAD, con lo cual, se opta por trazar desde el PPC, una circunferencia tangente a R_{A1}' y R_{A2}' . Esto es equivalente a considerar el buque B parado y el A con una velocidad igual a la V_r , la cual es inferior a la V_A .

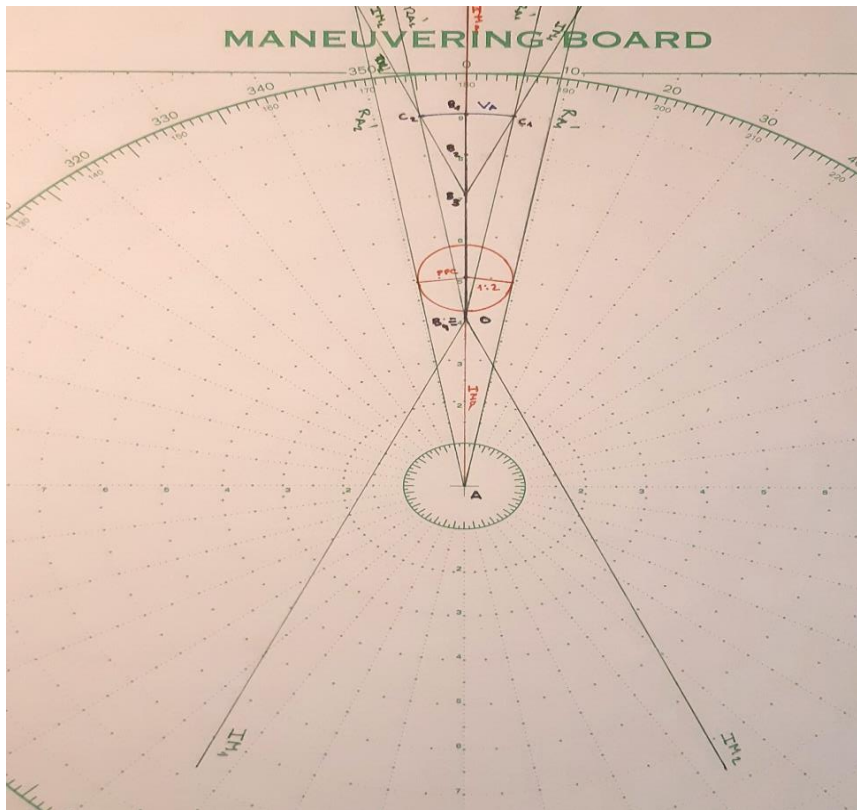


Figura 34. PPC y PAD en una situación de alcance, donde $V_A > V_B$. Fuente: propia.

3-7-12 Caso nº 12: Situación de ser alcanzados (el buque B alcanza al A; $V_A < V_B$): posición del punto de colisión (PPC) y construcción del área de peligro (PAD)

Navegando al $R_A = 000$ y $V_A = 12$ nudos, se observan en la pantalla radar las demoras y distancias siguientes del buque B:

- ✓ A $UTC_1 = 00:00$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB1} = 180$ y distancia $d_{B1} = 6$ millas.
- ✓ A $UTC_2 = 00:10$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB2} = 180$ y distancia $d_{B2} = 5$ millas.
- ✓ A $UTC_3 = 00:20$, se toma una demora verdadera del eco $D_{VB3} = 180$ y distancia $d_{B3} = 4$ millas.

Resolución:

En la rosa de maniobra, se confecciona el triángulo de velocidades (*vide* Caso nº 1), obteniendo:

$$R_B = 000 \quad V_B = 18 \text{ nudos} \quad V_A < V_B$$

Se decide maniobrar a 3 millas para pasar a una distancia de 1,5' millas de B (*vide* Caso nº 2), obteniendo:

$$R_a = 000 \quad R_{A1}' = 018,7 \quad R_{A2}' = 341,3$$

Igual que en los dos casos anteriores, el PPC está sobre la trayectoria común, a la distancia de A que se determina a continuación:

$$\text{Distancia relativa: } d_r = \overline{B_1B_3} = 2 \text{ millas náuticas}$$

$$V_r = \frac{d_r}{t} = \frac{2 \text{ millas}}{\frac{1}{3} \text{ h}} = 6 \text{ nudos}$$

$$d_{B4-A} = 3 \text{ millas náuticas}$$

$$\text{TCPA} = \frac{d_{B4-A}}{V_r} \cdot 60 = \frac{3}{6} \cdot 60 = 30 \text{ minutos}$$

$$d_{\text{PPC}} = \overline{A \text{ PPC}} = V_A \cdot \text{TCPA} = 12 \cdot \frac{30}{60} = \mathbf{6 \text{ millas}}$$

Se obtiene que el PPC está situado a 6 millas por la proa del buque A, y de igual manera que en los dos casos anteriores, se opta por trazar desde el PPC, una circunferencia tangente a R_{A1}' y R_{A2}' para determinar la PAD. Esto es equivalente a considerar el buque A parado y el B con una velocidad igual a la V_r , la cual es inferior a la V_B .

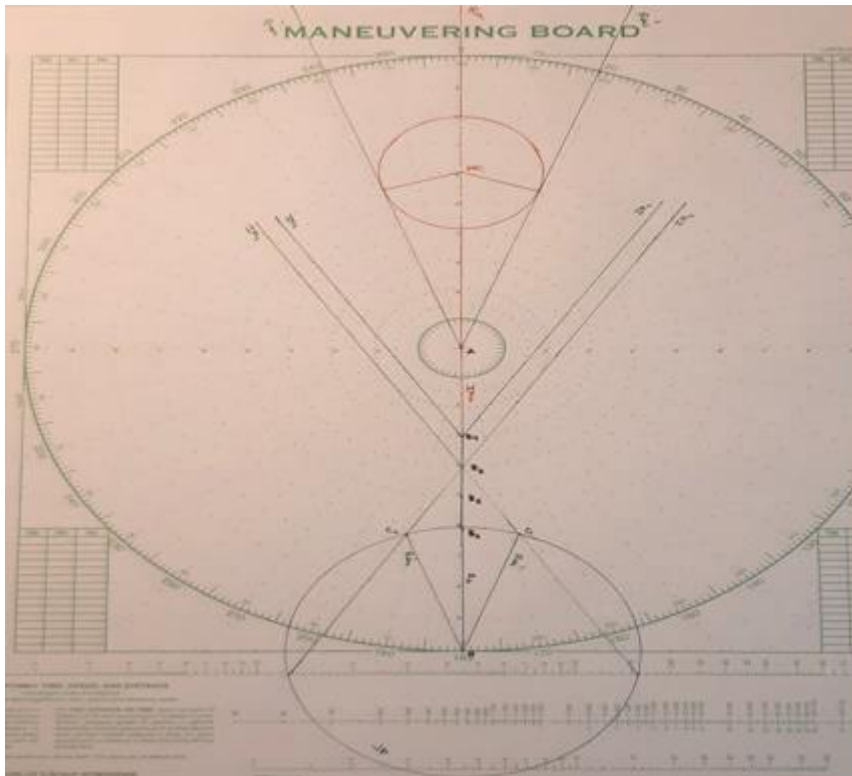


Figura 35. PPC y PAD en una situación de alcance, donde $V_A < V_B$. Fuente: propia.

Capítulo 4. Aplicación al ECDIS

4.1 Introducción

Hay dos tipos de cartas digitales: cartas raster (RNC: *raster nautical chart*) y cartas vectoriales o cartas náuticas electrónicas propiamente dichas (ENC: *electronic nautical chart*). Una carta raster es una imagen escaneada y pasiva de una carta de papel, mientras que una carta vectorial es una base de datos digital de todos los objetos representados en la carta.

Las ENCs son bases de datos, normativizadas en su contenido, estructura y formato, y generadas para su uso en el ECDIS. Solo pueden ser levantadas por los servicios hidrográficos nacionales y por empresas autorizadas. Contiene toda la información cartográfica necesaria para la seguridad de la navegación, como línea de costa, veriles, DSTs, balizamiento, sondas, naturaleza del fondo marino, faros, etc., y toda esta información está estructurada en capas (en inglés, *layers*) que se pueden visualizar o no en el ECDIS. Además, cumplen con las especificaciones de los estándares de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI/IHO: *International Hydrographic Organization*).

IHO ECDIS Standards	Current Edition
ECDIS Display and Presentation	S-52 PresLib Edition 3.4
Electronic Navigational Chart (ENC)	S-57 Edition 3.1, S-57 Edition 3.1.1 and S-57 Maintenance Document (Cumulative) Number 8
IHO Recommended ENC Validity Checks	S-58 Edition 3.0
Raster Navigational Chart (RNC)	S-61 Edition 1.0
ENC Producer Codes	S-62 Edition 2.4
ENC Data Protection	S-63 Edition 1.1
IHO Test Data Sets for ECDIS	S-64 Edition 1.0
ENC Production Guidance	S-65 Edition 1.0

Tabla 6. Estándares de la OHI. Fuente: [10]

4.2 Funcionamiento de las capas del ECDIS

Como se ha indicado, el ECDIS trabaja por capas, y cada una de ellas proporciona una determinada información. Así por ejemplo, la visualización de un eco del radar en la pantalla del ECDIS está hecho por una capa, y puede ser de dos maneras: por superposición de la imagen del radar en el ECDIS (función *Overlay*) y/o por visualización del vector verdadero proporcionado por la ARPA (función *ARPA*). A continuación, se muestran las principales capas.

Capa básica: *Task list*→*Charts*→*Layers*→*Base*

En esta capa, figura la información que es estrictamente imprescindible; es decir: la línea de la costa, los veriles hasta el *safety contour* (veril de seguridad que se ha determinado), y los peligros hasta el *safety depth* (sonda carta de seguridad que se ha determinado).

Se hace observar que: si la información que no se visualiza está contemplada en el sistema de alarmas, será tenida en cuenta. Así por ejemplo, si está seleccionada la alarma *inshore traffic zone* (zona de navegación costera de un dispositivo de separación de tráfico), aunque ni el dispositivo ni la zona de navegación costera se vean en la carta, la alarma se activará cuando:

i) Al chequear la ruta, los XTDs (cross track distances / márgenes laterales de seguridad) corten el perímetro de la zona de navegación costera.

ii) Navegando, el *Frame* corte dicho perímetro. El *Frame* es el rectángulo alrededor del buque formado por: los XTDs determinados para la navegación; cierta distancia o tiempo por la proa, y el menor de los dos XTDs por la popa.

Capa estándar: *Task list*→*Charts*→*Layers*→*Standard*

A la capa básica, se le añade la principal información útil para la navegación, como: dispositivos de separación de tráfico; canales de entrada y salida; faros, farolas y boyas. En la siguiente imagen, se muestra la capa estándar, en la que se visualiza el balizamiento y parte del canal de entrada y salida del puerto de Barcelona.

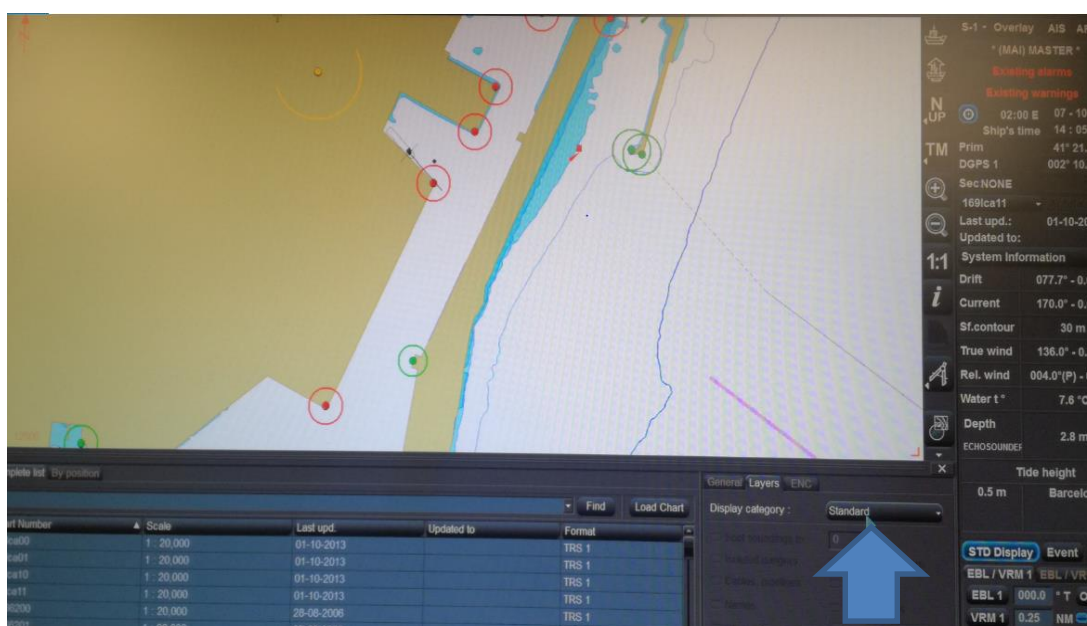


Figura 36. Categoría de la pantalla *Standard*. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

Capa custom: *Task list*→*Charts*→*Layers*→*Custom*

Esta capa permite seleccionar los elementos a visualizar entre el mínimo de los que figuran en la capa estándar y la totalidad de la información de la carta. Así por ejemplo, se pueden visualizar las sondas hasta el valor indicado (el 0 corresponde a verlas todas), el tipo de fondo, cables, tuberías, nombres de los accidentes geográficos y de las boyas, etc. La visualización de esta información se realiza seleccionando el tipo de elemento (*vide* flecha roja). Cuando la opción tiene relieve, indica que se puede seleccionar, como es el caso de esta capa. En cambio, cuando no tiene relieve, como es el caso de la capa anterior (Figura 36), las opciones no se pueden seleccionar. Cuando se han seleccionado, aparecen coloreadas (azul en este caso).

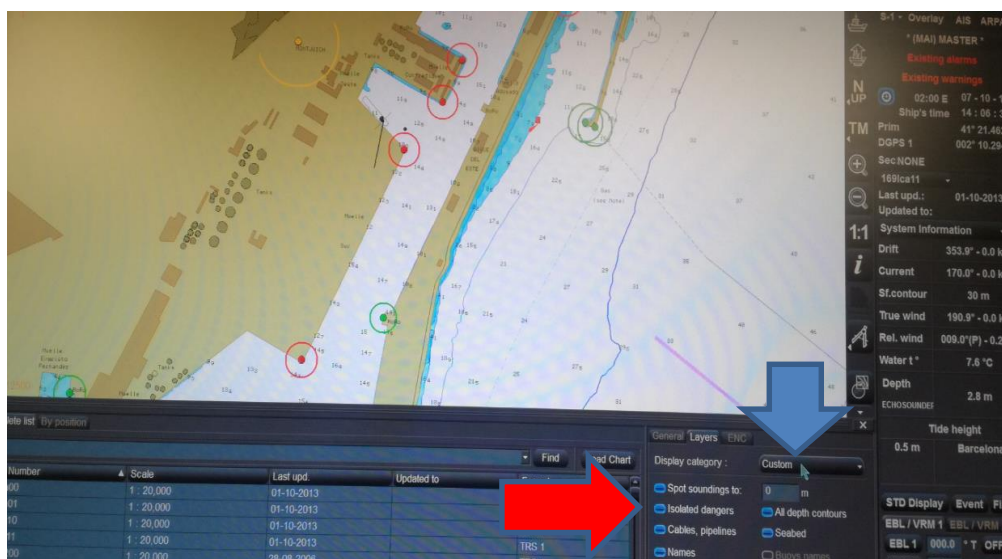


Figura 37. Categoría de la pantalla *Custom*. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

Capa todo (all): *Task list*→*Charts*→*Layers*→*All*

Se muestra toda la información de la carta. Obsérvese que los elementos no tienen relieve, y por tanto no se pueden seleccionar.

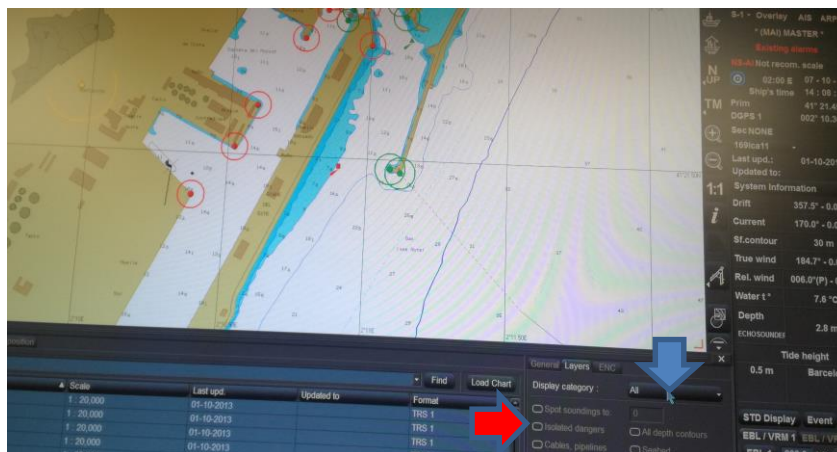


Figura 38. Categoría de la pantalla *All*. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

Integración del AIS al ECDIS

Se muestra en pantalla que: cuando se activa el AIS en el ECDIS, aparecen los ecos AIS como triángulos de color verde con el nombre del buque. Si además se hace clic dos veces encima de los ecos, aparece el vector correspondiente al rumbo y velocidad del eco (el *vector time* es el que se tenga seleccionado en el ECDIS).



Figura 39. Integración del AIS en el ECDIS. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

Integración del ARPA en el ECDIS

Se muestra en pantalla que: cuando se activa la ARPA en el ECDIS, se muestra el vector verdadero de los buques observados. Es importante hacer notar que los vectores obtenidos son los que ha determinado la ARPA a partir de la información de nuestro rumbo verdadero, nuestra velocidad propia y el movimiento relativo de cada eco, de manera que es una información fiable en cuanto al cumplimiento del RIPA, lo cual no sucede con los vectores del AIS.

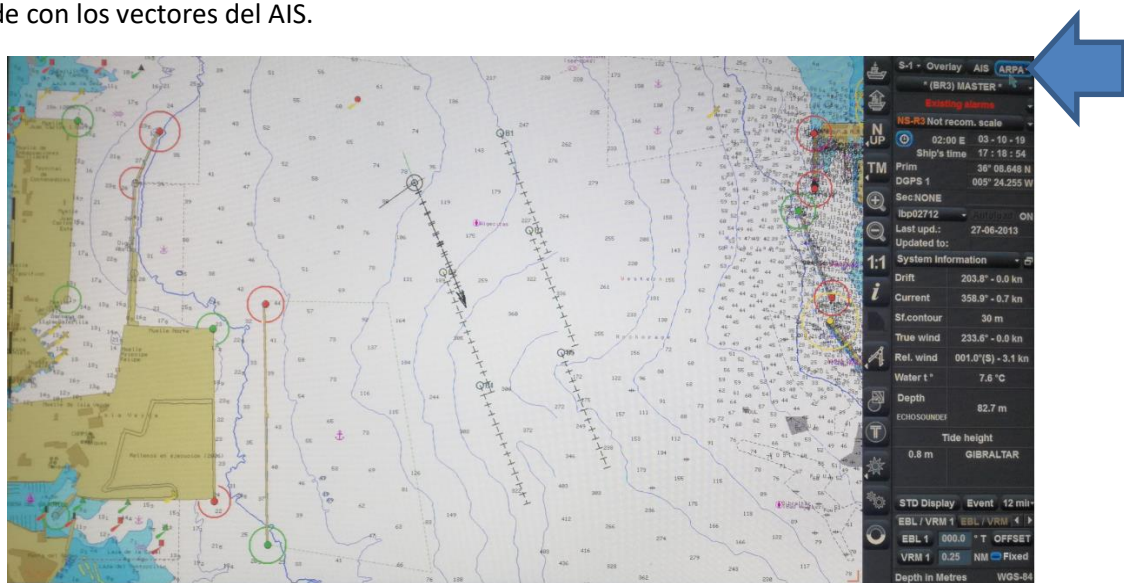


Figura 40. Integración de la ARPA en el ECDIS. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

En la Figura 41, se muestran los vectores de un buque según la información de la ARPA (con centro en el círculo) y según la información del AIS (con centro en el triángulo). Como se observa, son diferentes, puesto que el AIS coge el rumbo y la velocidad efectiva (COG, SOG: *course/speed over ground*) del eco, o el rumbo verdadero y la velocidad propia (HDG, STW: *heading / speed through water*) que indican el compás y la corredera del buque observado.

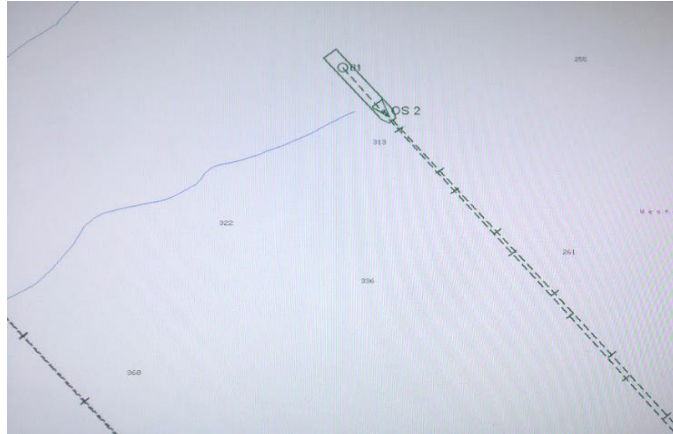


Figura 41. Diferencia entre el vector de la ARPA y el del AIS. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

En la Figura 42, se muestra la información que proporciona el AIS cuando se coloca el cursor encima de un eco. Un dato de interés es el ROT (*rate of turn / velocidad de caída*), ya que se puede detectar si un buque está cambiando de rumbo. El AIS también proporciona el CPA y el TCPA, pero se recuerda una vez más que estos datos cinemáticos se deben contrastar con los de la ARPA.

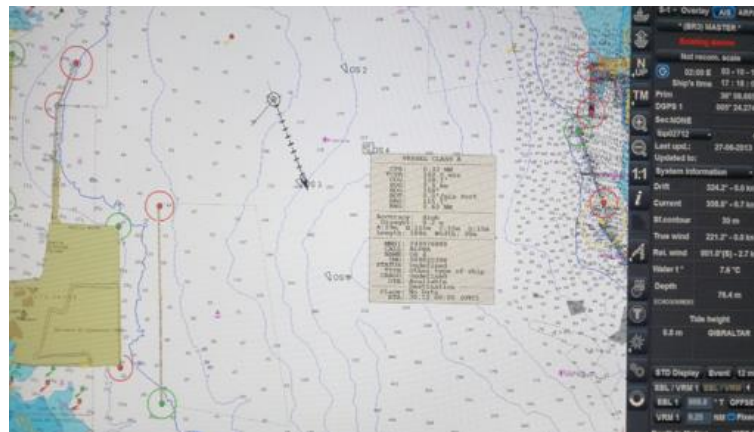


Figura 42. Información proporcionada por el AIS. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

En las Figuras 43 y 44, se visualiza la superposición de la imagen de la ARPA en la pantalla del ECDIS. Esto se consigue mediante la función *Overlay*. En la Figura 43, se muestra una imagen más ampliada que en la Figura 44. Asimismo, dentro del desplegable *System Information*, está la función *Radar Settings* (vide flecha roja en la Figura 44). Mediante esta función, se pueden realizar los mismos ajustes que se efectúan en la ARPA; es decir: escala (6 millas en la imagen de la Figura 44), brillo, ganancia, atenuante de marejada

(Sea), atenuante de nubes y lluvia (Rain) o visualizar los círculos de distancia (Rings); además de la transparencia (superposición más o menos intensa) o el color de la superposición. Estos ajustes no afectan a la ARPA.

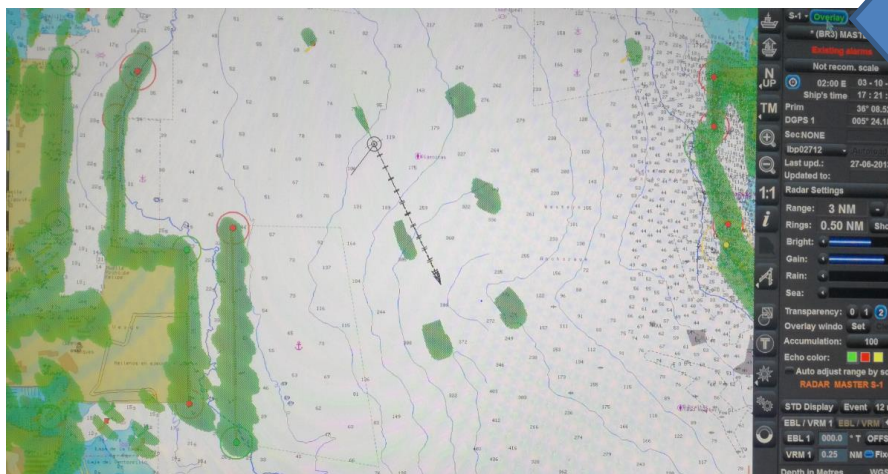


Figura 43. Superposición de la imagen de la ARPA en el ECDIS (Overlay). Fuente: propia, del simulador de la FNB.

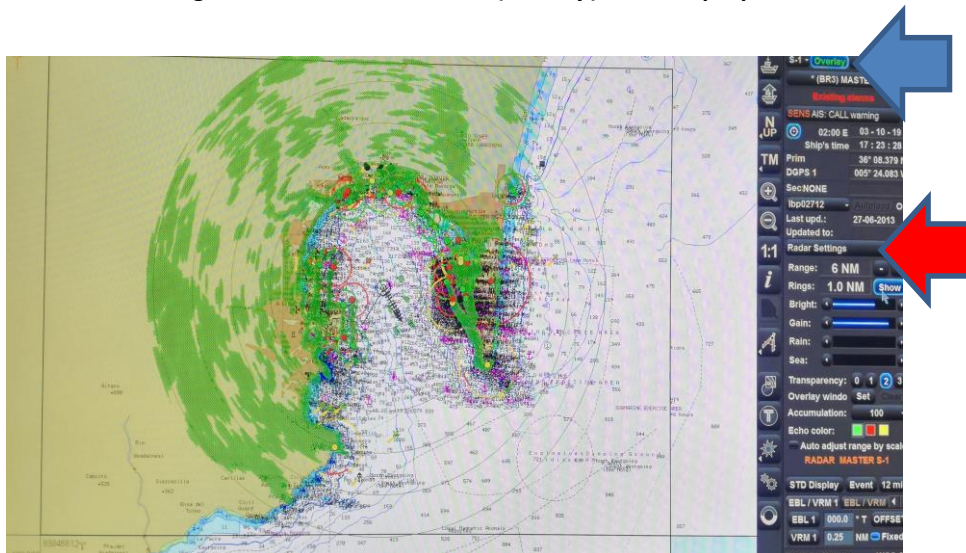


Figura 44. Overlay ajustado con la función Radar Settings. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

Para terminar esta explicación/exposición de las capas del ECDIS, se muestran las capas A y B de la función Maps (Task list→Maps→A/B), en las que se pueden insertar figuras y símbolos. Cuando una capa está seleccionada (pestaña A o B) y activada (ON), se visualiza la información contenida en ella. A continuación, se muestra un ejemplo en el que: en la capa A, se ha trazado un círculo de 2 millas náuticas con centro en el extremo sur de Punta Europa (vide flecha roja de la Figura 45), y en la capa B, una demora al S/v de dicha punta (vide flecha roja de la Figura 47). La Figura 45 corresponde a la capa A del ejemplo seleccionada y activada; la Figura 46, a la capa B seleccionada, pero desactivada; la Figura 47, a la capa B seleccionada y activada, y la Figura 48, a la capa B seleccionada, pero desactivada.

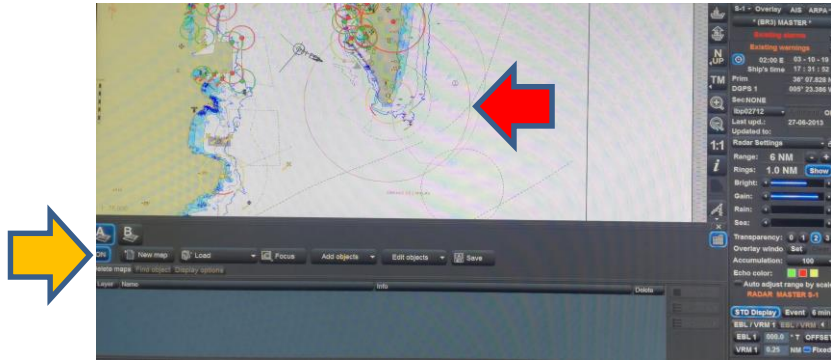


Figura 45. Capa A activa. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

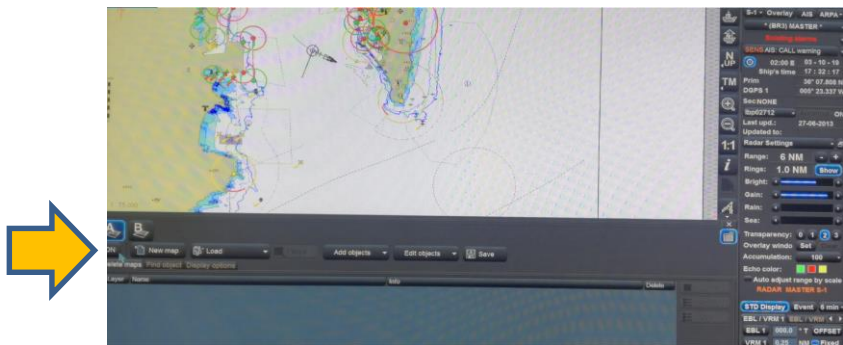


Figura 46. Capa A desactivada. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

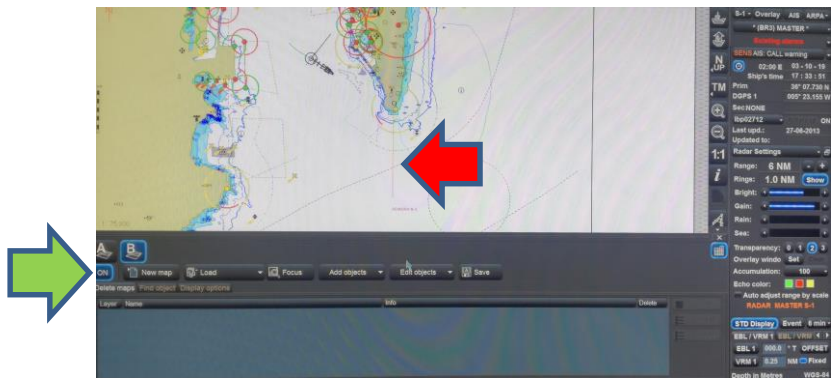


Figura 47. Capa B activada. Fuente: propia, del simulador de la FNB.



Figura 48. Capa B desactivada. Fuente: propia, del simulador de la FNB.

4.3 Propuesta de visualización de PADs en el ECDIS

El tamaño de la PAD dependerá exclusivamente del CPA, pudiendo ser modificado por el piloto. Para seleccionar las opciones de alarma y visualización de las PADs en el ECDIS, se propone realizar lo siguiente:

1. Dentro del menú *System Information*, se introduce la función **PAD**.
2. Una vez abierto el desplegable **PAD**, se activa la función *PAD* haciendo clic con el cursor sobre la pestaña **ACTIVATE**.

Si la opción **ARPA** (para visualizar en el ECDIS los ecos de la ARPA) no está activada, no se podrá activar la función *PAD*.

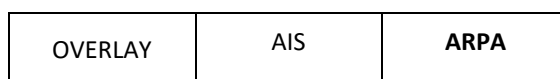


Figura 49. Opciones de superposición de información en el ECDIS. Fuente: propia.

Por tanto, si previamente no se ha activado la opción **ARPA**, debe aparecer el siguiente aviso: **ARPA option is required for PAD**.

3. Una vez activada la función *PAD*, una primera ventana está destinada a introducir el CPA límite. Por defecto, este valor es de 1 milla.
4. En otras dos ventanas, se permite activar/desactivar los siguientes parámetros:
 - i) Possible Point of Collision (PPC)
 - ii) Predicted Area of Danger (PAD)

Cuando un PPC o una PAD entre en el *Frame*, se activará la alarma correspondiente (sonará y aparecerá en la pantalla el *warning* correspondiente), de igual manera como funcionan las alarmas *Anti ground* y de áreas del ECDIS.

Nota: Se aconseja que en el *Ahead* del *Frame*, se introduzca un valor igual o mayor que el TCPA límite de maniobra (entre 18 y 15 minutos), por ejemplo, *Ahead*: 18 minutos.

5. En otras ventanas, se pueden visualizar (siempre y cuando estén activadas las correspondientes alarmas) los PPCs y las PADs. En el ejemplo propuesto, o se visualizan ambos, o ninguno; aunque se podría separar la visualización de PPCs y de PADs.

Asimismo, obsérvese que: aunque no se visualicen los PPCs y las PADs, en el momento de activar la función *PAD*, las alarmas correspondientes quedan en *stand by* (si un PPC o una PAD entran dentro del *Frame*, la alarma se activa).

En esta visualización, se puede seleccionar:

- i) Ver los PPCs y las PADs de todos los ecos ploteados en la ARPA (*ALL*).
 - ii) Ver solamente los PPCs y las PADs de los ecos seleccionados (*SELECTED*). Al hacer clic en esta pestaña, el cursor se activa para seleccionar los ecos.
 - iii) Cancelar la visualización de los ecos seleccionados en [5 ii] (*CANCEL SELECTED*). Cada eco se cancela por separado, igual que en la ARPA. Al hacer clic en esta pestaña, el cursor se activa para cancelar.
- Las opciones ii) y iii) deben ir acompañadas de una pestaña para iniciar la selección o cancelación de ecos (*SELECT/CANCEL BY CURSOR*) y otra para finalizar (*EXIT SELECT/CANCEL*).
- iv) No ver ningún PPC ni ninguna PAD. Esta sería la opción por defecto.

Finalmente, para desactivar la función PAD, simplemente se hace clic de nuevo con el cursor en la pestaña *ACTIVATE*. Cuando esta pestaña esté activada, se mostrará con relieve y coloreada, y cuando esté desactivada, sin dicho relieve y color. Este funcionamiento de activado y desactivado es el propio de las alarmas del ECDIS, tal como se ha mostrado en el epígrafe 4-2.

PAD [1]		
ACTIVATE [2]		
CPA LIMIT	1 NM [3]	
PAD ALARMS		
PPC		[4 i]
PAD contour		[4 ii]
DISPLAY OPTIONS		
VIEW TARGETS' INFORMATION	SELECTED	[5 i]
	CANCEL SELECTED	[5 ii]
	ALL	[5 iii]
	NONE	[5 iv]

SELECT/CANCEL BY CURSOR

EXIT SELECT/CANCEL

Estas casillas habilitan el cursor para seleccionar ecos.

Figura 50. Opción de visualización PAD en el ECDIS. Fuente: propia.

Conclusiones

En primer lugar, se ha constatado que no existe un análisis profundo de las PADs, debido principalmente, a que estas están integradas en una función opcional de las ARPAs que nunca ha llegado a ser obligatoria.

En segundo lugar, se ha conseguido el objetivo de analizar toda la casuística de las PADs, sin limitarse al tratamiento de situaciones de cruce. Con el análisis detallado de las situaciones de cruce, de buque parado, de vuelta encontrada y de alcance, no queda ningún caso sin contemplar, de manera que se puede elaborar satisfactoriamente un algoritmo que determine las PADs de los ecos. No obstante, resultaría conveniente acabar de profundizar sobre las situaciones con rumbos casi paralelos (bien sean de vuelta encontrada o de alcance) antes de realizar definitivamente el algoritmo.

Asimismo, se ha observado la importancia que tienen las PADs para una buena comprensión de la cinemática naval, y por tanto, para la prevención de abordajes o de situaciones de aproximación excesiva. En este sentido, se observa como: en una situación cruce, cuando el buque que debe maniobrar es más lento que el otro, se encuentra que tiene dos PPCs, y por tanto, dos PADs; pero además, la PAD de babor es considerablemente mayor que la de estribor, de manera que una caída a babor le puede poner en una situación muy comprometida.

A propuesta del tutor, también se ha planteado si la PAD de un blanco cambia de tamaño según la distancia a la que se encuentre. Las fuentes consultadas no indican nada al respecto, pero parece como que den a entender que no cambia. No obstante, se ha constatado que la PAD aumenta ligeramente a medida que el buque se aproxima.

Si bien el concepto PAD no acaba de *encajar* con el funcionamiento de la ARPA, sí que se adapta perfectamente al funcionamiento del ECDIS. Por consiguiente, se ha propuesto un sistema analítico para calcular los PPCs y los límites L_1 y L_2 de las PADs correspondientes, a fin de poder representar las PADs de los ecos de la ARPA en el ECDIS. La forma y el tamaño de una PAD solo depende de su eje mayor, con lo cual, dados los puntos L_1 y L_2 , se adapta la forma (elipse o hexágono) según el eje menor se considere la mitad del mayor o el doble del CPA.

Finalmente, se ha propuesto una pestaña para el ECDIS donde se puedan seleccionar, activar y desactivar, y visualizar o no en caso de estar activadas, las PADs de los ecos de la ARPA sobre la pantalla del ECDIS.

En definitiva, se ha dejado el camino abierto, tanto a la elaboración del algoritmo, como a la presentación en pantalla, de una ayuda anticolidión que emplea información de la ARPA, pero que se gestiona en el ECDIS, y que como ya se ha indicado, traduce el concepto de *riesgo de abordaje* en un *área geográfica*.

Bibliografía

- [1] Bole, A.G.; Dineley, W.O.; Norris, A.; Wall, A. (2014) *Radar and Arpa Manual: Radar and target tracking for professional mariners, yachtsmen and users of marine radar*. 3rd edition. Oxford: Butterworth-Heinemann. ISBN 9780080977522
- [2] Bole, A.G.; Jones, K.D. (1981) *Automatic Radar Plotting Aids Manual: A mariner's guide to the use of ARPA*. London: Heinemann. ISBN 0434901601
- [3] Brotons Glauser, C. (2010) *Cinemática radar en casos de abordaje (TFC)*. Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas: Univerdsidad Politécnica de Cataluña. Disponible en UPCommons
- [4] Brunicardi, D. (2012) *Radar and AIS for watchkeeping officers*. London: Brown, Son and Ferguson, Ltd. ISBN 9781849270274
- [5] García Melón, E.; Bermejo Díaz, A.; Poleo Mora, A. (1994) *Cinemática náutica*. Madrid: Colegio de Oficiales de la Marina Mercante Española. ISBN 8479160209
- [6] Jaime Pérez,R.; Rodríguez-Martos Dauer, R. (1995) *Manual del observador radar*. Barcelona: Edicions UPC. ISBN 8476534930
- [7] Jaime Pérez,R.; Rodríguez-Martos Dauer, R. (1996) *Manual del operador de arpa*. Barcelona: Edicions UPC. ISBN 8483011212
- [8] Jurado Centurión, L. (1965) *Curso del Observador Radar*. Madrid: Subsecretaría de la Marina Mercante. ISBN 30376301
- [9] Lownsborough, R.; Calcutt, D. (1993) *Electronic aids to navigation : radar and ARPA*. London: Edward Arnold. ISBN 0340592583
- [10] Maritime and Coastguard Agency (MCA) (2008) *Navigation: Use of Electronic Navigation Aids*. Southampton (UK): MCA. MGN 379.
- [11] National Geospatial-Intelligence Agency (2001) PUB1310: *Radar navigation and maneuvering board manual*. 7th Edition. Bethesda (Maryland): National Imagery and Mapping Agency.
- [12] OMI (2009) *Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974, enmendado (SOLAS) Regla V19: Prescripciones relativas a los sistemas y aparatos náuticos que se han de llevar a bordo; Anexo 11: Equipos de navegación–buques nuevos; Anexo 12: Equipos de navegación–buques existentes; AnexoV/16: Equipo radar; Anexo V/20: Inspección y reconocimiento del equipo náutico, sección 8: Radares; Anexo V/17: Sistema de Identificación Automática (SIA/AIS)*

- [13] OMI (1972) *Reglamento internacional para prevenir los abordajes*, 1972, enmendado; última enmienda por medio de la Resolución A.1085(28), aprobada el 4 de diciembre de 2013, con entrada en vigor el 1 de enero de 2016
- [14] OMI (1995) Resolución A.823(19): *Normas de funcionamiento de las ayudas de punteo radar automáticas (ARPA)*
- [15] OMI (2001) Resolución A.917 (22): *Directrices para el uso operativo a bordo del Sistema de Identificación Automática (SIA)*
- [16] OMI (1981) Resolución A.477(XII): *Normas de funcionamiento del equipo radar*
- [17] OMI/IMO (2004) Resolution MSC.192(79): *Adoption of the revised performance standards for radar equipment*
- [18] Weintrit, A. (2009) *Electronic chart display and information system (ECDIS): an operational handbook*. Boca Raton (Florida, USA): CRC Press. ISBN 9780415482462
- [19] Xunta de Galicia (2005) *Curso de Radar de Punteo Automático "ARPA"*. Santiago (Coruña): Grafisant, S.L. Depósito legal: C-122/05

Anexo: Cálculo analítico de la cinemática mediante Excel

Preparación de una base analítica como método para determinar los PPCs y las PADs en equipos electrónicos como el ECDIS. Para ello, se utiliza una tabla Excel.

A continuación, se muestra la resolución del caso nº 8 (epígrafe 3·7·8). Se observa como: según la posición del buque B al iniciar la maniobra, la PAD varía ligeramente de tamaño.

$$B_4 \equiv 5' \quad (L_1L_2 = 5,7')$$

	TU (hh)	TU (mm)	TU decimal	Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Lat. decimal	Lat. (rad)	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.	Long. decimal	Long. (rad)	
	12	0	12	40	0	N	40	0,6981317	40	0	W	-40	-0,6981317	
	TU (hh)	TU (mm)	TU decimal	Demora (°)	Demora (rad)	Distancia	x	y	IMx	IMy	Vr	IM (rad) semicirc.	IM (rad) circ.	IM (°)
B1	12	0	12	120	2,0943951	9	-4,5	7,7942286	1,2136991	-1,613595	12,114587	0,92590749	5,3572778	306,94941
B2	12	5	12,083333	119	2,0769418	8	-3,878477	6,9969577						
B3	12	10	12,166667	118	2,0594885	7	-3,286301	6,1806332						
	RA (°)	RA (rad)	VA	VAx	VAY	Vrx	Vry	VBx	VBy	VB	RB (rad) semicirc.	RB (rad) circ.	RB (°)	
	95	1,6580628	10	-0,871557	9,961947	7,2821944	-9,681573	6,4106369	0,2803741	6,4167652		0,043707906	0,0437079	2,5042785
	Dist. de B	Dr	B4x	B4y	IMax	IMay	a	b	c	Vra1	Vra2	IMa (rad) semicirc.	Ma (rad) circ	IMa (°)
B4	5	2	-2,084082	4,5823	2,0840817	-4,5823	1	-4,797617	-58,82512	10,43494	-5,637323	1,143948545	5,1392368	294,45658
								cos Ra	sen Ra	Verificación	(rad) semicirc	RA (rad) circ.	RA (°)	
								Vra1	0,2090536	0,9779042	1	1,3601893	1,3601893	77,9
								Vra2	0,8744508	-0,485114	1	0,5064937	5,7766916	330,9800471

Dr 1º	Vr 1º	I 1º	TU dec. (B4)	Dr 2º	Vr 2º	I 2º	I total	TUa decimal	TU dec. red.	TUa (hh)	TUa (mm)				
2	12,114587	0,1650902	12,331757	5	10,43494	0,4791595	0,6442497	12,810916	12,810916	12	49				
RA 1º	VA	I (B4-Sit.)	Dn 1º	Dif. Lat. 1º	Dif. Long. 1º	I (B4-A)	Dn 2º	Dif. Lat. 2º	Dif. Long. 2º	Lat. decimal	Long. decimal				
95	10	0,3317569	3,3175691	-0,004819	0,071905	0,4791595	4,7915945	0,016695	0,1019462	40,011876	-39,82614879				
Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.										
PPC1	40	0,713	N	39	49,569	W									
CPA	δ	IM1	IM2	Dr	IM1 (rad)	IM2 (rad)									
2	23,578178	318,03475	270,8784	5,3851648	5,5507536	4,7277199									
VBx	VBy	a	b	c	Vr1	Vr2	Vr1x	Vr1y	Vr2x	Vr2y	VAx1	VAY1	VAX2	VAY2	
IM1	6,4106369	0,2803741	1	-9,158305	-58,82512	13,511888	-4,353583	10,046772	-9,035125	-3,237109	2,9111526	-3,636134893	9,3154991	9,6477461	-2,630779
RA1 (rad) semic.	RA1 (rad)	RA1 (°)	RA2 (rad) semic.	RA2 (rad)	RA2 (°)										
	1,9429403	1,9429403	111,3	0,266211	6,0169743	344,74723							10	10	
VBx	VBy	a	b	c	Vr1	Vr2	Vr1x	Vr1y	Vr2x	Vr2y	VAx1	VAY1	VAX2	VAY2	
IM2	6,4106369	0,2803741	1	0,3641278	-58,82512	7,4898506	-7,853978	0,1148219	-7,48897	-0,120404	7,8530554	6,295815016	7,7693445	6,5310411	-7,572681
RA1 (rad) semic.	RA1 (rad)	RA1 (°)	RA2 (rad) semic.	RA2 (rad)	RA2 (°)								10	10	
	0,8897819	0,8897819	51	0,85912	5,4240653	310,77605									

Vr	Dr	I	TU dec. (B4)	TU dec. CPA	TU dec. CPA	TU (hh) CPA	TU (mm) CPA								
L1	13,5118877	5,38516481	0,3985501	12,331757	12,730307	12,7303071	12	44							
Dem. a B4	Dem. Circ.	Dem. (°)	dist. a B4	Áng. Op. 1	Áng. Op. 1	Áng. Op. 2	Áng. Op. 2	B4L1	Dif. Lat. 1º	Dif. Long. 1º	Dif. Lat. 2º	Dif. Long. 2º	Lat. decimal	Long. decimal	
	1,99764411	1,99764411	114,45658	5	6,2284815	0,0547038	4,3839529	1,8992324	0,2888207	-0,0048191	0,071905	-0,024153035	0,08077629	39,971028	-39,847319
Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.										
L1	39	58,262	N	39	50,839	W									
Vr	Dr	I	TU dec. (B4)	TU dec. CPA	TU dec. CPA	TU (hh) CPA	TU (mm) CPA								
L2	7,48985056	5,38516481	0,718995	12,331757	13,050752	13,0507519	13	3							
Dem. a B4	Dem. Circ.	Dem. (°)	dist. a B4	Áng. Op. 1	Áng. Op. 1	Áng. Op. 2	Áng. Op. 2	B4L2	Dif. Lat. 1º	Dif. Long. 1º	Dif. Lat. 2º	Dif. Long. 2º	Lat. decimal	Long. decimal	
	1,99764411	1,99764411	114,45658	5	5,1753231	1,10786222	5,4371113	0,846074	5,9754625	-0,0048191	0,071905	0,075444321	0,12153602	40,070625	-39,806559
Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.										
L2	40	4,238	N	39	48,394	W									
B4L1	B4L2	Eje mayor	Eje may. (m)	Eje. may (')											
L1L2	0,28882067	5,97546249	5,6866418	10,532	5,7										

Anexo: Cálculo analítico de la cinemática mediante Excel

$B_4 \equiv 7'$ ($L_1L_2 = 5,3'$)

TU (hh)	TU (mm)	TU decimal	Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Lat. decimal	Lat. (rad)	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.	Long. decimal	Long. (rad)		
12	0	12	40	0	N	40	0,6981317	40	0	W	-40	-0,6981317		
TU (hh)	TU (mm)	TU decimal	Demora (°)	Demora (rad)	Distancia	x	y	IMx	IMy	Vr	IM (rad) semicirc.	IM (rad) circ.	IM (°)	
B1	12	0	12	120	2,0943951	9	-4,5	7,7942286	1,2136991	-1,613595	12,114587	0,92590749	5,3572778	306,94941
B2	12	5	12,083333	119	2,0769418	8	-3,878477	6,9969577						
B3	12	10	12,166667	118	2,0594885	7	-3,286301	6,1806332						
RA (°)	RA (rad)	VA	VAX	VAY	Vrx	Vry	VBx	VBy	VB	RB (rad) semicirc.	RB (rad) circ.	RB (°)		
95	1,6580628	10	-0,871557	9,961947	7,2821944	-9,681573	6,4106369	0,2803741	6,4167652		0,043707906	0,0437079	2,5042785	
Dist. de B	Dr	B4x	B4y	IMax	IMay	a	b	c	Vra1	Vra2	IMa (rad) semicirc.	Ma (rad) circ.	IMa (°)	
B4	7	0	-3,286301	6,1806332	3,2863009	-6,1806332	1	-5,524112	-58,82512	10,913993	-5,389881	1,082104136	5,2010812	298
						cos Ra	sen Ra	Verificación	(rad) semicirc.	Ra (rad) circ.	Ra (°)			
						Vra1	0,1286827	0,9916858	1	1,4417558	1,4417558	82,6		
						Vra2	0,8941033	-0,447861	1	0,4643714	5,8188139	333,39348		

Dr 1º	Vr 1º	I 1º	TU dec. (B4)	Dr 2º	Vr 2º	I 2º	I total	TUa decimal	TU dec. red.	TUa (hh)	TUa (mm)				
0	12,114587	0	12,166667	7	10,913993	0,6413784	0,6413784	12,808045	12,808045	12	48				
RA 1º	VA	I (B4-Sit.)	Dn 1º	Dif. Lat. 1º	Dif. Long. 1º	I (B4-A)	Dn 2º	Dif. Lat. 2º	Dif. Long. 2º	Lat. decimal	Long. decimal				
95	10	0,1666667	1,6666667	-0,002421	0,0361233	0,6413784	6,4137844	0,0137557	0,1383832	40,011335	-39,82549351				
Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.										
PPC1	40	0,68	N	39	49,53	W									
CPA	δ	IM1	IM2	Dr	IM1 (rad)	IM2 (rad)									
2	16,60155	314,60155	281,39845	7,2801099	5,4908329	4,9113295									
VBx	VBy	a	b	c	Vr1	Vr2	Vr1x	Vr1y	Vr2x	Vr2y	VAX1	VAY1	VAX2	VAY2	
IM1	6,4106369	0,2803741	1	-8,603487	-58,82512	13,095498	-4,492011	9,1952961	-9,324087	-3,154166	3,1983437	-2,784659201	9,6044611	9,5648028	-2,91797
RA1 (rad) semic.	RA1 (rad)	RA1 (°)	RA2 (rad) semic.	RA2 (rad)	RA2 (°)										
1,8529928	1,8529928	106,2	0,296105	5,9870803	343,03443										
VBx	VBy	a	b	c	Vr1	Vr2	Vr1x	Vr1y	Vr2x	Vr2y	VAX1	VAY1	VAX2	VAY2	
IM2	6,4106369	0,2803741	1	-1,984191	-58,82512	8,7257476	-6,741557	1,7244767	-8,553646	-1,332339	6,60859	4,6861602	8,8340196	7,7429764	-6,328216
RA1 (rad) semic.	RA1 (rad)	RA1 (°)	RA2 (rad) semic.	RA2 (rad)	RA2 (°)										
1,0830728	1,0830728	62,1	0,6851919	5,5979934	320,7414										

Vr	Dr	I	TU dec. (B4)	TU dec. CPA	TU dec. CPA	TU (hh) CPA	TU (mm) CPA								
L1	13,0954981	7,28010989	0,5559246	12,166667	12,722591	12,7225913	12	43							
Dem. a B4	Dem. Circ.	Dem. (°)	dist. a B4	Áng. Op. 1	Áng. Op. 1	Áng. Op. 2	Áng. Op. 2	B4L1	Dif. Lat. 1º	Dif. Long. 1º	Dif. Lat. 2º	Dif. Long. 2º	Lat. decimal	Long. decimal	
2,05948852	2,05948852	118	7	6,0766896	0,20649571	4,4739004	1,8092849	1,4770248	-0,002421	0,0361233	-0,02580101	0,11616725	39,971778	-39,847709	
Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.										
L1	39	58,307	N	39	50,863	W									
Vr	Dr	I	TU dec. (B4)	TU dec. CPA	TU dec. CPA	TU (hh) CPA	TU (mm) CPA								
L2	8,72574765	7,28010989	0,8343251	12,166667	13,000992	13,0009917	13	0							
Dem. a B4	Dem. Circ.	Dem. (°)	dist. a B4	Áng. Op. 1	Áng. Op. 1	Áng. Op. 2	Áng. Op. 2	B4L2	Dif. Lat. 1º	Dif. Long. 1º	Dif. Lat. 2º	Dif. Long. 2º	Lat. decimal	Long. decimal	
2,05948852	2,05948852	118	7	5,3067696	0,97641567	5,2438204	1,0393649	6,7272771	-0,002421	0,0361233	0,065163014	0,16035719	40,062742	-39,803519	
Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.										
L2	40	3,765	N	39	48,211	W									
B4L1	B4L2	Eje mayor	Eje may. (m)	Eje. may (')											
L1L2	1,47702477	6,72727715	5,2502524	9,723	5,3										

Anexo: Cálculo analítico de la cinemática mediante Excel

$B_4 \equiv 9'$ ($L_1L_2 = 5,1'$)

	TU (hh)	TU (mm)	TU decimal	Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Lat. decimal	Lat. (rad)	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.	Long. decimal	Long. (rad)	
	12	0	12	40	0	N	40	0,6981317	40	0	W	-40	-0,6981317	
	TU (hh)	TU (mm)	TU decimal	Demora (°)	Demora (rad)	Distancia	x	y	IMx	IMy	Vr	IM (rad) semicirc.	IM (rad) circ.	IM (°)
B1	12	0	12	120	2,0943951	9	-4,5	7,7942286	1,2136991	-1,613595	12,114587	0,92590749	5,3572778	306,94941
B2	12	5	12,083333	119	2,0769418	8	-3,878477	6,9969577						
B3	12	10	12,166667	118	2,0594885	7	-3,286301	6,1806332						
	RA (°)	RA (rad)	VA	VAX	VAY	Vrx	Vry	VBx	VBy	VB		RB (rad) semicirc.	RB (rad) circ.	RB (°)
	95	1,6580628	10	-0,871557	9,961947	7,2821944	-9,681573	6,4106369	0,2803741	6,4167652		0,043707906	0,0437079	2,5042785
	Dist. de B	Dr	B4x	B4y	IMax	IMay	a	b	c	Vra1	Vra2	IMa (rad) semicirc.	Ma (rad) circ.	IMa (°)
B4	9	-2	-4,48852	7,7789663	4,4885201	-7,7789663	1	-5,922086	-58,82512	11,182533	-5,260447	1,047454837	5,2357305	299,98526
							cos Ra	sen Ra	Verificación	(rad) semicirc.	Ra (rad) circ.	Ra (°)		
							Vra1	0,0821862	0,996617	1	1,4885173	1,4885173	85,3	
							Vra2	0,9039688	-0,427598	1	0,4418343	5,841351	334,6847587	

	Dr 1ª	Vr 1ª	I 1ª	TU dec. (B4)	Dr 2ª	Vr 2ª	I 2ª	I total	TUa decimal	TU dec. red.	TUa (hh)	TUa (mm)			
	-2	12,114587	-0,16509	12,001576	9	11,182533	0,8048266	0,6397364	12,806403	12,806403	12	48			
	RA 1ª	VA	I (B4-Sit.)	Dn 1ª	Dif. Lat. 1ª	Dif. Long. 1ª	I (B4-A)	Dn 2ª	Dif. Lat. 2ª	Dif. Long. 2ª	Lat. decimal	Long. decimal			
	95	10	0,0015764	0,0157643	-2,29E-05	0,0003417	0,8048266	8,048266	0,0110243	0,174512	40,011001	-39,82514629			
	Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.									
PPC1	40	0,66	N	39	49,509	W									
	CPA	δ	IM1	IM2	Dr	IM1 (rad)	IM2 (rad)								
	2	12,839588	312,82485	287,14567	9,2195445	5,4598236	5,0116374								
	VBx	VBy	a	b	c	Vr1	Vr2	Vr1x	Vr1y	Vr2x	Vr2y	VAx1	VAY1	VAX2	VAY2
IM1	6,4106369	0,2803741	1	-8,304109	-58,82512	12,873562	-4,569452	8,7509249	-9,441923	-3,106128	3,3513968	-2,340287996	9,7222966	9,5167652	-3,071023
RA1 (rad) semic.	RA1 (rad)	RA1 (°)		RA2 (rad) semic.	RA2 (rad)	RA2 (°)						10			10
	1,8070158	1,8070158	103,5	0,3121467	5,9710386	342,11531									
	VBx	VBy	a	b	c	Vr1	Vr2	Vr1x	Vr1y	Vr2x	Vr2y	VAx1	VAY1	VAX2	VAY2
IM2	6,4106369	0,2803741	1	-3,243911	-58,82512	9,4613344	-6,217424	2,7892212	-9,040857	-1,832909	5,941111	3,621415774	9,321231	8,2435464	-5,660737
RA1 (rad) semic.	RA1 (rad)	RA1 (°)		RA2 (rad) semic.	RA2 (rad)	RA2 (°)						10			10
	1,2002319	1,2002319	68,8	0,6017351	5,6814502	325,52312									

	Vr	Dr	I	TU dec. (B4)	TU dec. CPA	TU dec. CPA	TU (hh) CPA	TU (mm) CPA							
L1	12,8735616	9,21954446	0,7161611	12,001576	12,717738	12,7177376	12	43							
	Dem. a B4	Dem. Circ.	Dem. (°)	dist. a B4	Áng. Op. 1	Áng. Op. 1	Áng. Op. 2	Áng. Op. 2	B4L1	Dif. Lat. 1ª	Dif. Long. 1ª	Dif. Lat. 2ª	Dif. Long. 2ª	Lat. decimal	Long. decimal
	2,09413782	2,09413782	119,98526	9	5,9960633	0,28712198	4,5198774	1,7633079	2,5967083	-2,29E-05	0,0003417	-0,027933722	0,15148666	39,972043	-39,848172
	Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.									
L1	39	58,323	N	39	50,89	W									
	Vr	Dr	I	TU dec. (B4)	TU dec. CPA	TU dec. CPA	TU (hh) CPA	TU (mm) CPA							
L2	9,46133442	9,21954446	0,9744444	12,001576	12,976021	12,9760208	12	59							
	Dem. a B4	Dem. Circ.	Dem. (°)	dist. a B4	Áng. Op. 1	Áng. Op. 1	Áng. Op. 2	Áng. Op. 2	B4L2	Dif. Lat. 1ª	Dif. Long. 1ª	Dif. Lat. 2ª	Dif. Long. 2ª	Lat. decimal	Long. decimal
	2,09413782	2,09413782	119,98526	9	5,3892794	0,89390589	5,1266613	1,156524	7,6640216	-2,29E-05	0,0003417	0,058814473	0,19761737	40,058792	-39,802041
	Latitud (°)	Latitud (')	Deno.	Longitud (°)	Longitud (')	Deno.									
L2	40	3,527	N	39	48,122	W									
	B4L1	B4L2	Eje mayor	Eje may. (m)	Eje. may (')										
L1L2	2,59670834	7,66402162	5,0673133	9,385	5,1										

