
EFICIENCIA COMPUTACIONAL VS. OPTIMALIDAD EN LA ASIGNACIÓN DE ARMA- BLANCO

♦ R E S U M E N ♦

El combate moderno, caracterizado por la alta velocidad y la saturación de amenazas, exige una toma de decisiones rápida y precisa. El proceso TEWA es fundamental para la supervivencia de la fuerza. Este artículo analiza uno de sus problemas principales, el WTA, mediante el uso de herramientas de optimización. Se comparó un método exacto (MILP) con una heurística, demostrando que, si bien existe un gap del 9,7%, el primero requiere un tiempo de cómputo 137 veces mayor. Identificando que las heurísticas ofrecen un equilibrio más práctico para la toma de decisiones en tiempo real.

Palabras clave: Mando, control, asignación, optimización, algoritmos.

COMPUTATIONAL EFFICIENCY VS. OPTIMALITY IN WEAPON-TARGET ASSIGNMENT

♦ A B S T R A C T ♦

Modern combat—characterized by high velocity and threat saturation—demands rapid, accurate decision-making. Threat Evaluation and Weapon Assignment (TEWA) is therefore essential to force survival. This article analyzes a key component of this process: the Weapon-Target Assignment (WTA) problem, utilizing optimization tools. By comparing an exact method (Mixed-Integer Linear Programming, or MILP) with a heuristic approach, the analysis reveals a crucial trade-off. Despite the MILP achieving a 9.7% greater optimality, it requires a 137-fold increase in computation time. This conclusively identifies that heuristics are more practical, offering the necessary balance for real-time decision-making.

Keywords: Command, control, assignment, optimization, algorithm.



EDUARDO CARRASCO VIDAL

Teniente primero

Magister en Inteligencia Artificial (UAI)

(ecarrascov1@gmail.com)

Viña del Mar, Chile.

El paradigma del combate naval ha experimentado una transformación en las últimas décadas (Naseem et al., 2017). La transición desde enfrentamientos de plataforma contra plataforma hacia un entorno de *guerra centrada en redes* (NCW, *Network-Centric Warfare*) ha redefinido los fundamentos de la proyección del poder naval. La doctrina naval *contemporánea*, tanto de la *U.S. Navy* como de la OTAN, no concibe a las unidades como entidades aisladas, sino como nodos interconectados en una vasta red de información y poder de fuego. El objetivo es vincular sensores, sistemas de armas y centros de operaciones (*Operations/Command Centers*) en un sistema cohesionado, integrado y altamente reactivo, capaz de generar efectos desde múltiples ejes para *desarticular el ciclo de decisión del adversario* (Speller, 2023).

En este contexto de alta velocidad, saturación de información y amenazas multidominio, el proceso de TEWA (*Threat Evaluation and Weapon Assignment*) emerge como una función directamente ligada a la supervivencia de la fuerza. La capacidad de una fuerza para procesar la información táctica, evaluar *correctamente* las amenazas, priorizarlas y asignar sus medios de combate de forma más eficiente y rápida que el adversario, constituye una ventaja decisiva (Johansson, 2010).

Sin embargo, la propia doctrina que busca conferir esta ventaja genera un desafío computacional. La interconexión de la fuerza bajo el paradigma NCW implica que, *teóricamente*, cualquier arma disponible en la *fuerza de tarea* puede ser asignada a cualquier amenaza detectada, no solo las armas de la plataforma que la detecta (Cares, 2006). Esto produce una explosión de complejidad en el número de posibles combinaciones arma-blanco, superando la capacidad cognitiva de un operador humano para evaluar todas las permutaciones y seleccionar la óptima bajo el estrés y la presión del combate (Arslan, O. Karasakal, y Kirca, 2024). La misma doctrina que busca superioridad táctica, introduce

a su vez una potencial vulnerabilidad: la sobrecarga cognitiva del tomador de decisiones. Por lo tanto, el soporte de decisión automatizado no es meramente una mejora incremental, sino un habilitador indispensable para su supervivencia.

El núcleo de este desafío de automatización reside en el "problema de asignación de arma-blanco" (WTA, *Weapon Target Assignment*), la formalización matemática de la fase de asignación dentro del proceso TEWA. El WTA es un problema de optimización combinatoria, clasificado como *NP-Hard*¹ (Lloyd y Witsenhausen, 1986), que busca la asignación de un conjunto de armas a un conjunto de blancos para maximizar el daño infligido o, de forma equivalente, minimizar la supervivencia de las amenazas.

Este artículo evalúa cuantitativamente la disyuntiva entre optimalidad y velocidad computacional mediante la comparación de un algoritmo de optimización exacto y una heurística rápida en un escenario de combate simulado, con el fin de determinar el enfoque más viable para un TEWA moderno.

Fundamentos Teóricos del Problema de Asignación

Para comprender la problemática, es esencial descomponer el proceso TEWA y formalizar matemáticamente la pregunta que se busca resolver. Esta sección define sus componentes funcionales y presenta una formulación canónica del problema WTA.

- **Descomposición Funcional del TEWA:** El proceso TEWA es una secuencia lógica y continua que transforma los datos extraídos de los sensores en acciones de enfrentamiento coordinadas. Se implementa como una función central en los sistemas de combate para proteger a la unidad y neutralizar amenazas (Johansson,

1. *NP-Hard*: problemas cuya solución requiere, en general, tiempo exponencial, sin garantía de resolución eficiente en tiempo polinomial.

2010). Aunque se presenta como un acrónimo unificado, funcionalmente se descompone en dos fases distintas pero interdependientes: *Threat Evaluation* (TE) y *Weapon Assignment* (WA).

- **Fase 1: Evaluación de Amenazas (TE - *Threat Evaluation*):** TE es la fase de análisis, priorización y discernimiento. Su objetivo es responder a la pregunta: ¿qué entidades del entorno representan una amenaza y con qué grado de urgencia deben ser enfrentadas? Este proceso se basa en determinar si un blanco posee tanto la capacidad (*capability*) como la intención (*intent*) de infligir daño a las fuerzas propias o a los activos defendidos.

a) **Capacidad:** Habilidad física de un blanco/amenaza para causar daño. Es un factor relativamente objetivo y procedimental, evaluado a través de parámetros cuantificables como la velocidad, rumbo, altitud, proximidad a la fuerza, tipo de plataforma y sistemas de armas que se presume posee. Los sistemas C2 fusionan datos de múltiples sensores (radar, ESM, IFF, entre otros) para construir un panorama común que facilite esta evaluación.

b) **Intención:** Voluntad o determinación del blanco de actuar hostilmente. A diferencia de la capacidad, la intención es un factor inherentemente subjetivo, ambiguo y difícil de medir. La literatura describe la evaluación de la intención como un proceso "pobremente definido" (*poorly defined*) que depende de la inferencia, el juicio contextual y la experiencia del operador (Johansson, 2010). Se basa en la interpretación de comportamientos, como desviaciones de corredores aéreos comerciales (aerovías), maniobras agresivas o evasivas, activación de radares de control de fuego o el cumplimiento/incumplimiento de criterios de identificación.

Esta dualidad en la naturaleza de la evaluación (objetiva-cuantitativa para la capacidad, subjetiva-cualitativa para la intención) revela una visión fundamental sobre la naturaleza de TEWA. El proceso no busca una automatización total que

reemplace al operador, sino que fomenta una relación humano-máquina. El operador humano, con su capacidad para el juicio contextual y el reconocimiento de patrones sutiles, es insustituible en la tarea de inferir la intención, mientras que los sistemas automatizados actúan como asistentes que fusionan y presentan la información de forma coherente para reducir la carga cognitiva y permitir que el humano se concentre en la decisión crítica. El resultado de la fase TE es una lista de blancos priorizados, a cada uno de los cuales el sistema le asigna un valor de amenaza, que servirá como entrada para la siguiente fase.

- **Fase 2: Asignación de Armas (WA - *Weapon Assignment*):** Una vez que las amenazas han sido evaluadas y priorizadas, WA se encarga de responder a la pregunta: ¿cuál es la mejor manera de emplear nuestros efectores (capacidad bélica) para neutralizar estas amenazas? Esta es la fase de acción y optimización. Su objetivo es asignar las capacidades disponibles a los blancos identificados de manera eficaz.

La WA puede abordarse desde dos perspectivas principales:

a) **Perspectiva Secuencial (blanco por blanco):** Las armas se asignan de forma secuencial, generalmente comenzando por la amenaza de mayor prioridad de acuerdo con su valor. A esta amenaza se le asigna el *mejor* sistema de armas disponible.

b) **Perspectiva Concurrente (multi-blanco):** La asignación de armas a todo el conjunto de amenazas se realiza simultáneamente, buscando una solución que sea óptima en un sentido global. Este enfoque es más complejo, pero tiene el potencial de encontrar soluciones significativamente mejores, especialmente en escenarios saturados (*enjambres*) donde las decisiones de asignación están fuertemente acopladas.

El "problema de asignación de armas-blanco" (WTA) es precisamente la formalización matemática de esta

perspectiva. El algoritmo WTA no reemplaza el proceso TEWA; más bien, automatiza y optimiza la fase WA, tomando como entrada las prioridades definidas en la fase TE (Roux y Van Vuuren, 2007). De esta manera, se libera al operador de la tarea combinatoria de la asignación, permitiéndole mantener la supervisión, validar las soluciones propuestas y autorizar la acción de fuego.

Formulación Matemática del Problema de Asignación de Armas a Blancos (WTA)

El WTA es un problema clásico del análisis de operaciones navales (*Operations Research - OR*), estudiado desde la década de 1950 (Ahuja et al., 2003). Su objetivo es encontrar una asignación de un conjunto de armas a un conjunto de blancos de tal manera que se minimice el valor total esperado de supervivencia de los blancos.

Para formular el problema, se definen las siguientes variables y parámetros:

- o i : Plataformas (buques) o tipos diferentes de armas.
- o j : Amenazas que deben ser enfrentadas.
- o w_i : Inventario de armas disponibles en la plataforma i .
- o v_j : El valor táctico de la amenaza j (prioridad del blanco determinada en la fase TE).
- o P_{ij} : Probabilidad de destrucción (P_{kill}) de la amenaza j si un arma del tipo i es asignada.
- o x_{ij} : Cantidad de armas del tipo i asignadas a la amenaza j (variable entera).

Función Objetivo:

$$\text{Minimizar} \sum_{j=1}^j v_j \prod_{i=1}^i (1 - P_{ij})^{x_{ij}}$$

Donde $(1 - P_{ij})$ es la probabilidad de supervivencia de la amenaza j frente a un arma i , y el producto acumulado calcula la probabilidad de que la amenaza j sobreviva al ataque de todas las armas que le son asignadas.

Restricciones:

1. Inventario limitado por tipo de arma:

$$\sum_{j=1}^j x_{ij} \leq w_i; \forall i = 1, \dots, i$$

2. Dominio de las variables:

$$x_{ij} \in \mathbb{Z}^{\geq 0}; \forall i = 1, \dots, i; \forall j = 1, \dots, j$$

Dado que la función objetivo es *no lineal* y no convexa, la solución exacta del problema resulta computacionalmente costosa para instancias de tamaño medio o grande. Para abordar esta dificultad, se emplea una técnica de aproximación por tramos lineales (*Piecewise Linear*, PWL), la cual permite representar funciones no lineales mediante un conjunto de segmentos definidos en puntos de ruptura. Esto permite reformular el WTA como un modelo lineal entero mixto (MILP) que puede ser resuelto mediante *solvers*² como CPLEX.

Definición del Escenario por Resolver

El escenario por resolver se compone de una fuerza de 6 plataformas de superficie, como se muestra en la Figura 1. Cada una contiene una determinada cantidad disponible de misiles de defensa puntual o local, detallada en el número que se encuentra en el interior del círculo.

Respecto de la amenaza, esta se compone de 12 ASM³ con diferentes *configuraciones*,

2. Solver: programa diseñado para resolver modelos matemáticos de optimización. Ejemplos comunes incluyen CPLEX y Gurobi para programación lineal.

3. ASM: (Anti-Ship Missile), munición guiada diseñada para neutralizar objetivos navales de superficie.

y la consecuente tabla de P_{kill} de las armas propias contra cada amenaza.

Con esta definición de escenario, el problema presenta un número total de posibles combinaciones Arma-Blanco de 12^{17} (espacio de asignaciones posibles sin restricciones).

amenazas. Aunque simple, puede ser sorprendentemente eficaz en ciertos contextos operacionales, simulando el comportamiento de un humano bajo presión (Erdem y Ozdemirel, 2003).

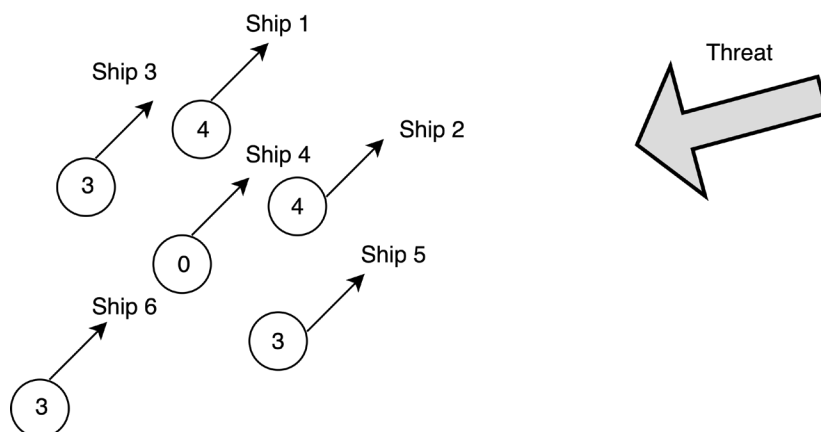


Figura 1: Distribución de la fuerza y ubicación de la amenaza.
(Fuente: Elaboración autor artículo)

Descripción de los Algoritmos Implementados

- Método 1: Optimización mediante Programación Lineal Entera:** Este enfoque busca la solución matemáticamente *óptima* para una versión linealizada del problema WTA. Utiliza la biblioteca PuLP en Python, que actúa como interfaz para *solvers* de optimización como CPLEX. Estos *solvers* implementan algoritmos como *Branch and Cut*, que exploran de manera sistemática el espacio de soluciones para encontrar la solución *óptima*.
- Método 2: Algoritmo Greedy:** Este es el enfoque heurístico más simple y rápido. Una heurística *greedy* toma, en cada paso, la decisión que parece mejor en ese momento, sin considerar las consecuencias futuras. Su principal ventaja radica en su muy baja complejidad computacional, lo que la hace rápida. Este algoritmo es determinista y su rendimiento puede depender del orden en que se consideran las

Análisis de Resultados y Discusión

Lo expuesto en la Tabla 1 siguiente, revela el dilema central de la asignación de armas en tiempo real. Si bien el método exacto (CPLEX) ofrece una solución de un 9.7% superior en términos de minimizar la supervivencia de la amenaza (12.65 vs. 13.88), lo hace a un costo computacional 137 veces mayor (0.1202s vs. 0.0008s). Esta diferencia resulta significativa; en un escenario de combate saturado, una demora de más de 100 milisegundos para calcular una solución puede ser tácticamente inaceptable. El algoritmo *Greedy*, aunque subóptimo, entrega una solución de alta calidad en menos de un milisegundo, demostrando su idoneidad para sistemas que exigen una respuesta casi instantánea:

Esta Figura presenta dos mapas de calor que ilustran cómo se distribuyen las asignaciones de misiles desde cada buque (eje vertical) hacia distintas amenazas (eje horizontal). Cada celda indica cuántos misiles fueron asignados desde un buque específico a una amenaza determinada,

Métrica de Rendimiento	Método Exacto (CPLEX)	Algoritmo Greedy
Supervivencia de las amenazas	12.6512	13.8762
Tiempo de Cómputo (s)	0.1202 s	0.0008 s

Tabla 1: Comparación de Rendimiento de Algoritmos para el Problema WTA.
(Fuente: Elaboración autor artículo)

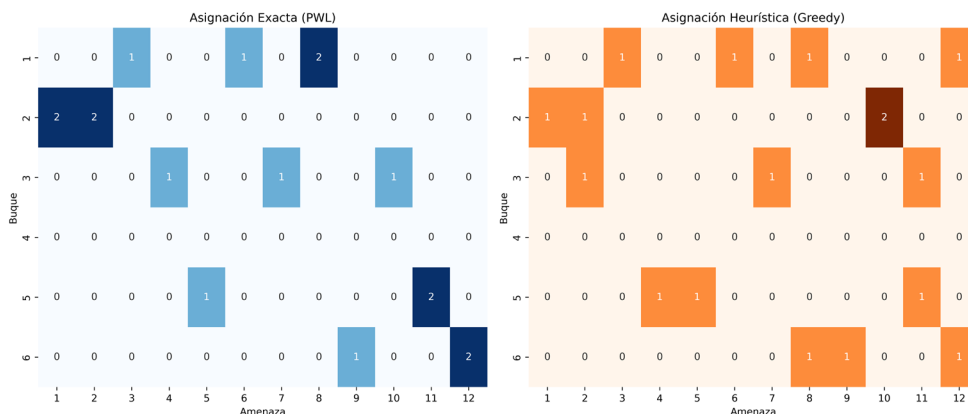


Figura 2: Asignación de Arma-Blanco (WA del TEWA).
(Fuente: Elaboración autor artículo)

siendo los valores más altos representados con colores más intensos. A la izquierda se muestra el resultado del modelo exacto, y a la derecha el de la heurística *greedy*.

La formulación matemática extendida de ambas propuestas y el código utilizado junto con los resultados obtenidos por las simulaciones, se encuentran disponibles para acceso en línea, en el siguiente repositorio: https://github.com/educarrasco/WTA_TEWA

Conclusiones

Lo expuesto anteriormente, aun considerando su simplicidad, proporciona una base para comprender la aplicación de técnicas de optimización al problema de asignación de armas en los sistemas de combate. En este contexto, se ha demostrado que la formulación del WTA constituye una metodología válida para modelar y automatizar la asignación de armas (Weapon Assignment, WA) dentro del proceso TEWA. Este enfoque permite traducir un problema de decisión táctica en un problema matemático bien definido, susceptible de ser resuelto mediante algoritmos.

Potenciales Vías de Escalabilidad y Aplicación

- Aplicaciones Análogas: Logística Humanitaria y Gestión de Desastres (HA/DR): La estructura matemática del problema WTA es general y encuentra un análogo directo en el campo de la logística humanitaria y la gestión de desastres (HA/DR). Es posible establecer una correspondencia formal entre los elementos de ambos dominios:
 - Las armas se corresponden con los recursos de ayuda (equipos de búsqueda y rescate, suministros médicos, alimentos, vehículos de transporte).
 - Los blancos se corresponden con los puntos de demanda (zonas afectadas por el desastre, hospitales colapsados, grupos de víctimas).
 - La probabilidad de destrucción (P_{ij}) se corresponde con la eficacia de la ayuda (número de vidas salvadas).

por un equipo médico, reducción del tiempo de respuesta, cantidad de necesidad cubierta).

- La función objetivo de minimizar el valor de supervivencia de la amenaza se corresponde directamente con el objetivo de minimizar la demanda insatisfecha.

- Esta analogía implica que los modelos de optimización para el WTA son transferibles para mejorar la eficacia de las operaciones de ayuda en casos de desastre. El mismo dilema entre una respuesta rápida y una planificación optimizada a largo plazo (usando modelos extendidos y más complejos para la cadena de suministro) existe en ambos dominios. Este campo representa una oportunidad para la aplicación cruzada de la investigación de operaciones militares en beneficio de la sociedad.

- Integración con Sistemas Dinámicos (DWTa): Finalmente, una extensión es pasar del WTA estático al WTA dinámico (DWTa).

El modelo estático asume que todas las decisiones de asignación se toman en un único instante de tiempo. El DWTa, en cambio, modela el enfrentamiento como un proceso de múltiples etapas que evoluciona en el tiempo (O. Karasakal, E. Karasakal y Silav, 2021).

Este enfoque permite incorporar ciclos de retroalimentación en el proceso de decisión, como la política *shoot-look-shoot* (Glazebrook y Washburn, 2004). En DWTa, los resultados de la primera ronda de enfrentamientos (blancos destruidos, armas utilizadas, nuevas amenazas) se utilizan como entrada para recalcular y optimizar la asignación de armas para la siguiente etapa. Esto permite al sistema C2 adaptarse continuamente, reasignando recursos para hacer frente a amenazas emergentes o para re-atacar blancos que sobrevivieron al primer intento. El desarrollo de algoritmos eficientes para el DWTa en ambientes saturados es uno de los frentes de investigación más activos en el campo.

LISTA DE REFERENCIAS

1. Ahuja, R. K., Kumar, A., Jha, K., & Orlin, J. B. (2003). Exact and heuristic methods for the weapon target assignment problem. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.489802>
2. Andersen, A. C., Pavlikov, K., & Toffolo, T. A. M. (2022). Weapon-target assignment problem: Exact and approximate solution algorithms. *Annals of Operations Research*, 312(2), 581–606. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04525-6>
3. Arslan, C., Karasakal, O., & Kirca, Ö. (2024). Naval air defense planning problem: A novel formulation and heuristics. *Naval Research Logistics*. <https://doi.org/10.1002/nav.22186>
4. Cares, J. R. (2006). *Distributed networked operations: The foundations of network centric warfare*. iUniverse.
5. Erdem, E., & Ozdemirel, N. E. (2003). An evolutionary approach for the target allocation problem. *Journal of the Operational Research Society*, 54(9), 958–969. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601580>
6. Glazebrook, K., & Washburn, A. (2004). Shoot-look-shoot: A review and extension. *Operations Research*, 52(3), 454–463. <https://doi.org/10.1287/opre.1030.0086>
7. Hill, R. R., & Pohl, E. A. (2011). Heuristics and their use in military modeling. En J. J. Cochran, L. A. Cox, P. Keskinocak, J. P. Kharoufeh, & J. C. Smith (Eds.), *Wiley encyclopedia of operations research and management science* (1^a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0518>
8. Huaping, C., Jingxu, L., Yingwu, C., & Hao, W. (2006). Survey of the research on dynamic weapon-target assignment problem. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 17(3), 559–565. [https://doi.org/10.1016/S1004-4132\(06\)60097-2](https://doi.org/10.1016/S1004-4132(06)60097-2)
9. Johansson, F. (2010). *Evaluating the performance of TEWA systems* (Doctoral dissertation). Örebro University.
10. Karasakal, O., Karasakal, E., & Silav, A. (2021). A multi-objective approach for dynamic missile allocation using artificial neural networks for time sensitive decisions. *Soft Computing*, 25(15), 10153–10166. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05923-x>
11. Karasakal, O., Özdemirel, N. E., & Kandiller, L. (2011). Anti-ship missile defense for a naval task group. *Naval Research Logistics*, 58(3), 304–321. <https://doi.org/10.1002/nav.20457>
12. Kim, J.-E., Lee, C.-H., & Yi, M. Y. (2022). New weapon target assignment algorithms for multiple targets using a rotational strategy and clustering approach. *IEEE Access*, 10, 43738–43750. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3168718>
13. Kline, A., Ahner, D., & Hill, R. (2019). The weapon-target assignment problem. *Computers & Operations Research*, 105, 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.10.015>
14. Naeem, H., & Masood, A. (2010). An optimal dynamic threat evaluation and weapon scheduling technique. *Knowledge-Based Systems*, 23(4), 337–342. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2009.11.007>
15. Naseem, A., Shah, S. T. H., Khan, S. A., & Malik, A. W. (2017). Decision support system for optimum decision-making process in threat evaluation and weapon assignment: Current status, challenges and future directions. *Annual Reviews in Control*, 43, 169–187. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.08.001>
16. Paradis, S., Benaskeur, A., Oxenham, M., & Cutler, P. (2005, July). Threat evaluation and weapons allocation in network-centric warfare. En *Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion* (Vol. 2, pp. 8–8). IEEE.
17. Roux, J. N., & Van Vuuren, J. H. (2007). Threat evaluation and weapon assignment decision support: A review of the state of the art. *ORION*, 23(2), 151–187.
18. Lloyd, S., & Witsenhausen, H. S. (1986). Weapon allocation is NP-complete. En *Proceedings of the IEEE Summer Simulation Conference* (pp. 1054–1058). IEEE.
19. Speller, I. (2023). *Understanding naval warfare*. Routledge.

Recibido 10/07/25

Publicado 31/12/25