



ACADEMIA DE LAS CIENCIAS
Y LAS ARTES MILITARES

Comunicaciones académicas

Sistemas de generación de energía en satélites Condicionantes del espacio profundo

Moisés Manuel Fernández Álvaro

Academia de las Ciencias y las Artes Militares
Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar

26 de septiembre de 2025

Descripción del sistema de generación eléctrica de una nave espacial

El sistema de generación eléctrica es crítico para el funcionamiento de la nave espacial ya que es el encargado de proporcionar la alimentación de energía para el resto de los sistemas, sensores y equipos de la nave.

El diseño de este sistema debe cumplir unos requisitos básicos para el éxito de la misión:

- Debe proporcionar el consumo medio de potencia y de pico requerido por la misión en cualquier circunstancia y entorno de radiación.
- Debe acondicionar el suministro de energía evitando transitorios y picos de tensión para asegurar la durabilidad de la misión y la fiabilidad de los equipos.
- Debe proporcionar capacidad de almacenaje de energía suficiente entre eclipses y demandas de pico en cualquier situación orbital de la nave.
- Debe tener capacidad de ser controlado desde estaciones terrenas o a través de satélites relé de comunicaciones.

Los componentes básicos de todo sistema de generación eléctrica son:

- La fuente de energía primaria (paneles solares, RTG, etc.).
- El subsistema de almacenamiento de energía (baterías, ruedas de inercia, etc.).
- El subsistema de gestión de energía.
- El subsistema de distribución eléctrica a todos los equipos de la nave.

Fuentes de energía primaria

Los tipos de fuentes de energía primaria mayoritariamente usados en las naves y vehículos espaciales son los paneles solares y los generadores termoeléctricos de radioisótopos (RTG), aunque para aplicaciones concretas también se utilizan pilas de combustible. A continuación, se describen sus características, capacidades y usos según los diversos tipos de misiones.

Paneles solares

Es la fuente de generación de energía eléctrica más utilizada por su ligereza y fiabilidad, principalmente para satélites que orbitan la Tierra y planetas interiores. Además, tienen una vida útil prolongada (de 15 a 20 años en órbitas LEO). En la actualidad el límite tecnológico está en la órbita de Júpiter y sus lunas.

Cada panel está compuesto de varios miles de celdas fotovoltaicas que convierten la radiación solar en energía eléctrica. Las celdas de mayor eficiencia son las celdas multiunión que utilizan capas superpuestas de GaAs y Si y pueden llegar al 29% de eficiencia.

En el entorno terrestre la densidad de potencia de la radiación solar es del orden de los 1.300 W/m^2 , por lo que estas celdas fotovoltaicas son capaces de generar unos 400 W por cada m^2 . Las naves con requisitos de generación de gran cantidad de energía utilizan mecanismos de apuntamiento automático al sol para obtener la máxima eficiencia.

Dado que la densidad de radiación solar disminuye con el cuadrado de la distancia al Sol, la radiación solar en el entorno de Júpiter (a 5,2 UA del Sol, 1 UA equivale aproximadamente a 150 millones de Km) es de unos 50 W/m^2 . Asumiendo una eficiencia de las celdas solares del orden del 15% en la órbita de Júpiter, a causa del intenso campo de radiación electromagnética que lo rodea, la energía generada por cada m^2 de panel solar se reduciría a unos 7.5 W .

Por ello, si la sonda necesita unos 400 W de alimentación la superficie total de paneles solares tendría que ser de unos 53,2 m². En el caso de la sonda *Europa Clipper* (EC), lanzada en 2024 hacia la órbita de Júpiter, los requisitos iniciales de potencia aumentaron hasta 700 W aproximadamente, por lo que la superficie total de paneles solares se incrementó hasta los 116,2 m² (14,2 m de largo por 4,1 m de alto cada ala de los paneles).

Los paneles tienen un total de 28.000 celdas fotovoltaicas y su superficie está recubierta por una capa de óxido de In y Sn para aumentar la conductividad eléctrica. En la Ilustración 1, que se observa a continuación, puede verse un ala compuesta por cinco módulos, durante los ensayos de despliegue del panel solar en la sala de integración de JPL.

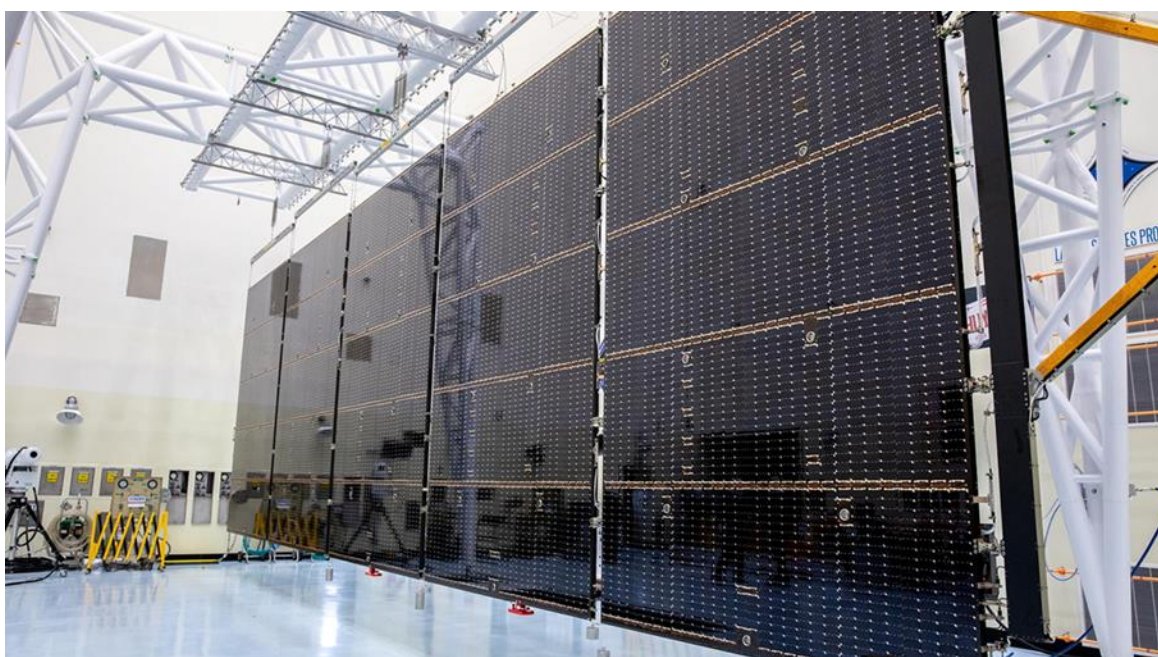


Ilustración 1. Imagen: NASA/Kim Shifflet

La nave *Europa Clipper*, de 6 Tm de peso, llegará a la órbita jupiteriana en abril de 2030 después de un viaje de 2.600 millones de Km con la misión de realizar 49 sobrevuelos alrededor de la luna Europa para estudiar en detalle si tiene las condiciones adecuadas para formación de la vida, gracias a un conjunto de instrumentos científicos para:

- Obtener imágenes de alta resolución de la superficie helada de la luna.
- Determinar su composición y medir el espesor de la corteza helada.
- Recopilar datos del océano subterráneo a través de los geiseres que periódicamente surgen a través de las grietas de la superficie.
- Determinar su profundidad y salinidad.
- Obtener datos de la delgada atmósfera y de la radiación espacial de su entorno.

A continuación, en la Ilustración 2, puede verse una imagen de la nave sobrevolando la superficie de la luna Europa en una órbita alrededor de Júpiter.

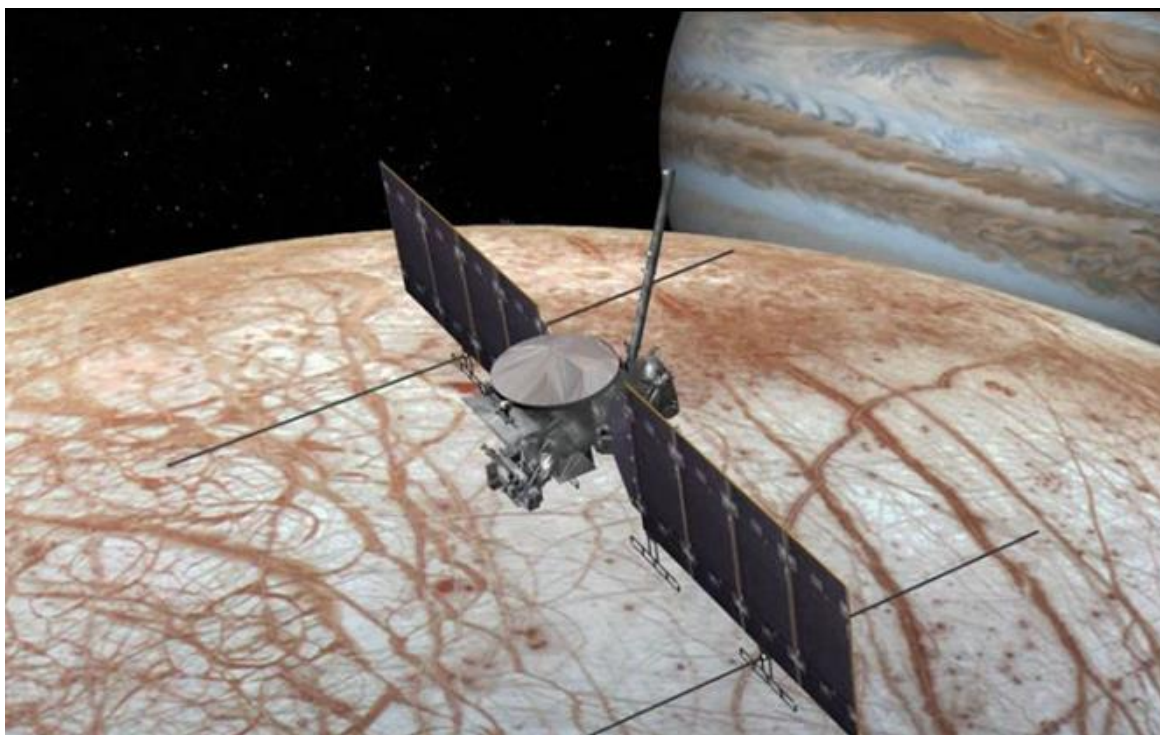


Ilustración 2. Nave Europa Clipper. Imagen: NASA/JPL CalTech

En la futura misión *Dragonfly* para explorar la superficie de Saturno (a 10 UA del Sol) la tecnología actual no permite el uso de paneles solares ya que la densidad de radiación solar en su órbita se reduce a unos 10 W/m². Por ello incorpora generadores RTG avanzados.

Generadores Termoeléctricos de Radioisótopos (RTG)

Los generadores RTG convierten en electricidad el calor generado por un material radiactivo a medida que se desintegra en isótopos no radiactivos emitiendo radiación. En este proceso se genera un gradiente de temperatura (hasta 700°C), en cada termopar de Si-Ge, entre su extremo caliente que está en contacto con la fuente de calor, GPHS (*general purpose heat source*), y el extremo frío en contacto con el espacio exterior, produciéndose una corriente eléctrica (efecto Peltier).

Al ser independiente de la iluminación solar, este sistema es óptimo para las misiones interplanetarias a planetas exteriores, misiones de larga duración (*Pioneer 10 y 11, Voyager 1 y 2, Cassini, Galileo, Ulysses, New Horizon, rovers* marcianos *Curiosity y Perseverance*) o para sondas a regiones con poca luz solar.

Es un sistema mucho más complejo y masivo que los paneles, por lo que aumenta el nivel de riesgo de la misión, especialmente los riesgos asociados a utilizar material radiactivo. Además, implica un coste significativamente mayor.

Las sondas *Voyager*, lanzadas en 1977 y aún en servicio, tienen tres fuentes de calor (GPHS) que funcionan con Pu-238, cuyo periodo de semidesintegración es de 87,7 años, emitiendo partículas α . Estas partículas son más fáciles de absorber y contener en una estructura de protección con grafito.

Los materiales radiactivos con un periodo de semidesintegración más corto producen un mayor número de transiciones por segundo, por lo que el calor generado es inversamente proporcional a dicho periodo de semidesintegración. Por ello, se utilizan materiales como Plutonio-238, Estroncio-90 y Polonio-210.

En la fecha del lanzamiento de las *Voyager*, el RTG generaba 470 W para alimentar los diversos sistemas de la nave y diez instrumentos científicos. En la actualidad, casi 50 años después, sólo están activos tres instrumentos y su esperanza de vida es de unos pocos años, dependiendo de la gestión del nivel de generación de la energía remanente.

En las imágenes que se muestran a continuación puede verse el generador RTG en uno de los extremos de la sonda y un esquema del GPHS compuesto por tres módulos. Cada módulo tiene una esfera de iridio, material de alta dureza y densidad, alta resistencia a la corrosión y punto de fusión alto ($>2.000^{\circ}\text{C}$), lo que le



Ilustración 3. Sonda Voyager con el RTG situado en el extremo inferior derecho de la imagen

hace idóneo para contener el Pu-238. Cada GPHS tiene un peso aproximado de 4,5 kg.

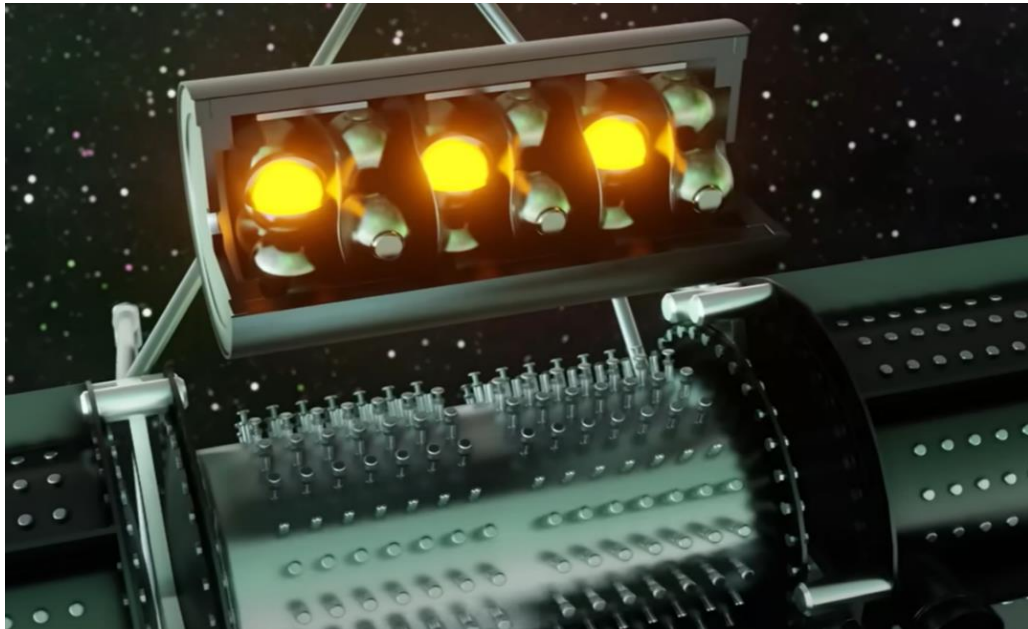


Ilustración 4. GPHS seccionado con las tres esferas que contienen el Pu-238 y los termopares conectados al punto caliente en el interior y al punto frío en el exterior de la estructura, la cual tiene función estructural y permite la disipación del calor generado en el interior.

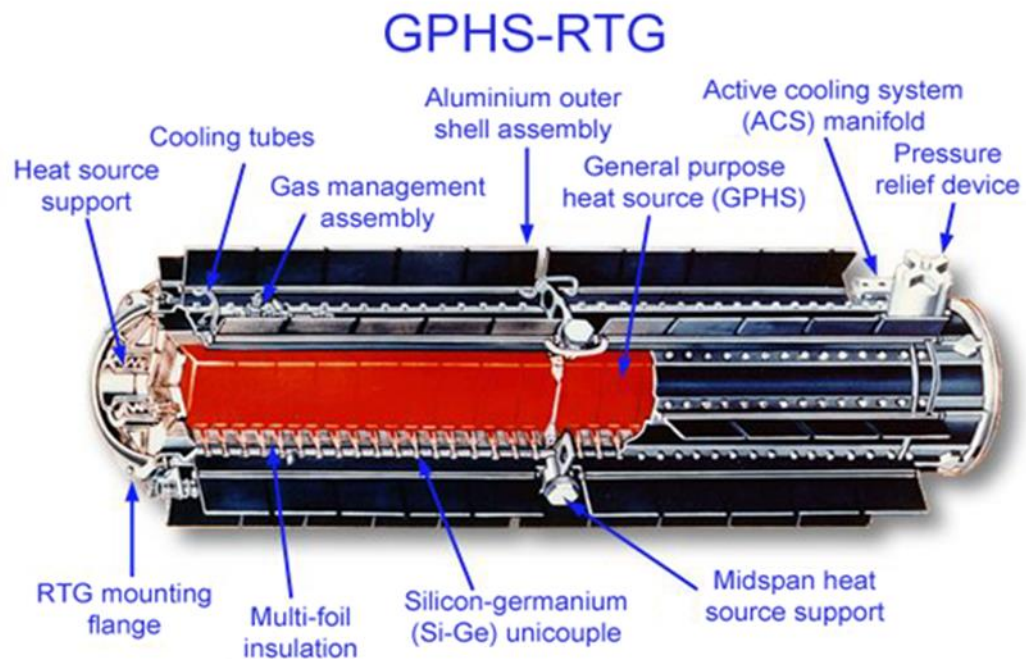


Ilustración 5. RTG de la sonda Cassini con el GPHS seccionado

Pilas de combustible

Las pilas de combustible utilizan reacciones químicas para generar energía eléctrica combinando oxígeno con un combustible. Las más usadas utilizan hidrógeno generando agua como residuo. Fueron utilizadas en misiones tripuladas, las cápsulas *Apollo* y el transbordador espacial.

Proporcionan una densidad energética alta pero su mayor desventaja es la durabilidad pues están limitadas por la cantidad de oxígeno y de combustible que puede almacenar la nave. Son más complejas que las baterías y tienen mayor masa.

Sistemas de almacenamiento de energía

La fuente de energía secundaria son las baterías secundarias que acumulan energía cuando no hay acceso directo al Sol. Son recargables y suministran energía eléctrica durante el periodo crítico del lanzamiento hasta la adquisición del sol por los paneles y posteriormente en los periodos de eclipse.

Su duración está limitada por los ciclos de carga/descarga requeridos por la duración de la misión; actualmente pueden llegar hasta los 20.000 ciclos. La capacidad de almacenamiento y la rapidez de la recarga están directamente determinadas por el tipo de órbita y de misión.

Por ejemplo, en la órbita geoestacionaria hay 90 eclipses por año y la duración máxima es de 72 minutos en los equinoccios. En una órbita LEO típica de 300 Km, la duración máxima del eclipse es de 35 minutos aproximadamente y hay 16 eclipses por día.

Los tipos más comunes actualmente son las baterías de ión-Litio: dióxido de azufre de litio, monofluoruro de carbón de litio, cloruro de tionilo de litio. Proporcionan una mayor densidad de energía que las baterías clásicas de Ni-H₂ y Ni-Cd utilizadas en misiones más antiguas.

Frente a densidades de energía de 75 Wh/Kg y 35 Wh/Kg para las baterías de Ni-H₂ y Ni-Cd respectivamente, las pilas de Li proporcionan valores desde 50 a 260 Wh/kg. Una batería está formada por varias celdas voltaicas conectadas en serie, cuyo número se diseña en función del voltaje requerido por la misión. Es uno de los sistemas más pesados de la nave, hasta el 15% del peso total.



Ilustración 6. Batería de aplicación espacial

Para misiones de corta duración o sondas de aplicaciones específicas que requieren poca energía se utilizan baterías primarias, que no son recargables. La más utilizada en estas aplicaciones es la de Pt-Zn por su fácil manejo y por tener un ritmo de descarga más alto.

Otros sistemas utilizados en aplicaciones concretas son los capacitores y las ruedas de inercia.

Subsistema de distribución de energía

El subsistema de distribución de energía, PDU (*power distribution unit*), se encarga de distribuir la electricidad a los distintos subsistemas y equipos de la nave: propulsión, comunicaciones, carga útil, etc.

Utiliza redes de buses de potencia en corriente continua (DC), aunque se prevén también en corriente alterna (AC) para futuras misiones tripuladas a gran escala y bases humanas. Incluye los interruptores electrónicos, limitadores de corriente y elementos de control térmico.

En la actualidad se utilizan voltajes altos del bus de alimentación (40 V a 50 V) para reducir la intensidad de corriente necesaria para una potencia dada y consecuentemente, la masa de los componentes. El límite superior de la tensión del bus está determinado por los semiconductores de conmutación de potencia.

Subsistema de gestión de energía

Este subsistema consta de:

- la Unidad de Control de Energía, PCU (*power control unit*), que se encarga de regular la entrada de energía desde los paneles solares o las unidades RTG, controlar los procesos de carga y descarga de las baterías y optimizar el uso global de energía mediante sistemas de *MPPT* (*máximo power point tracking*).
- La Unidad de Control Térmico, que se encarga de asegurar el correcto funcionamiento de las baterías y equipos electrónicos dentro de los márgenes superior e inferior de temperatura permitidos. Utiliza elementos tales como radiadores, recubrimientos térmicos y calentadores eléctricos. En algunos casos se utilizan calentadores de radioisótopos, RHU (*radisotope heat unit*), como en la misión del rover chino *Yutu-2* para sobrevivir a la noche lunar.

Futuras tecnologías para sistemas energéticos espaciales

Nuevas tecnologías están desarrollándose actualmente a medida que las necesidades energéticas abordo de las naves espaciales van creciendo y los diseños de las futuras bases lunares y marcianas requieren cantidades de potencia generada mucho mayores. A continuación, se esbozan algunas de las nuevas tecnologías.

Paneles solares de alta eficiencia

Partiendo de la base de paneles de gran superficie, como los descritos anteriormente para la misión Europa *Clipper*, los que se utilizan en los grandes satélites geoestacionarios de comunicaciones o los que se utilizan en la Estación Espacial Internacional (ISS), se están desarrollando celdas solares de cuádruple unión utilizando materiales avanzados de arseniuro de galio, indio, fosfuro de galio y germanio.

En estos desarrollos se han alcanzado eficiencias superiores al 35% y diseños de paneles mucho más resistentes a impactos de micrometeoritos y a la radiación cósmica.

Baterías de estado sólido

Las baterías de estado sólido se plantean como alternativa a las actuales pilas convencionales de ion-litio, ya que proporcionan una mayor densidad energética, un mejor rendimiento térmico y mayor tolerancia a la radiación.

Debido a su propio diseño se reducen sustancialmente el riesgo de fuga de material y también el de combustión, por lo que estas baterías son especialmente aptas para futuras misiones tripuladas y vehículos planetarios autónomos.

RTG avanzados

Partiendo de la base de los sistemas MMRTG (*Multi-Mission RTG*) desarrollados para los *rovers* marcianos *Curiosity* y *Perseverance*, se está desarrollando la tecnología eMMRTG (*enhanced Multi-Mission RTG*).

Este sistema utiliza materiales termoeléctricos avanzados como la *skutterudita* que mejora la eficiencia de conversión térmico-eléctrica hasta un 12%, frente al 6% de los sistemas clásicos. Además, aumenta la potencia eléctrica generada y reduce la masa del conjunto (uno de los principales problemas de los RTG convencionales).

Son la solución óptima para los futuros *rovers* en misiones de larga duración y sondas que operen más allá de la órbita de Neptuno. La misión *Dragonfly* prevista para lanzar en 2028 a Titán usará esta tecnología.

Celdas de combustible regenerativas

Estos sistemas combinan la electrolisis y la generación de energía en un ciclo continuo: durante el día se genera O₂ y H₂ a partir del agua y durante la noche se recombinan en una pila convencional para generar electricidad.

Estos diseños se están planteando para los sistemas de soporte vital en los futuros hábitats lunares y marcianos, ya que generan energía limpia y reciclable en entornos cerrados.

Reactores nucleares compactos de nueva generación

En este caso se utilizan reactores nucleares de fisión espacial basados en Uranio-235, que convierten calor en electricidad mediante un motor *Stirling* con un generador eléctrico o utilizando conversores termoeléctricos avanzados.

Existe un diseño probado en tierra en 2018 para suministrar 1 kW de potencia. Es un diseño de baja masa y modular que permite escalar potencias desde 1 kW hasta 10 kW.

Este sistema es especialmente idóneo para suministrar energía constante de manera fiable en ambientes donde la luz solar es insuficiente o inexistente, como

la superficie marciana, en misiones a las lunas heladas (Europa y Encelado), para futuras misiones tripuladas o en estaciones científicas autónomas en el espacio profundo. ■

Nota: Las ideas y opiniones contenidas en este documento son de responsabilidad del autor, sin que reflejen, necesariamente, el pensamiento de la Academia de las Ciencias y las Artes Militares.

© Academia de las Ciencias y las Artes Militares - 2025