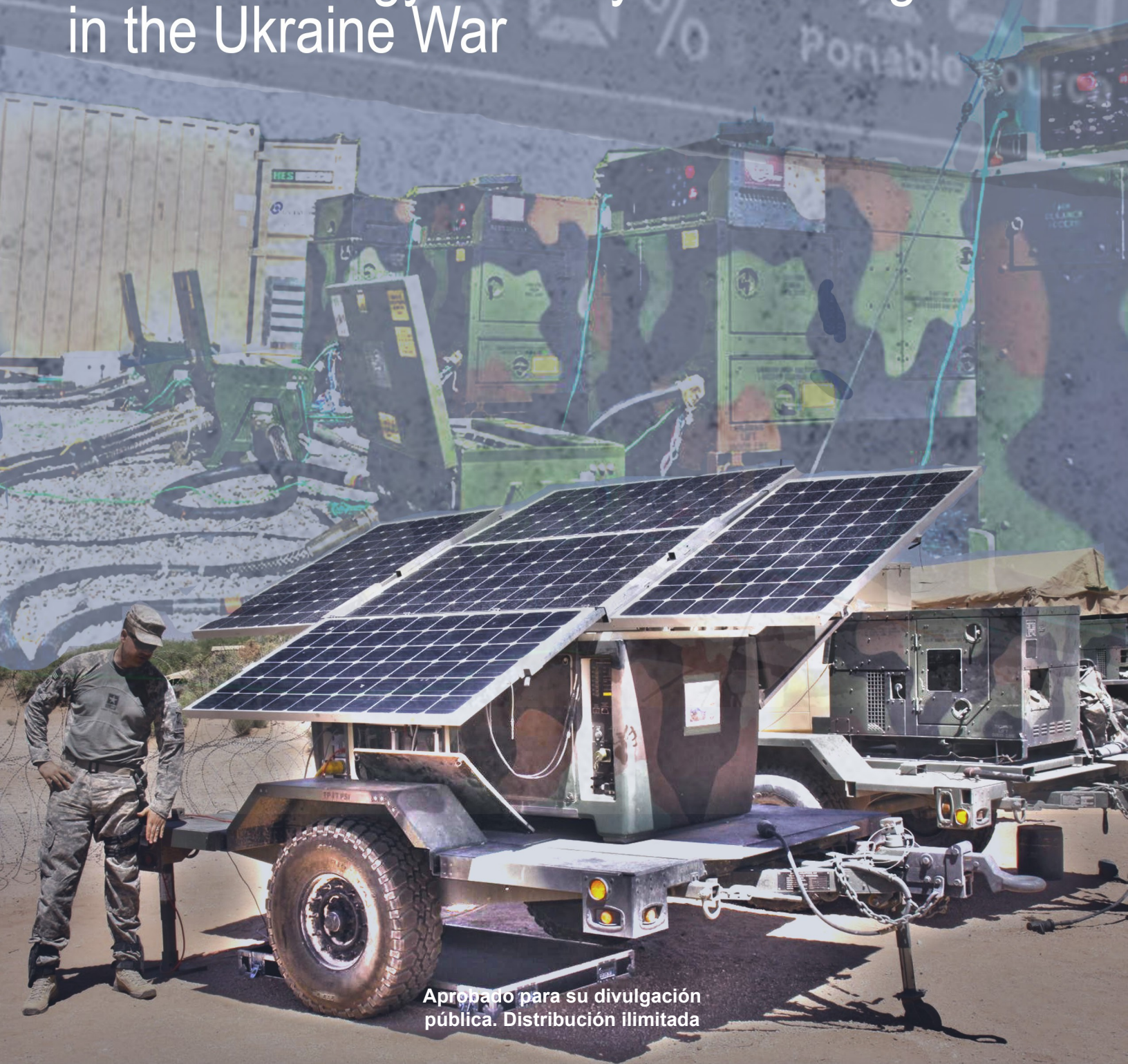


POWERING THE FRONT

Tactical Energy Delivery and Management
in the Ukraine War



Aprobado para su divulgación
pública. Distribución ilimitada



El Centro de Lecciones Aprendidas del Ejército dirige el Programa de Lecciones Aprendidas del Ejército y proporciona información oportuna y relevante para subsanar deficiencias, mejorar la preparación y orientar la modernización.



CONTÁCTANOS

Avda. Meade, 10
Edificio 50
Fort Leavenworth,
KS 66027

DSN: 552-9533
913-684-9533

Centro de Lecciones aprendidas

DIRECTOR

Coronel Scott Allen

ANALISTAS/AUTORES

Coronel Joseph Serowik,
comandante Jakub Szulczyk
(9.^a Brigada Blindada,
Ejército polaco)

OFICIAL DE
RELACIONES
PÚBLICAS
Michael Hagen

EDITOR
Zack Shelby

ILUSTRADORA
Julie Gunter

SEGURIDAD
Sandra Griffin

Descargo de responsabilidad: Este documento se ha elaborado con la ayuda de servicios de IA basados en GPT con fines de investigación, redacción y/o edición. Aunque se ha utilizado la IA para generar o perfeccionar el contenido, toda la información, las interpretaciones y las conclusiones aquí presentadas son responsabilidad de los autores. Se ha revisado el contenido para garantizar su exactitud, originalidad y cumplimiento de las normas éticas.

Nota: Elaborado en colaboración con el Centro de Doctrina y Entrenamiento de las Fuerzas Armadas de Polonia.



Sección 1: Introducción

La electricidad se ha convertido en uno de los factores más decisivos de la guerra contemporánea. Mientras que las generaciones militares del pasado dependían principalmente de la mano de obra, el combustible y la munición, las fuerzas actuales dependen en igual medida del flujo ininterrumpido de energía eléctrica para mantener el ritmo operativo. Los radios, los drones, los sistemas de mando y control, los equipos de guerra electrónica (EW), las armas guiadas de precisión y los dispositivos médicos quedan inútiles sin una fuente de energía fiable. En la actual guerra de Ucrania, la electricidad se ha convertido no solo en un objetivo estratégico, sino también en una necesidad táctica. Rusia ha atacado deliberadamente la red eléctrica nacional de Ucrania para perturbar la vida civil y debilitar la moral, lo que ilustra cómo la infraestructura energética funciona como objetivo militar y herramienta de guerra psicológica. Sin embargo, más allá de la esfera estratégica de los ataques a la red eléctrica¹ y de la política energética nacional, existe una preocupación más inmediata y apremiante: cómo las pequeñas unidades en primera línea generan, distribuyen y gestionan la energía bajo fuego enemigo.

A nivel táctico, la electricidad es el sustento oculto de cada pelotón y compañía. A diferencia del combustible o la munición, que están firmemente integrados en las cadenas de suministro militares establecidas, la electricidad en el campo de batalla plantea retos únicos. Las baterías se agotan rápidamente, los generadores son vulnerables a la detección y los convoyes de combustible son objetivos de gran valor para la artillería y los drones. En Ucrania, donde el combate es cambiante y disperso, las unidades no siempre pueden contar con un reabastecimiento regular o con una infraestructura centralizada. En su lugar, se ven obligadas a improvisar, adaptarse e integrar tecnologías militares y civiles para mantener las operaciones. El resultado es un campo de batalla en el que la gestión de la energía se ha convertido en algo tan fundamental para la supervivencia como el camuflaje, la maniobra y la potencia de fuego.

Este artículo parte de la premisa de que la eficacia del combate moderno es inseparable de la gestión de la energía en el campo de batalla. La energía eléctrica es un factor clave para todas las funciones de combate. Sin ella, el mando de la misión, la protección, el apoyo logístico y la inteligencia se deterioran rápidamente (2). El análisis de la experiencia ucraniana muestra que la capacidad de generar y distribuir electricidad a nivel táctico influye directamente en el mando y control (C2), el conocimiento de la situación y la letalidad de las fuerzas armadas. Las secciones siguientes analizan las crecientes demandas energéticas del campo de batalla moderno, las diversas fuentes de energía táctica de que disponen las unidades ucranianas y los retos a los que se enfrentan para mantenerla, así como las adaptaciones innovadoras que han surgido como respuesta. El caso ucraniano pone de relieve una lección más amplia para las fuerzas armadas modernas: la resiliencia energética táctica ya no es una cuestión secundaria, sino un pilar fundamental de la preparación para el combate.

¹ *Ucrania: Ataques a la infraestructura energética: perspectivas e impacto durante la temporada de frío de 2024-2025*. Informe temático. 13 de septiembre de 2024.

https://www.acaps.org/fileadmin/Data_Product/Main_media/20240913_ACAPS_Ukraine_Analysis_hub_Attacks_on_the_energy_infrastructure_in_Ukraine.pdf.

² Publicación sobre Técnicas del Ejército (ATP) 3-34.45, *Generación y distribución de energía eléctrica*. 5 de febrero de 2024.

Sección 2

Las necesidades energéticas del campo de batalla moderno

El campo de batalla moderno consume más energía eléctrica que cualquier otro en la historia. En Ucrania, esta realidad se ha puesto de manifiesto a diario. Las unidades tácticas que antes apenas necesitaban munición y combustible ahora dependen de un complejo ecosistema de energía eléctrica para funcionar. Este aumento de la demanda se debe a varias tendencias convergentes en la guerra: la proliferación de los sistemas de mando digitales, el predominio de las plataformas no tripuladas y la dependencia de la precisión y la superioridad informativa.

La guerra de Ucrania pone de manifiesto un aumento de los sistemas dependientes de la electricidad en comparación con conflictos anteriores:

- **Mando, control y comunicaciones (C3).** La capacidad de comunicarse es el núcleo de toda operación militar. Los pelotones y las compañías en Ucrania dependen de radios encriptadas, enlaces ascendentes por satélite, ordenadores portátiles seguros y terminales de datos para el mando y control (C2). Estos dispositivos requieren recargas frecuentes, a menudo en condiciones austeras en las que no se dispone de suministro eléctrico comercial. Un puesto de mando (CP) típico a nivel de compañía en Ucrania puede hacer funcionar simultáneamente entre 10 y 15 radios, varios ordenadores portátiles y enlaces de datos seguros, consumiendo entre 2 y 3 kilovatios (kW) de potencia continua. Una sola radio táctica Harris Falcon III consume unos 35 vatios, mientras que los terminales de enlace ascendente por satélite, como Starlink, requieren entre 100 y 150 vatios para funcionar. En conjunto, la demanda de un modesto nodo de mando avanzado puede superar el consumo eléctrico diario de un hogar civil. Las interrupciones en el suministro eléctrico pueden provocar fallos en la coordinación, retrasos en los disparos o un aislamiento total.
- **Sistemas de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR).** La proliferación de pequeños drones en Ucrania ha incrementado drásticamente las necesidades tácticas de electricidad. Los cuadricópteros utilizados para misiones de reconocimiento, corrección de artillería y ataque exigen una recarga casi constante de las baterías, que solo pueden proporcionar entre 20 y 40 minutos de tiempo de vuelo cada una. En el campo de batalla ucraniano se ha producido un despliegue generalizado de drones cuadricópteros, como los de la serie DJI Mavic, que ahora resultan indispensables para la corrección de artillería y el reconocimiento. Cada batería proporciona entre 25 y 35 minutos de vuelo y requiere entre 60 y 90 minutos para recargarse, lo que significa que es necesario alternar constantemente varias baterías. Un solo equipo de drones puede llegar a utilizar entre 10 y 12 ciclos de carga de batería al día, lo que supone un consumo de entre 2 y 3 kilovatios-hora (kWh) de electricidad. Los drones de ala fija más grandes, como el Leleka-100 o el Furia, exigen una capacidad de carga aún mayor, por lo que a veces se recurren a sistemas montados en vehículos. Además, las gafas de visión nocturna (NVG) consumen entre 0,5 y 1 vatio por dispositivo, mientras que las miras térmicas requieren entre 5 y 10 vatios cada una. Para un pelotón equipado con dichos dispositivos, esto se traduce en varios cientos de vatios-hora al día. La lucha por el conocimiento de la situación —ver primero y atacar primero— está, por lo tanto, directamente ligada a la disponibilidad de electricidad.
- **Guerra electrónica (GE).** Los frentes de Ucrania se han convertido en laboratorios de guerra electrónica, donde las medidas de interferencia, suplantación y lucha contra los drones consumen enormes cantidades de energía. Los inhibidores móviles y las estaciones de radar son notoriamente voraces en cuanto al consumo de energía, ya que requieren un suministro continuo de alta potencia. Un sistema de interferencia portátil como el Bukovel-AD consume entre 200 y 300 vatios, mientras que los inhibidores más grandes montados en vehículos pueden requerir entre 5 y 10 kW de generación continua. Sin un suministro ininterrumpido, estos sistemas se convierten en puntos débiles de la red defensiva.
- **Apoyo médico.** La electricidad no es solo un factor que facilita el combate, sino también una necesidad vital. Los hospitales de campaña, los puntos de estabilización y los centros de evacuación de heridos requieren

energía ininterrumpida para hacer funcionar sus equipos. Un pequeño punto de estabilización con un respirador, iluminación quirúrgica, refrigeración y sistemas de comunicaciones puede consumir entre 3 y 5 kW de forma continua. Los frigoríficos para sangre y vacunas requieren entre 100 y 200 vatios cada uno, pero la necesidad de un funcionamiento ininterrumpido los convierte en grandes consumidores a largo plazo. Los hospitales de campaña más grandes, a menudo instalados en sótanos de edificios civiles cerca del frente, pueden funcionar con generadores diésel de entre 20 y 50 kW, especialmente cuando dan apoyo a quirófanos. Sistemas donados como el *EcoFlow Delta Max* (almacenamiento en batería de 2 kWh) o el *Honda EU2200i* (generador portátil de 2,2 kW) son ahora equipamiento estándar en muchos puntos de evacuación de heridos ucranianos. Durante los ataques rusos contra las redes eléctricas civiles, las instalaciones médicas ucranianas han dependido cada vez más de generadores portátiles y centrales eléctricas donadas para mantener las funciones vitales. Esto pone de relieve que la demanda energética a nivel táctico también está directamente vinculada a la supervivencia humanitaria.

- **Elementos esenciales de la infantería.** A nivel individual, el soldado de infantería moderno lleva consigo un conjunto cada vez mayor de dispositivos alimentados eléctricamente, como radios, receptores del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), telémetros láser, gafas de visión nocturna y cámaras corporales. Los soldados también utilizan baterías externas personales para recargar teléfonos inteligentes y tabletas, que a menudo sirven además como herramientas de cartografía, traducción y localización de objetivos. Aunque el consumo individual es modesto, la demanda agregada de toda una compañía puede ser significativa. Sin embargo, a diferencia del combustible o el agua, el suministro eléctrico está menos estandarizado: las unidades deben llevar una combinación de cables, adaptadores, baterías y cargadores, lo que complica la logística. La carga electrónica personal de un soldado de infantería moderno es considerable:

- **Radio.** Consumo continuo de 5 a 10 vatios (W).
- **Receptor GPS.** ~2 W.
- **Dispositivo de visión nocturna.** ~1 W.
- **Visor térmico.** Entre 5 y 10 W.
- **Teléfono inteligente o tableta (utilizados para aplicaciones de mapas como GIS Arta).** Aproximadamente 10 W mientras están activos.

De media, un soldado puede consumir entre 50 y 100 vatios-hora (Wh) al día solo en dispositivos electrónicos personales. A nivel de pelotón (entre 30 y 40 efectivos), esto supone entre 1,5 y 3 kWh diarios, lo que equivale a la producción diaria total de un pequeño generador de 1 kW. En la práctica, los soldados dependen de baterías externas de uso comercial de entre 20 000 y 30 000 miliamperios-hora (mAh) (70–100 Wh), que a menudo deben recargarse cada 24–48 horas.

- **Tecnologías emergentes y consumo oculto.** Más allá de los sistemas evidentes, las demandas menos visibles también suponen una carga importante para el suministro eléctrico táctico. Los calentadores portátiles, las espoletas electrónicas, los drones de desminado y los sensores de radar de contrabatería requieren energía. Los deslumbradores láser contra drones (experimentales) requieren picos de 10 a 15 kW. Los calentadores portátiles para trincheras y búnkeres consumen entre 1 y 2 kW cada uno, lo cual es fundamental para la supervivencia en invierno. Los drones de desminado y los vehículos teledirigidos pueden consumir cientos de vatios por misión, lo que requiere ciclos de recarga repetidos. Incluso las espoletas electrónicas de los proyectiles de artillería modernos y las municiones de vuelo prolongado deben recargarse antes de su uso, lo que genera una demanda oculta dentro de la logística de artillería.

- **Ritmo operativo y carga continua.** A diferencia de los recursos tradicionales, la electricidad no puede simplemente almacenarse a granel en el frente; debe generarse de forma continua. Esto crea una curva de demanda constante, ya que las baterías se degradan con el tiempo y el uso. Los drones deben recargarse tras cada salida, los nodos de comunicación deben permanecer

alimentados, y los sistemas médicos no pueden apagarse. Una compañía en primera línea que utilice drones, radios y un puesto médico puede necesitar entre 20 y 30 kWh al día solo para mantener sus actividades. Para ponerlo en perspectiva, esto equivale a tener en funcionamiento de forma ininterrumpida entre 10 y 15 frigoríficos domésticos. Mantener esta demanda en condiciones de fuego de artillería, logística interrumpida y espacio aéreo disputado obliga a las unidades a recurrir a una combinación de generadores, alternadores de vehículos y sistemas renovables improvisados. Por lo tanto, los comandantes tácticos se enfrentan al reto de mantener un suministro energético ininterrumpido en entornos donde el camuflaje y la supervivencia son primordiales.

Tabla 2-1. Aparatos electrónicos típicos (carga eléctrica) que se encuentran en el campo de batalla frente a la potencia (vatios)/ciclo de trabajo en horas/energía diaria consumida en vatios-hora³

Carga	Potencia típica (W)	Ciclo de trabajo	Energía diaria (Wh)	Notas
Terminal Starlink (2. ^a generación/«estándar»)	50–100	6–18 horas (h)/día	300–1 800	Utilizar un programador de reposo; disponer de una fuente de alimentación programable (PPS) como respaldo para evitar caídas de tensión
Radios portátiles de muy alta frecuencia (VHF)/ultraalta frecuencia (UHF) (por cargador)	10–30	1–3 h de carga	10–90	Suponiendo 1–2 baterías de repuesto por radio al día
Cargador de radio portátil	40–90	1–3 h	40–270	Mantener el PPS encendido para atenuar el ruido del generador.
Tableta/teléfono (por dispositivo)	5–15	2–4 h	10–60	Se recomienda USB-C PD; desactiva las funciones que consumen mucha energía
Portátil (planificación de misiones)	30–60	2–6 h	60–360	Reducir el brillo de la pantalla; programar las actualizaciones
Vehículo aéreo no tripulado (UAV) cuadricóptero pequeño. Batería (por paquete)	60–120 durante la carga	1–2 h/paquete	60–240 por paquete	4–8 paquetes/día, habitual en equipos de ISR
Vista en primera persona (FPV)/Estación terrestre de sistemas aéreos no tripulados (UAS)	20–60	2–6 h	40–360	Consolidar en el puesto de mando siempre que sea posible
Dispositivos ópticos (cargadores de baterías para cámaras térmicas y gafas de visión nocturna)	10–40	1–3 h	10–120	Centralizar la recarga por pelotón
Iluminación LED para el puesto de mando y el puesto de socorro	10–50	4–8 h	40–400	Luz roja/infrarroja (IR) de baja intensidad; útiles los sensores de movimiento
Dispositivos médicos (aspiración, monitores)	20–100	intermitente	20–300	Mantener en el circuito «crítico» protegido

³ Mayor Jakub Szulczyk. Fuerzas Terrestres de Polonia.

Tabla 2-2. Sistemas típicos de consumo de energía que se observan en el campo de batalla, así como sus requisitos de potencia y su impacto⁴

Sistema/Equipo	Requisitos típicos de potencia	Repercusión táctica
Puesto de mando de compañía	2–3 kW continuos	Mantiene las comunicaciones y el mando y control; equivalente a una vivienda
Radio Harris Falcon III	35 W	Comunicaciones tácticas seguras principales
Terminal Starlink	100–150 W	Enlace ascendente crítico para datos y localización de objetivos
Drone DJI Mavic (por equipo, al día)	2–3 kWh al día	Imprescindible para ISR y corrección de artillería
Visor térmico	5–10 W	Aumenta la letalidad de la infantería y mejora las operaciones nocturnas
Gafas de visión nocturna	0,5–1 W	Permiten operaciones las 24 horas del día, los 7 días de la semana, en condiciones de poca luz
Inhibidor portátil de guerra electrónica (Bukovel-AD)	200–300 W	Defensa contra drones; requiere una potencia de salida constante
Inhibidor de guerra electrónica montado en vehículo	5–10 kW	Interferencia en áreas extensas; alto consumo
Radar de contrabatería (AN/TPQ-36)	10–20 kW	Imprescindible para el contrafuego de artillería; no puede fallar
Punto de estabilización pequeño (médico)	3–5 kW continuos	Apoya la estabilización de heridos; salva vidas
Hospital de campaña (unidad quirúrgica)	20–50 kW	Capacidad médica completa cerca de la primera línea
Unidad de refrigeración (médica)	100–200 W	Conserva la sangre y los medicamentos en cualquier circunstancia
Soldado de infantería (Diario personal)	50–100 Wh	Garantiza las comunicaciones, la navegación y la localización de objetivos de los soldados
Pelotón (30–40 soldados, diario)	1,5–3 kWh al día	Demanda total = carga a nivel del generador
Calentador portátil (trincheras/búnker)	1-2 kW	Fundamental para la supervivencia en invierno en las trincheras

Como ilustran las tablas 2-1 y 2-2, incluso los sistemas electrónicos relativamente pequeños suponen una carga acumulada para el suministro energético táctico. La carga de un solo soldado, de entre 50 y 100 Wh al día, puede parecer modesta, pero si se extrapola a un pelotón, asciende a entre 1,5 y 3 kWh diarios, lo que equivale a hacer funcionar un generador de 1 kW durante varias horas. Del mismo modo, aunque un dron comercial solo consume unos pocos kilovatios-hora a lo largo de sus misiones diarias, la necesidad de una rotación constante de baterías y de una infraestructura de recarga crea una dependencia logística que rivaliza con el reabastecimiento de combustible o munición.

Los verdaderos casos atípicos son los sistemas de guerra electrónica (EW) y de radar, que requieren una generación continua de varios kilovatios —cargas que solo pueden mantenerse mediante generadores montados en vehículos o fijos—. Las instalaciones médicas, en particular los hospitales de campaña que consumen entre 20 y 50 kW, subrayan aún más que la demanda energética táctica no se limita a las operaciones de combate, sino que se extiende a funciones de apoyo vitales. En conjunto, estas cifras demuestran que el campo de batalla moderno exige que las unidades funcionen como microrredes eléctricas autosuficientes, equilibrando diversas demandas bajo fuego enemigo.

⁴ Ibid.

«Una red de sensores que se queda sin energía se convierte en un nodo inactivo. Un puesto de mando que se queda a oscuras pierde ritmo. Un equipo de lanzamiento de drones sin capacidad de recarga deja de ser relevante tras su primera salida. (5)» Por lo tanto, la energía en el campo de batalla moderno no es una función de apoyo pasiva, sino un factor crítico que permite el poder de combate. Desde el reconocimiento hasta la supervivencia médica, todos los ámbitos operativos en Ucrania han demostrado que el suministro eléctrico ininterrumpido es decisivo. El crecimiento exponencial de los sistemas que consumen mucha energía ha convertido la energía táctica en una vulnerabilidad, lo que obliga a los ejércitos a replantearse la planificación energética como un elemento central de las operaciones de combate y un factor primordial de sostenimiento. Por lo tanto, la planificación energética implica calcular las cargas máximas, el consumo medio y los requisitos de redundancia para mantener la continuidad operativa.

Además, a medida que la guerra se vuelve más centrada en las redes, el uso de energía crece exponencialmente. La futura introducción de exoesqueletos, armaduras motorizadas y armas basadas en láser aumentará aún más las necesidades. La guerra de Ucrania es, por lo tanto, un anticipo del campo de batalla del mañana, donde la electricidad es tan fundamental como el combustible o la munición.

⁵ Mayor Sean McLachlan. «Mejores prácticas para la puesta en marcha de la energía en el campo de batalla: generación, almacenamiento y distribución de energía en operaciones de apoyo logístico a gran escala (LSCO)». Centro de Lecciones Aprendidas del Ejército. N.º 25-1085. Agosto de 2025. Página 3.

Sección 3

Fuentes de energía táctica en Ucrania

El campo de batalla ucraniano demuestra que la energía táctica no puede depender de una única fuente; en su lugar, las unidades recurren a un mosaico de sistemas de generación adaptados a diferentes entornos, misiones y niveles de movilidad. La energía se produce a partir de sistemas tradicionales de tipo militar y de una dependencia cada vez mayor de tecnologías civiles, a menudo suministradas por voluntarios u organizaciones no gubernamentales (ONG) (6), o improvisadas a partir del mercado comercial. Este carácter dual del suministro de energía táctica de Ucrania —que combina la logística formal con la innovación de base— ha sido una de las características definitorias de su resiliencia.

Las unidades ucranianas emplean una combinación de fuentes tradicionales e improvisadas:

- **Generadores portátiles.** Se utilizan en puestos de mando, bases de drones y puestos médicos. Sus ventajas son su alta fiabilidad y la capacidad de producir una potencia constante del orden de los kilovatios (kW), pero sus inconvenientes son considerables. Consumen cantidades sustanciales de combustible, generan ruido y señales térmicas que pueden ser detectadas por los drones rusos, y requieren un mantenimiento frecuente. En la práctica, las unidades suelen distribuir varios generadores más pequeños de 1-2 kW en lugar de depender de un único sistema grande de 10-15 kW, lo que aumenta la redundancia y reduce el riesgo de un fallo catastrófico si se destruye un generador. Un pequeño generador *Honda EU2200i* (2,2 kW) consume aproximadamente 1 litro de gasolina por hora con una carga media. Un equipo de drones en primera línea que utilice dos de estos generadores para cargar equipos y sistemas de mando puede llegar a consumir entre 20 y 30 litros de combustible al día, lo que equivale a un bidón lleno por máquina. En instalaciones de mayor tamaño, las unidades ucranianas utilizan generadores diésel de tipo militar de 10 a 20 kW, que pueden consumir entre 3 y 5 litros de diésel por hora, lo que supone una pesada carga logística.
- **Sistemas montados en vehículos.** Muchas unidades ucranianas utilizan sus vehículos como centrales eléctricas móviles. Se emplean vehículos blindados de transporte de tropas, camiones e incluso camionetas civiles para alimentar sistemas de radar, radios o equipos médicos. Este método permite flexibilidad y movilidad, pero aumenta la competencia por el combustible entre la propulsión y la generación de energía. Además, los vehículos estacionarios con los motores en marcha generan continuamente señales térmicas visibles para los drones rusos equipados con sensores de infrarrojos (IR). Un alternador típico de camión puede proporcionar entre 1 y 2 kW de potencia eléctrica útil, mientras que los generadores especializados montados en vehículos pueden suministrar hasta 15–20 kW. Por ejemplo, los camiones militares KRAZ o KAMAZ pueden abastecer a puestos de mando completos, aunque a costa de sacrificar capacidad de combustible para la generación de energía en ralentí.
- **Baterías y cargadores portátiles.** En el nivel táctico más básico, las baterías son el sustento vital de los soldados individuales y de los operadores de drones (7). Los miembros de la infantería ucraniana llevan consigo múltiples paquetes de baterías de iones de litio para alimentar radios, dispositivos de posicionamiento global (GPS) y equipos ópticos. Los cargadores portátiles de uso doméstico, a menudo suministrados mediante financiación colectiva, son un elemento clave del ecosistema del frente. Las estaciones de baterías portátiles de mayor tamaño, como la *EcoFlow Delta* (con una capacidad de almacenamiento de 1,2 a 2 kilovatios-hora [kWh]), se utilizan con frecuencia para cargar drones, ordenadores portátiles y radios sin necesidad de poner en marcha ruidosos generadores. Estos sistemas proporcionan «energía silenciosa», algo crucial para el camuflaje, pero que, a la larga, requiere recargarse mediante generadores de combustible o paneles solares. Un cargador portátil de 20 000 miliamperios-hora (mAh) (70 vatios-hora [Wh]) puede recargar el smartphone o la radio de un soldado entre 2 y 3 veces.

⁶ Estaciones de carga EcoFlow para las fuerzas armadas en Ucrania. <https://www.peoplesproject.com/en/ecoflow-charging-stations-for-the-military-in-ukraine/>.

⁷ Ling, Justin. «Las baterías son el arma secreta de Ucrania contra Rusia». 23 de febrero de 2023. <https://www.wired.com/story/ukraine-russia-power-grid-batteries/>.

Las estaciones portátiles de mayor tamaño (por ejemplo, las unidades *EcoFlow* de 2 kWh) pueden recargar entre 15 y 20 baterías de drones antes de necesitar recargarse ellas mismas. Esta modularidad las hace muy adaptables para unidades dispersas.

- **Energías renovables.** Aunque menos habituales que los generadores, las soluciones de energía renovable a pequeña escala han cobrado cada vez más importancia. Los paneles solares portátiles, a menudo equipos comerciales de acampada, se utilizan para realizar cargas lentas de las baterías en posiciones de retaguardia o durante despliegues estáticos prolongados. En algunos casos, los hospitales de campaña y los centros de mando utilizan grandes instalaciones solares donadas, combinadas con bancos de baterías de litio, creando microrredes semipermanentes independientes del suministro de combustible. Sin embargo, la energía renovable está limitada por las condiciones meteorológicas, las horas de luz estacionales y su baja producción, lo que la convierte en una fuente auxiliar más que primaria. Un panel solar plegable de 100 vatios (W) (8) produce solo entre 300 y 500 Wh al día en las condiciones invernales de Ucrania, lo que basta para cargar entre 4 y 6 baterías de drones, pero dista mucho de ser suficiente para un radar o un hospital. Los sistemas más grandes, con una capacidad de entre 1 y 2 kW, pueden abastecer a un puesto de mando si el tiempo lo permite, pero requieren un tiempo de instalación considerable y medidas de camuflaje.

- **Sistemas improvisados o capturados.** Una característica distintiva de la adaptación ucraniana ha sido el uso creativo de equipos civiles e incluso de equipos rusos capturados. Con frecuencia se recurre a generadores diésel civiles procedentes de obras de construcción, baterías de camiones reconvertidas e inversores disponibles en el mercado. Los generadores y las unidades de energía móviles rusos capturados se reutilizan de inmediato para mantener las operaciones ucranianas. Esta improvisación ofrece soluciones provisionales, pero complica la logística, ya que los diferentes sistemas requieren piezas de recambio, combustibles y conectores distintos. Las unidades suelen funcionar con una combinación de sistemas civiles europeos de 230 V y generadores militares rusos/soviéticos de 220 V, lo que genera problemas de compatibilidad que requieren adaptadores y cableado improvisado.

⁸ Gurtova, Elizaveta. *El trabajo conjunto de Starlink y la estación de recarga de campo Temerland*. 16 de febrero de 2023. <https://temerland.com/en/the-joint-work-of-starlink-and-the-temerland-field-charging-station/>.

Tabla 3-1. Dispositivos de generación y almacenamiento de energía: potencia de salida, ventajas, desventajas y usos habituales⁹

Fuente de energía	Potencia o capacidad típica	Ventajas	Inconvenientes/ Limitaciones	Casos de uso habituales
Generadores portátiles de diésel/gasolina	1–20 kW	Fiabiles, con una potencia constante y de fácil adquisición	Alto consumo de combustible, ruidosos, detectables	Puestos de mando, recarga de drones, hospitales de campaña
Sistemas de energía montados en vehículos	1–20 kW	Móviles, flexibles, de doble uso (transporte y energía)	Elevado consumo de combustible, huella térmica y acústica	C2 móvil, radares, interferencias de guerra electrónica (EW)
Baterías y cargadores portátiles	50 Wh–2 kWh	Silencioso, portátil, bajo mantenimiento	Capacidad limitada, hay que recargarlo	Equipos electrónicos para soldados, operaciones con drones, radios
Paneles solares portátiles	100 W–2 kW	Energía renovable, silenciosa, bajo coste operativo	Dependen de las condiciones meteorológicas, bajo rendimiento, requieren instalación	Posiciones traseras, carga lenta de la batería, mensajes rápidos
Equipos improvisados o capturados	Variable	Fácilmente disponible, rentable	Problemas de compatibilidad, rendimiento irregular	Energía suplementaria, respaldo de emergencia
Grandes generadores diésel móviles	10–50 kW	Suministra energía a todo un puesto de mando o un hospital de campaña	Pesados, requieren transporte y combustible; generan calor y ruido	Hospitales de campaña, emplazamientos de radar, sistemas de guerra electrónica

La tabla 3-1 destaca cómo las fuerzas ucranianas combinan múltiples fuentes de energía para satisfacer diversas demandas tácticas. Ningún sistema es suficiente por sí solo; más bien, las unidades operan como microrredes, equilibrando generadores de alta potencia, sistemas montados en vehículos y baterías portátiles para abastecer de energía a todo, desde drones y radios hasta instalaciones médicas y equipos de guerra electrónica (GE).

El suministro eléctrico táctico de Ucrania se basa en un sistema híbrido de generadores, vehículos, baterías, energías renovables y recursos improvisados. Cada uno de ellos tiene sus propias fortalezas y vulnerabilidades. Los generadores proporcionan una gran potencia, pero consumen combustible y generan señales de detección; los vehículos aportan movilidad, pero reducen la autonomía operativa; las baterías y la energía solar permiten un suministro silencioso, pero no pueden soportar cargas pesadas. La dependencia de la tecnología civil, a menudo suministrada por ONGs, ilustra cómo el suministro eléctrico táctico en Ucrania no es únicamente una cuestión de logística militar, sino también de movilización social. Este enfoque híbrido proporciona redundancia, pero también ejerce una presión significativa sobre las cadenas logísticas.

La tabla 3-2 muestra una matriz de riesgos y medidas de mitigación.

⁹ Mayor Jakub Szulczyk. Fuerzas Terrestres de Polonia.

Tabla 3-2. Matriz de riesgos y medidas de mitigación¹⁰

Riesgo	Impacto	Indicador	Medida de mitigación
Interrupción del reabastecimiento de combustible	Pérdida de comunicaciones/ISR	Capacidad de la estación de energía portátil <30 % sin combustible para el generador	Aumentar la energía solar, acortar los intervalos de recarga y dar prioridad únicamente a las cargas críticas
Detección acústica/IR del generador	Localización	Detección por UAV o térmica; riesgo de contraataque de artillería	Utilizar baterías como reserva; camuflar o reubicar el generador; ponerlo en marcha únicamente en los intervalos preestablecidos
Fallo de cables o adaptadores	Se detiene la carga	Acumulación de calor, conectores sueltos	Estandarizar los conectores; llevar dos de repuesto; protectores contra tracción y etiquetas
Fallo del PPS	Pérdida del sistema de alimentación ininterrumpida (SAI)/vigilancia silenciosa	Disparo del inversor: la potencia eléctrica no aumenta	Disponer de un pequeño PPS de reserva; diversificar el almacenamiento (unidades separadas)
Problemas de calidad de la energía (ruido de radiofrecuencia [RF])	Deterioro de las comunicaciones	Pérdida intermitente de sensibilidad	Utilizar generadores de tipo inversor; bobinas de ferrita; separar físicamente la alimentación de la RF

¹⁰ Ibid.

Sección 4

Retos en la producción y el suministro de energía

A pesar de los avances en la distribución de energía y la organización de microrredes, las fuerzas ucranianas se enfrentan a retos persistentes que requieren una innovación continua. La gestión táctica de la energía en una zona de combate es dinámica, está sujeta a disputas y se ve limitada por la escasez de recursos, lo que exige soluciones creativas que combinen la disciplina militar con la improvisación técnica.

La disponibilidad de combustible sigue siendo el reto más importante. Los generadores y los sistemas de energía montados en vehículos consumen litros de gasóleo o gasolina por hora, y los convoyes de combustible son vulnerables a la artillería, los drones y la vigilancia electrónica. Las unidades deben calcular el consumo de combustible, programar el funcionamiento de los generadores e integrar energías renovables siempre que sea posible para prolongar la autonomía.

Los planificadores operativos deben reconocer que la energía táctica es dinámica, no estática. Tal y como advierte la doctrina del Ejército de los Estados Unidos: «Los planificadores operativos deben anticipar que las necesidades energéticas cambiarán con el tiempo y abordar los nuevos requisitos energéticos dentro del plan operativo.¹¹ » Esta lección tiene un fuerte eco en la práctica ucraniana. Las unidades suelen rotar las baterías, complementar los generadores con sistemas de alimentación de emergencia (PPS) y crear microrredes modulares para equilibrar la capacidad de supervivencia y la gestión de la carga. No planificar o gestionar los generadores de manera eficiente conlleva riesgos. «El funcionamiento continuo de generadores tácticos para satisfacer cargas de demanda relativamente ligeras (menos del 30 % de la potencia nominal del generador) puede provocar una condición denominada “wet stacking”»¹². En Ucrania, donde los generadores ya se ven sometidos a una gran presión por la escasez de combustible y la exposición al reconocimiento con drones rusos, evitar tales ineficiencias es tan importante para la supervivencia como para la conservación del equipo. En resumen, una planificación energética eficaz no consiste solo en generar electricidad, sino en ajustar la producción al ritmo operativo y proteger los escasos activos del uso excesivo y de los ataques enemigos. Las fuerzas ucranianas han implantado una programación híbrida, poniendo en marcha generadores de alta potencia durante los periodos de baja amenaza y recurriendo a baterías o paneles solares cuando hay amenaza, lo que reduce la dependencia del combustible y la exposición.

Depender exclusivamente de la red eléctrica nacional a nivel táctico crearía graves vulnerabilidades. «La guerra en Ucrania demuestra que los equipos de la red de transmisión eléctrica son muy vulnerables y que, si se destruyen una o varias subestaciones clave, resulta difícil evitar interrupciones en el suministro eléctrico (13). » Dado que las redes nacionales suelen estar centralizadas en «varias subestaciones principales con pocas líneas de respaldo» (14), un solo ataque de precisión puede desencadenar cortes generalizados, aislando al instante a las unidades de primera línea que dependen de conexiones fijas. En tal escenario, las formaciones tácticas pierden no solo la energía para los puestos de mando y los sensores, sino también su capacidad para recargar los sistemas móviles, desde vehículos aéreos no tripulados (UAV) hasta radios, lo que las deja ciegas y desconectadas. Reparar los nodos de la red bajo fuego enemigo expondría aún más las vulnerabilidades. «Es muy importante contar con el número adecuado de electricistas cualificados y otros especialistas preparados para actuar en situaciones bélicas extremas» (15), pero dichos especialistas deben operar cerca de las fuerzas enemigas, lo que los expone en gran medida a ataques de artillería y drones. Sin sistemas de energía móviles y autosuficientes a nivel táctico, las unidades heredan toda la fragilidad de la red eléctrica nacional, al tiempo que asumen los riesgos operativos que conlleva enviar equipos de reparación a zonas en conflicto. Los generadores, el cableado y los alternadores de los vehículos son cada vez más blanco de

¹¹ Publicación de Técnicas del Ejército (ATP) 3-34.45, *Generación y distribución de energía eléctrica*. 5 de febrero de 2024. Página 1-4.

¹² *Ibid.*, 2-2.

¹³ Rimutis, Saulius. *Lecciones de la guerra: daños en la infraestructura energética de Ucrania, resiliencia y oportunidades futuras*. Centro de Estudios de Europa del Este. 10 de mayo de 2024. Página 14. https://www.gssc.lt/wp-content/uploads/2024/05/v04_Rimutis_Ukrainos-energetikos-sektoriaus-zala_EN_A4.pdf.

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ *Ibid.*

ataques de artillería y drones rusos. Los nodos energéticos tácticos son objetivos de gran valor debido a su impacto directo en las comunicaciones, el reconocimiento y el apoyo médico. Para contrarrestar esto, las unidades ucranianas emplean nodos energéticos dispersos y móviles, a menudo reubicando los generadores a diario u ocultándolos con redes de camuflaje. Los sistemas de desconexión rápida permiten desmontar parcialmente las microrredes en cuestión de minutos, protegiendo así los activos energéticos de la destrucción.

La combinación de generadores de tipo militar con baterías civiles, paneles solares y equipos capturados plantea retos de compatibilidad, entre los que se incluyen las diferencias de tensión, los tipos de conectores y las herramientas de monitorización limitadas. Una integración inadecuada puede provocar fallos o ineficiencias en el sistema. La sobrecarga de los activos de generación de energía degrada el equipo, acorta su vida útil y puede provocar un fallo total en momentos críticos (16). Para satisfacer la elevada demanda, los ingenieros de campo desarrollan adaptadores a medida, mazos de cables modulares y estabilizadores de tensión con el fin de crear sistemas híbridos funcionales. Los esquemas de las microrredes suelen estar estandarizados a nivel de compañía para simplificar la formación y el funcionamiento bajo fuego enemigo.

Las bajas temperaturas, el barro, la nieve y el terreno irregular pueden afectar al funcionamiento de los generadores, al rendimiento de las baterías y a la eficiencia de los paneles solares. Las unidades tácticas deben tener en cuenta estos factores ambientales a la hora de planificar la distribución de energía. Para mantener una eficiencia adecuada, los generadores suelen elevarse o aislarse para evitar inundaciones, mientras que los paquetes de baterías se aíslan o se rotan para mantener las temperaturas de funcionamiento. Los paneles solares se instalan en plataformas inclinadas o portátiles para optimizar la captación de energía a pesar de la luz solar variable.

Mantener el conocimiento de la situación de los activos energéticos en operaciones móviles y dispersas resulta difícil sin una supervisión en tiempo real. El seguimiento manual requiere mucha mano de obra y es propenso a errores. Las fuerzas ucranianas recurren cada vez más a dispositivos de supervisión digital, medidores de carga portátiles y aplicaciones de gestión de baterías para realizar un seguimiento del consumo, priorizar las cargas y predecir los cortes de suministro. Estas herramientas permiten a las unidades pequeñas tomar decisiones tácticas sobre la energía de forma rápida y precisa.

El campo de batalla ucraniano demuestra que la gestión táctica de la energía tiene tanto que ver con el ingenio como con el equipamiento. Al combinar fuentes de energía híbridas, el diseño de microrredes modulares, la movilidad y la monitorización digital, las unidades mitigan las limitaciones de combustible y logística, contrarrestan los ataques del enemigo y mantienen la continuidad operativa en entornos de alto riesgo. Estas innovaciones ponen de relieve un cambio en la guerra moderna. La energía ya no es un bien pasivo, sino un activo táctico que requiere gestión activa, adaptabilidad y creatividad técnica.

¹⁶ Publicación de Técnicas del Ejército (ATP) 3-34.45, *Generación y distribución de energía eléctrica*. 5 de febrero de 2024.

Sección 5

Lecciones aprendidas en la gestión táctica de la energía

En la guerra moderna, producir energía es solo la mitad del reto; la distribución y gestión eficientes de la electricidad a nivel táctico son igualmente críticas. Las fuerzas ucranianas han demostrado que incluso los generadores o baterías más avanzados resultan ineficaces si la energía no puede canalizarse hacia donde se necesita, cuando se necesita y sin exponer a la unidad a riesgos innecesarios. La gestión táctica de la energía es, por lo tanto, una tarea operativa continua, integrada en la planificación de la misión, el movimiento de la unidad y la mitigación de riesgos.

La unidad táctica moderna es, en la práctica, un ecosistema energético en miniatura, en el que cada kilovatio-hora se asigna a sistemas específicos en función de la prioridad, la fase de la misión y el nivel de amenaza. A diferencia de la logística tradicional de la retaguardia, la gestión táctica de la energía requiere un conocimiento constante de la situación, ya que un solo fallo —ya sea por escasez de combustible, daños en los cables o un mal funcionamiento del generador— puede degradar inmediatamente las comunicaciones, la vigilancia o el apoyo médico.

En el núcleo de este sistema se encuentra el concepto de las microrredes tácticas. Se trata de pequeñas redes eléctricas autónomas que integran generadores, baterías, alternadores montados en vehículos y paneles solares. El diseño de las microrredes suele ser modular, lo que permite a las unidades desconectar, reubicar o reconfigurar segmentos rápidamente sin interrumpir las operaciones vitales. Dentro de una microrred, la energía se segmenta por prioridad; las cargas críticas (comunicaciones, enlaces de vehículos aéreos no tripulados [UAV], radares, equipos médicos) se separan de las cargas secundarias o discrecionales (iluminación, calefacción auxiliar o recarga de dispositivos personales). Esta priorización es dinámica; durante ataques activos de artillería o con drones, las unidades pueden desconectar dispositivos no esenciales para preservar la energía de las baterías y los generadores para las funciones críticas de la misión. En la práctica, es necesario supervisar el consumo de corriente, los niveles de combustible y el estado de las baterías para tomar decisiones en fracciones de segundo que afectan a la capacidad de supervivencia de la unidad.

El equilibrio de carga es otro principio esencial. Los generadores y los sistemas de baterías se alternan en su funcionamiento para evitar sobrecargar ninguna fuente concreta. Por ejemplo, dos generadores pequeños pueden alternar su funcionamiento cada pocas horas para prolongar su vida útil, reducir las huellas térmicas y ahorrar combustible. Esto es especialmente importante en Ucrania, donde las unidades pequeñas y dispersas se enfrentan a un riesgo constante por parte de la artillería enemiga y la vigilancia con drones; mantener los activos energéticos ocultos y en funcionamiento intermitente puede marcar la diferencia entre la continuidad operativa y una interrupción catastrófica.

La gestión de cables y conductos es otra consideración táctica. Las líneas eléctricas largas son vulnerables a los daños físicos y a la detección por parte de las fuerzas enemigas. Las unidades ucranianas suelen camuflar el trazado de los cables, utilizan conductos blindados o enterrados para las alimentaciones de alto valor y emplean conexiones cortas y modulares para mantener la flexibilidad. Los sistemas de desconexión rápida permiten que los nodos energéticos, como las estaciones móviles de recarga de drones o los hospitales de campaña temporales, se puedan reubicar bajo fuego enemigo con un tiempo de inactividad mínimo.

La gestión táctica de la energía también hace hincapié en la movilidad y la redundancia. Las unidades cambian de posición con frecuencia bajo fuego enemigo, lo que requiere generadores portátiles, baterías y sistemas de alimentación montados en vehículos que puedan reubicarse rápidamente. Distribuir los recursos energéticos entre ubicaciones dispersas reduce el riesgo de pérdida total del sistema si se ataca un nodo. La redundancia es fundamental; la pérdida de un solo generador o de una reserva de baterías no debe detener las operaciones. Una vez agotada la energía de la batería, debe recuperarse, recargarse y volver a distribuirse a través del sistema de distribución. Al imitar este modelo de «push-pull», la energía se convierte en un bien gestionado que se supervisa, se prevé y se reabastece con el mismo rigor que cualquier otra clase de suministro crítico.¹⁷

¹⁷ Ibid., pág. 1-5.

La experiencia ucraniana demuestra que una gestión eficaz de la energía en el campo de batalla requiere redundancia, establecimiento de prioridades y movilidad. Los comandantes tácticos deben tratar la electricidad como un consumible: deben de planificar la distribución, supervisar el uso y reasignar dinámicamente los recursos bajo presión. La integración de generadores, vehículos, baterías y activos renovables en microrredes permite a las unidades mantener un funcionamiento continuo, la capacidad de supervivencia y la eficacia de la misión, incluso bajo fuego enemigo y con limitaciones logísticas.

Además, según las «Mejores prácticas para la puesta en marcha de la energía en el campo de batalla: almacenamiento y distribución en LSCO»¹⁸ y a los experimentos llevados a cabo durante la rotación de 2024 del Centro Conjunto de Preparación Multinacional del Pacífico (JPMRC) por varias unidades y subunidades que utilizaron módulos de almacenamiento de energía (ESM), sistemas inversores y paneles solares, este concepto de apoyo eléctrico demostró que—

- Los equipos operaron entre 56 y 96 horas utilizando un único ESM y un módulo de distribución de energía (PDM), sin depender de generadores ni vehículos.¹⁹
- Las radios, los drones y los equipos electrónicos esenciales para la misión situados en lugares remotos funcionaron a pleno rendimiento.
- Se mantuvieron bajos niveles de emisión térmica y acústica.
- No hubo desplazamientos innecesarios para repostar combustible.
- Se redujo el consumo de combustible y la exposición térmica y acústica programando el funcionamiento de los generadores, al tiempo que se aumentó la eficiencia al operar más cerca de la capacidad de carga óptima.
- Gracias a su modularidad y a su arquitectura «*plug-and-play*», el uso de los ESM resultó fácil de implementar sin necesidad de instrucciones ni formación específicas.
- Se redujo la dependencia de las subunidades respecto al reabastecimiento constante de combustible.

Lecciones tácticas clave

- **Ampliar la doctrina más allá del combustible.** Considerar la electricidad como una categoría paralela de suministro.
- **La redundancia es esencial.** Contar con múltiples fuentes independientes garantiza la continuidad de las operaciones, incluso bajo ataque.
- **Establecer prioridades salva vidas.** Deben identificarse las cargas críticas y preservarlas en todo momento.
- **La movilidad es importante.** Los activos energéticos deben ser portátiles y poder desplegarse bajo fuego enemigo.
- **Los sistemas híbridos mejoran la resiliencia.** La combinación de generadores, vehículos, baterías y fuentes renovables permite a las unidades adaptarse a la escasez de combustible, a las limitaciones medioambientales y a la acción enemiga.
- **La disciplina de la energía silenciosa protege los activos.** Los horarios de rotación, los planes de recarga, los registros de energía en el ritmo de combate y el camuflaje reducen los riesgos de detección del uso de generadores.
- **La supervisión continua es imprescindible.** La gestión táctica de la energía es una tarea activa y continua, no una configuración puntual.

¹⁸ Mayor Sean McLachlan. *Mejores prácticas para la puesta en marcha de la energía en el campo de batalla: generación, almacenamiento y distribución de energía en el LSCO*. Centro de Lecciones Aprendidas del Ejército. N.º 25-1085. Agosto de 2025. Páginas 3 a 5.

¹⁹ *Ibíd.* Página 3.

Sección 6

Conclusión

La guerra de Ucrania demuestra que la energía no es solo un insumo logístico, sino un multiplicador de combate. Entre las recomendaciones para los planificadores militares se incluyen:

- Integrar la planificación energética en las órdenes de operación (OPORD) a nivel de batallón y brigada.
- Formar a los soldados en la gestión energética sobre el terreno, no solo en la manipulación de combustible.
- Ampliar el papel de las energías renovables y los sistemas híbridos en la doctrina táctica para reducir la dependencia de los convoyes de combustible.
- Considerar la gestión de la huella de las fuentes de energía como parte de las medidas de supervivencia.
- Desarrollar microrredes modulares para el campo de batalla que permitan un despliegue rápido.

A nivel táctico, la electricidad es el sustento invisible que mantiene el combate moderno. La experiencia ucraniana demuestra que la resiliencia, la improvisación y la redundancia en la generación de energía son tan decisivas como las armas y la munición. Las unidades tácticas que no logran asegurar su suministro energético corren el riesgo de sufrir una parálisis en las comunicaciones, el conocimiento de la situación y la eficacia en el combate.

Anexo A
Recomendaciones paso a paso para el suministro eléctrico en el campo de batalla

1) Evaluación y planificación (base)

Prioridad: Inmediata

- Realizar una auditoría exhaustiva de los activos energéticos tácticos actuales (generadores, alternadores de vehículos, baterías y paneles solares portátiles).
- Elaborar un mapa de las demandas energéticas para operaciones típicas a nivel de compañía y pelotón, incluyendo comunicaciones, vehículos aéreos no tripulados (UAV), radares, apoyo médico y sistemas de guerra electrónica (EW).
- Identificar las cargas críticas frente a las secundarias para definir protocolos de priorización en condiciones de combate.

2) Estandarización de la arquitectura de microrredes.

Prioridad: alta

- Desarrollar esquemas de microrredes modulares para unidades a nivel de pelotón y de compañía, integrando generadores, vehículos, baterías y fuentes renovables.
- Estandarizar los conectores, los niveles de tensión y los sistemas de desconexión rápida para simplificar la integración de diversas fuentes de energía.
- Formar al personal de ingeniería y logística en el despliegue y la reubicación rápidos de microrredes bajo fuego enemigo.

3) Adquisición y modernización de activos energéticos.

Prioridad: media-alta

- Adquirir generadores portátiles y duraderos (1-5 kilovatios [kW]) adecuados para el despliegue táctico.
- Ampliar el inventario de baterías, incluyendo unidades de iones de litio de alta densidad para UAV, radios y equipos ópticos.
- Introducir fuentes de energía híbridas (por ejemplo, paneles solares plegables, sistemas de recarga de vehículos a la red y unidades modulares de almacenamiento de energía).

4) Protocolos de movilidad y redundancia:

Prioridad: media

- Elaborar procedimientos operativos estándar (SOP) para la dispersión, el camuflaje y la movilidad de los generadores y los depósitos de baterías.
- Formar a las unidades para que reubiquen rápidamente los nodos de energía, minimizando la vulnerabilidad ante la artillería, los drones o el sabotaje.
- Introducir vías de alimentación redundantes para que la pérdida de un solo generador o paquete de baterías no paralice las operaciones.

5) Prioridad de la priorización táctica y la gestión de la carga. Media

- Revisar las directrices de priorización de la carga para distinguir entre sistemas críticos y secundarios.
- Implementar protocolos dinámicos de equilibrio de carga, especialmente durante operaciones de alto riesgo.
- Equipar a las unidades con medidores de carga y dispositivos de monitorización para realizar un seguimiento del consumo en tiempo real.

6) Formación e integración de la doctrina.

Prioridad: alta

- Incluir la gestión táctica de la energía en los ejercicios de formación estándar, los juegos de guerra y las maniobras sobre el terreno.
- Elaborar manuales digitales e impresos sobre el despliegue de microrredes, la priorización y la integración de sistemas híbridos.
- Formar a los oficiales y suboficiales para que tomen decisiones de asignación de energía en fracciones de segundo en condiciones de combate.

7) Prioridad de innovación y adaptación sobre el terreno: media

- Fomentar las innovaciones de ingeniería sobre el terreno, como adaptadores a medida para baterías civiles, la integración de energía solar o el uso de equipos capturados.
- Llevar a cabo ejercicios basados en las lecciones aprendidas para adaptar los procedimientos en función de los retos del mundo real y las condiciones ambientales.
- Explorar aplicaciones de monitorización digital o dispositivos sencillos del Internet de las cosas (IoT) para la conciencia situacional a nivel de unidad.

Anexo B

Casos prácticos de Ucrania

Viñeta A

«Centro de recarga» del equipo de pequeños vehículos aéreos no tripulados a nivel de compañía

Situación. Una célula de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) de una compañía que presta apoyo diario a unidades de vista en primera persona (FPV) y cuadricópteros necesita una recarga continua de las baterías a pesar de los desplazamientos y los ataques.

Configuración. Dos estaciones de energía portátiles (PPS) de 2 a 5 kilovatios-hora (kWh) actúan como reservas; un generador inversor silencioso de 3 kilovatios (kW) funciona dos veces al día durante 60-90 minutos para realizar una carga masiva; unos paneles solares plegables de 200-300 vatios (W) aportan una carga de mantenimiento cuando hace buen tiempo. Las placas de carga y las cajas ignífugas estandarizan los flujos de trabajo. El equipo programa las oleadas de carga en función de las ventanas de vuelo y mantiene una PPS de reserva dedicada a las radios y a Starlink como fuente de alimentación ininterrumpida (SAI) siempre activa.

Por qué es importante. El almacenamiento en el PPS permite períodos de silencio y reduce la firma acústica e infrarroja (IR), al tiempo que mantiene un alto rendimiento de las baterías (entre 15 y 30 paquetes al día). El generador funciona a una carga óptima, lo que mejora la eficiencia del combustible y la fiabilidad.

Implicaciones para la OTAN: Institucionalizar un kit de centro de recarga de UAV a nivel de compañía (almacenamiento ≥ 5 kWh, generador de 3-5 kW, kit de seguridad y conectores estandarizados) y practicar las «oleadas de recarga» durante los ejercicios de entrenamiento.

Viñeta B

Supervivencia y programación de Starlink

Situación. Los puestos de mando (CP) de compañía y batallón dependen de las comunicaciones por satélite (SATCOM) como respaldo para el mando y control (C2) y los datos de ISR, ante la falta de fiabilidad de los enlaces terrestres.

Configuración. Los terminales se conectan al sistema de alimentación de potencia (PPS) (no directamente a los generadores) para evitar caídas de tensión y ruido de radiofrecuencia (RF). Las unidades establecen ventanas de comunicación (por ejemplo, sincronización por la mañana o por la tarde), y los terminales permanecen en modo de suspensión el resto del tiempo. Los alternadores de los vehículos recargan el PPS durante los desplazamientos; los talleres reparan los terminales dañados; se dispone de kits de repuesto preaprovisionados.

Por qué es importante. La programación reduce el consumo diario y la huella, al tiempo que preserva el ancho de banda para el tráfico prioritario. El PPS, a modo de SAI, reduce los fallos del equipo y la corrupción de datos durante los arranques y paradas.

Implicaciones para la OTAN. Publicar procedimientos operativos estándar (SOP) de energía para SATCOM (alimentación prioritaria del PPS, ventanas programadas y circuitos protegidos) y mantener un pequeño stock de repuestos preconfigurados a nivel de batallón.

Viñeta C

Puesto de socorro del batallón como microrred

Situación. Los puntos de estabilización deben funcionar durante los cortes de la red eléctrica, con energía limpia para monitores, sistemas de succión y la cadena de frío (solo para uso médico).

Configuración. Almacenamiento de 10-15 kWh conectado a un generador con inversor de 5-7 kW, SAI de grado médico para dispositivos críticos, circuitos etiquetados (críticos, prioritarios o de confort), filtros de combustible y separadores de agua, e iluminación de trabajo y linternas frontales con diodos emisores de luz (LED).

Por qué es importante. El puesto de socorro del batallón (BAS) supera los cortes de generador y los traslados sin perder la atención crítica. Una disciplina clara en los circuitos evita que las cargas no esenciales colapsen el sistema.

Implicaciones para la OTAN: Estandarizar un paquete de alimentación de función 1/función 2 (almacenamiento + generador + SAI + filtración + etiquetado) e incluir simulacros energéticos en los ejercicios de validación médica.

Viñeta D

Sistema de suministro de energía (PPS) de origen voluntario para subsanar las carencias de las unidades

Situación. Los pelotones de primera línea necesitan energía inmediata para radios, dispositivos ópticos, UAV y SATCOM, pero los ciclos de adquisición se retrasan.

Configuración. Las organizaciones no gubernamentales (ONGs) suministran sistemas de alimentación de emergencia (PPS) comerciales (de 2 a 5 kWh) y pequeños generadores; las unidades los integran en los diseños de los puestos de mando (CP) con cables USB-C PD y SB50/Anderson; la energía solar se utiliza de forma oportunista.

Por qué fue importante. Su rápida puesta en servicio cubrió carencias urgentes y creó un estándar de facto para los conectores y los flujos de trabajo.

Implicaciones para la OTAN. Convertir las soluciones ad hoc en programas oficiales. Suministrar sistemas PPS y kits de distribución como equipamiento básico y establecer normas obligatorias para los conectores en todas las formaciones.

Viñeta E

Generación de baja firma para equipos de reconocimiento

Situación. Los equipos de reconocimiento y de UAV necesitan energía cerca de la línea de combate sin llamar la atención.

Configuración. Pruebas con generadores de pilas de combustible de bajo calor y bajo ruido para cargar las baterías de los dispositivos ópticos y los UAV, y alimentar los sistemas de comunicaciones por satélite (SATCOM) en pequeños puestos avanzados. Los cartuchos se almacenan en los trenes de la compañía; el PPS proporciona la reserva para los periodos de silencio.

Por qué es importante. Reducción de la firma acústica e infrarroja y menor número de convoyes de reabastecimiento en zonas expuestas; mejora del tiempo de funcionamiento de los sensores.

Implicaciones para la OTAN. Ampliar la experimentación con pilas de combustible y la generación de energía para vehículos, pero basar las tácticas, técnicas y procedimientos (TTP) en la generación programada y respaldada por baterías.

Viñeta F

Estaciones de recarga de campo de fabricación ucraniana

Situación. Los puestos de mando de compañía necesitan un sistema de recarga consolidado y resistente con aportaciones de energía solar.

Configuración. Unidades PPS resistentes (aproximadamente entre 1,5 y 3,0 kWh) capaces de cargar varios dispositivos a la vez, que admiten alimentación solar y resisten las condiciones de campo; integradas en los planes energéticos de CP como módulos independientes.

Por qué es importante. Cableado simplificado y menor número de fallos en los adaptadores; rápido despliegue tras los traslados.

Implicaciones para la OTAN. Dar prioridad a los PPS robustos y modulares y hacer cumplir la disciplina en el uso de conectores; tratar los PPS como «baterías» intercambiables a nivel de la compañía.

Anexo C

Suministro y gestión de energía en la arquitectura ZVOOK de reconocimiento acústico (SENSORES ACÚSTICOS PASIVOS). Diseño de la alimentación de los nodos

Los nodos Zvook son deliberadamente de bajo coste y bajo consumo (se estima que rondan los 500 dólares por nodo), lo que permite a Ucrania desplegar miles de ellos en unos 20 000 km². Cada paquete de sensores suele constar de:

- Matrices de micrófonos + «espejos» acústicos para amplificar el ruido lejano de drones o misiles.
- Un microordenador con IA integrada (por ejemplo, una Raspberry Pi o un ordenador de placa única [SBC] similar y resistente) para ejecutar algoritmos de filtrado de sonido.
- Módulo de comunicaciones para transmitir las detecciones al sistema de conocimiento de la situación Delta en unos 12 segundos.

Cada unidad consume solo unos pocos vatios, lo que significa que puede funcionar entre 24 y 72 horas con una batería de litio de capacidad modesta o una estación de energía portátil. Este consumo ultrabajo hace viable su despliegue a gran escala.

Rotación y recarga de baterías

Los operadores de Zvook siguen un ciclo riguroso para mantener la red en funcionamiento:

- Se alternan entre 2 y 3 baterías por nodo. Mientras una está en funcionamiento, otra se está cargando en un puesto avanzado cercano y una tercera se mantiene como reserva.
- Las estaciones de energía portátiles (*EcoFlow* o equivalentes de fabricación ucraniana) actúan como reserva, permitiendo el modo de «vigilancia silenciosa» para que el nodo pueda funcionar sin ningún generador cercano.
- La recarga se programa en intervalos (por ejemplo, una o dos veces al día), en los que pequeños generadores con inversor recargan a gran escala las unidades de estaciones de energía portátiles (PPS). Esto minimiza las señales acústicas e infrarrojas, ya que los generadores son ruidosos y visibles para los drones rusos.
- Para despliegues estáticos prolongados, se conecta a los nodos un sistema de carga solar lenta. Incluso un panel de 100 vatios (W) puede prolongar el tiempo de funcionamiento entre 12 y 24 horas, aunque no puede sustituir por completo a la carga con generador en invierno.

Gestión de fallos y continuidad

- Si la batería de un nodo Zvook se agota, el nodo se desconecta al instante, creando un punto ciego en la red acústica. En Delta, esto aparece como un «nodo muerto», y los operadores no pueden realizar triangulaciones desde esa ubicación hasta que se restablezca la alimentación.
- Si fallan varios nodos de un clúster, la precisión de la detección se reduce drásticamente, ya que la triangulación depende de múltiples sensores que se solapan.
- Para evitar interrupciones, los equipos de Zvook mantienen reservas de redundancia. Cada clúster de nodos cuenta con más del mínimo necesario para la triangulación, por lo que, aunque uno o dos nodos dejen de funcionar, la red sigue operando.
- Los operadores suelen sustituir en caliente las unidades PPS en lugar de las baterías individuales, por lo que el tiempo de inactividad se reduce a unos minutos.

Integración con el filtrado mediante IA

La alimentación eléctrica también es fundamental para el funcionamiento del filtrado de sonido mediante IA de *Zvook*, que descarta el ruido civil o ambiental irrelevante. Cuando se producen caídas de tensión o se alimenta directamente a un nodo con la salida inestable de un generador, los procesadores de IA pueden generar falsas alarmas o no clasificar correctamente. Para evitarlo, los nodos de *Zvook* funcionan con la «energía limpia» del PPS, y los generadores recargan el PPS en lugar de alimentar directamente al nodo.

Implicaciones operativas

La gestión energética de *Zvook* transforma un sensor frágil en una red acústica resistente:

- Los nodos pueden permanecer desplegados durante días o semanas gracias al cambio de baterías y a ráfagas ocasionales de energía del generador.
- El sistema mantiene una tasa de falsos positivos de tan solo el 1,6 %, en parte porque la estabilidad de la alimentación permite que los algoritmos de IA funcionen de forma constante.
- Al garantizar que las redes acústicas nunca se apaguen por completo, Ucrania obtiene una alerta temprana persistente contra drones y misiles, incluso en sectores donde la cobertura de radar es escasa.

En efecto, *Zvook* no es solo un sistema de vigilancia acústica; es una microrred distribuida de sensores de IA económicos y de bajo consumo, que se mantiene activa gracias a una rotación disciplinada de las baterías, un almacenamiento de energía silencioso y una programación de los generadores. Sin este modelo de gestión energética, el área de cobertura (20 000 km² y en expansión) se desmoronaría en zonas poco fiables; pero con él, *Zvook* ofrece una alerta temprana fiable y rentable a gran escala.

ARQUITECTURA DE SKY FORTRESS

Diseño minimalista y pasivo de los sensores

Los sensores de *Sky Fortress* se basan en una simplicidad extrema:

- Cada nodo consta de un micrófono y un teléfono móvil (inicialmente basado en Android), montados en un poste de seis pies, a menudo ocultos entre praderas o instalados en estructuras ya existentes.
- El teléfono cumple dos funciones: alimentar el micrófono y captar el sonido ambiental, así como enviar los datos acústicos al sistema de mando central Virazh.

Fuentes de alimentación: batería y energía solar

- El sistema se alimenta generalmente mediante las baterías internas del teléfono móvil o mediante paquetes de baterías acoplables independientes.
- En algunas zonas de despliegue, se añaden paneles solares para una recarga pasiva de mantenimiento, suficiente para prolongar el tiempo de funcionamiento y reducir la necesidad de recargas manuales de las baterías.
- En zonas semiurbanas o a lo largo de corredores de infraestructura, los nodos pueden conectarse a la red eléctrica nacional, lo que reduce la necesidad de cambiar las baterías.
- El diseño evita deliberadamente soluciones más complejas o de alta potencia para que cada nodo sea ligero, económico y silencioso.

Escala y alcance operativo

- *Sky Fortress*, una amplia red centrada en la detección de amenazas a baja altitud, como los drones Shahed, consta de entre 9.500 y 10.000 sensores desplegados por toda Ucrania.
- Los datos de cada sensor —eventos de detección acústica— se transmiten al sistema C2 (Virazh), donde se lleva a cabo el seguimiento de amenazas y la emisión de alertas en tiempo real.

COMPARACIÓN DE SISTEMAS

Modelo de alimentación

- *Sky Fortress* está diseñado para ofrecer una simplicidad extrema; cada nodo es simplemente un micrófono y un smartphone. La alimentación proviene de la batería interna del teléfono o de pequeños paquetes externos, a lo que a veces se añade una carga solar de mantenimiento. Es un sistema de consumo ultrabajo, silencioso y que requiere poco mantenimiento, pero la autonomía por carga es limitada, por lo que las baterías deben cambiarse o recargarse con frecuencia.
- *Zvook*, por el contrario, utiliza nodos que consumen algo más de energía (micrófonos, espejos acústicos, procesadores de IA y radios). Para mantenerse conectados, los nodos dependen del PPS, respaldado por generadores que se ponen en marcha de forma programada y, en ocasiones, por energía solar. El sistema es más exigente, pero también más resistente; el almacenamiento del PPS permite tiempos de funcionamiento más largos y una electricidad «limpia» y estable para la IA.

Rotación y reabastecimiento de baterías

- *Sky Fortress* depende de una rotación constante de baterías. Dado que cada unidad es, en esencia, un teléfono, su autonomía es corta (a menudo, menos de 24 horas de funcionamiento continuo). Los operadores deben visitar los nodos con frecuencia o recurrir a la energía solar, que depende de las condiciones meteorológicas. En la práctica, esto hace que *Sky Fortress* requiera mucha mano de obra, aunque el coste por nodo sea bajo.
- *Zvook* está diseñado para ciclos operativos más largos. Con dos o tres paquetes de baterías por nodo y el PPS integrado, los nodos pueden permanecer desplegados entre 48 y 72 horas antes de un cambio. Las recargas mediante generador permiten a los equipos de logística planificar rotaciones en bloque, en lugar de tener que perseguir a diario las baterías que se están agotando.

Escalabilidad y cobertura

- *Sky Fortress* destaca por su escala. Con unos 10 000 sensores, forma una gigantesca red en malla de bajo consumo que abarca gran parte de Ucrania. Incluso si los nodos se desconectan debido a la pérdida de batería, la red cuenta con redundancia gracias a su gran densidad. Su punto débil es la fiabilidad a nivel de cada nodo individual.
- *Zvook* antepone la calidad a la cantidad. Con menos nodos (una cobertura de unos 20 000 km² y aproximadamente el 5 % del territorio), cada unidad se mantiene activa durante más tiempo, gracias a una mejor gestión de la energía. Su fiabilidad por nodo es mayor, pero no puede igualar a *Sky Fortress* en cuanto a cobertura total.

Resiliencia y disciplina energética

- *Sky Fortress* apuesta por una ubicuidad económica. Aunque muchos nodos dejen de funcionar, quedan suficientes para proporcionar cobertura. Sin embargo, su sistema energético es frágil: cuenta con una vida útil corta de las baterías, una elevada carga de trabajo humano y, en algunos casos, depende de la energía solar.

Zvook apuesta por una gestión energética disciplinada. Los acumuladores PPS, la sustitución en caliente y los horarios de los generadores minimizan el tiempo de inactividad. Aunque es más complejo desde el punto de vista logístico, ofrece un funcionamiento más estable, limpio y duradero.



CENTRO DE EXPERIENCIAS ADQUIRIDAS DEL EJÉRCITO

10 Meade Avenue, Edificio 50
Fort Leavenworth, KS 66027-1350



N.º 26-1116
Marzo de 2026

Aprobado para su divulgación pública.
Distribución ilimitada