



Received: 03/10/2021
Accepted: 14/10/2021

Anales de Edificación
Vol. 8, Nº2, 31-36 (2022)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2022.5040

Zeroenergymod: módulos móviles habitables de energía cero en Europa

Zeroenergymod: zero energy habitable mobile modules in europe

Roberto Higuero Artigas^a, Beatriz Rodríguez Soria^b, Carlos Navarro Gutierrez^a, Javier Garú Royo^a

^aB+Haus Arquitectura Eficiente S.L

^bCentro Universitario de la Defensa

Resumen— El proyecto “ZERO ENERGY MOD”, financiado por el programa europeo LIFE, contempla el diseño y construcción de un espacio habitable de fácil instalación y transporte, basado en el estándar PassivHaus que incorpora fuentes de energía renovable. Inicialmente proyectado para la construcción de bases militares autosuficientes, será además útil en la construcción de soluciones logísticas diseñadas a medida para todo tipo de organizaciones: civiles en misiones de paz, desarrollo y cooperación internacional, así como empresas públicas y privadas que precisen desarrollar su actividad en áreas remotas y/o condiciones climáticas extremas. Hoy las soluciones habitables de los campamentos militares son altamente dependientes de los combustibles fósiles. El proyecto ZEROENERGYMOD pretende conseguir un impacto nulo en emisiones gracias al almacenamiento de energía mediante hidrógeno (H₂) y producción de energía fotovoltaica y eólica. El proyecto está financiado en un 55% por los fondos LIFE, el resto es aportado por las empresas participantes. La inversión en investigación alcanza el millón de euros.

Palabras clave— Passivhaus; producción H₂; energía renovable; módulos militares.

Abstract— The “ZERO ENERGY MOD” project, funded by the European LIFE programme, involves the design and construction of an easy-to-install and easy-to-transport living space, based on the PassivHaus standard and incorporating renewable energy sources. Initially designed for the construction of self-sufficient military bases, it will also be useful in the construction of custom-designed logistical solutions for all types of organisations: civilians in peace, development and international cooperation missions, as well as public and private companies that need to develop their activity in remote areas and/or extreme climatic conditions. Today, habitable solutions for military camps are highly dependent on fossil fuels. The ZEROENERGYMOD project aims to achieve zero-emission impact through hydrogen (H₂) energy storage and photovoltaic and wind energy production. The project is 55% financed by LIFE funds, the rest is contributed by the participating companies. The investment in research amounts to one million euros.

Index Terms— PassivHaus; H₂ production; Renewable energy; Military module.

I. INTRODUCCIÓN

ANALIZANDO las misiones asignadas al Ejército de Tierra de España, tanto en el extranjero como en grandes maniobras en territorio nacional, precisan de Bases militares construidas principalmente con contenedores de 20 pies (Palés, 2014). En la actualidad la generación de energía para estas Bases militares depende casi exclusivamente del uso de grupos electrógenos diésel dada la inexistencia o escasa fiabilidad de las redes eléctricas locales (Min. Defensa, 2011). Para su abastecimiento con gasoil precisan de una enorme cadena logística, dificultada a menudo por la continua acción de combatientes y por la precaria infraestructura de transporte de

los países donde se despliegan las tropas (Min. Defensa, 2018). La reducción de la logística de estos convoyes evitaría pérdidas tanto humanas como materiales. En concreto en Afganistán se observó una correlación directa entre el combustible consumido en las Bases militares y el número de bajas debido a los ataques a las cadenas de suministro (Prado et al., 2018).

En 2012, las operaciones de mantenimiento de la paz de la ONU representaban el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero de todas sus actividades. El problema del consumo de combustible y de la seguridad del suministro ha afectado particularmente a la misión “International Security Assistance Force” (ISAF) en Afganistán, la más grande llevada a cabo por la NATO en toda su historia, donde se consumieron más de 6,8

millones de litros de combustible al día, el 99% de los cuales fueron transportados en camión desde el extranjero a través de un enlace ferroviario de más de 5.000 km (Samaras et al., 2019). En el marco de esta misión se estima que en la BAE española Ruy González de Clavijo se necesitaban una media de 30.000 litros diarios de combustible y eran necesarios 52 grupos electrógenos para abastecer los 730 contenedores de 20 pies que había instalados. Por otra parte, se estimó que estos consumos se repartían en un 20% en iluminación y en un 80% en calefacción y aire acondicionado (Palés, 2014). Cada uno de estos contenedores representa un consumo anual de combustible de 15.000 litros, cuya principal fuente de gasto es la climatización, con un total de 12.000 litros/año por contenedor. Estos datos dan como resultado un consumo de 10,95 millones de litros de combustible al año únicamente para el funcionamiento de los contenedores. En estudios realizados por los autores del artículo a través de una estancia de investigación en la Base Miguel de Cervantes en el Líbano, se comprobó que el consumo de combustible de los contenedores de vida ofrecía resultados similares (Min. Defensa, 2018).

Detectada esta problemática en 2011 el Comité Militar de la NATO aprobó el documento MC-469: “Principios y política militar NATO para la Protección Ambiental”, que establece las políticas y responsabilidades en el terreno de la protección medioambiental de los mandos NATO y mandos nacionales que cooperen en las actividades militares de la Alianza (NATO, 2011). A partir de la Cumbre de la NATO de Chicago de 2012, en la que los aliados acordaron mejorar la eficiencia energética de las fuerzas militares (Hidalgo García, 2012), la política medioambiental y de eficiencia energética coge fuerza y desde entonces, tanto en la Cumbre de Gales de 2014 (NATO, 2014) como en la Cumbre de Varsovia de 2016 (NATO, 2016) se dan pasos en esa dirección. En la Cumbre de Bruselas de 2018, se afirma que la seguridad energética juega un papel importante en la seguridad común de la NATO, dando como resultado el desarrollo de varios procedimientos comunes a los ejércitos de los países aliados (NATO Standardization Agreement – STANAG) relacionados con la protección medioambiental y la eficiencia energética. (Allied Joint Environmental Protection Publication - AJEPP).

En la actualidad, existen varios proyectos de investigación en marcha para disminuir el consumo energético en bases ubicadas en zona de operaciones. Sin embargo, la mayoría de estos estudios no están enfocados hacia la disminución de la demanda de energía en las infraestructuras, sino hacia la mejora de las fuentes de generación de energía (Min. Defensa, 2018; Min. Defensa, 2020; NATO, 2013).

Con el proyecto de investigación que se presenta en el artículo, se ha comprobado que una construcción modular a base de contenedores de 20 pies, que cumpla con los requerimientos NATO y con los condicionantes de seguridad y transporte disponible en la Fuerzas Armadas, si se realiza bajo el estándar Passivhaus será capaz de disminuir en un 85% la demanda de energía, pudiendo así hacer posible su abastecimiento a través de energías renovables.

II. METODOLOGÍA

En base a los antecedentes presentados en el artículo se solicitó a la Comisión Europea un proyecto de investigación dentro de la convocatoria LIFE 2019: LIFE Climate Change Mitigation projects, para dar solución a la problemática de la alta dependencia de combustibles fósiles de las bases militares, así como sus altas emisiones de CO₂. El proyecto fue concedido con referencia LIFE 19 CCM/ES/001327, bajo el acrónimo ZEROENERGYMOD. Con este proyecto se están construyendo módulos habitables, desmontables y modulares en base a contenedores de 20 pies, para la construcción de bases de las Fuerzas Armadas europeas, alimentados con energías limpias mediante el almacenamiento de hidrógeno.

El prototipo consta de dos módulos que se encuentran unificados dentro una misma envolvente energética. Uno de ellos es el módulo PASSIVMOD: módulo habitable construido bajo el estándar Passivhaus y el otro es el módulo ENERMOD, que abastece al PASSIVMOD con energías limpias (fotovoltaica y minieólica) de forma estacional mediante producción y almacenamiento de hidrógeno.

El proyecto se está desarrollando a través de un consorcio de empresas formado por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza y la empresa B+Haus Arquitectura Eficiente, encargadas de los estudios de las necesidades de los módulos, y del diseño y cálculo del prototipo PASSIVMOD, en las cuales recae la propiedad industrial internacional del mismo; la empresa ARPA Construcciones Modulares encargada de su construcción y que posee derechos de explotación y la Fundación de Hidrógeno de Aragón encargada del cálculo y dimensionamiento de los elementos del ENERMOD.

El prototipo va a ser desplegado y monitorizado en climas extremos para comprobar su correcto funcionamiento a lo largo de tres años: primero en la Base San Jorge adyacente al campo de maniobras de San Gregorio (Zaragoza), clima desértico, después en la Base de Riga en Letonia en clima frío y por último quedará ubicado de forma definitiva en la Base Gabriel de Castilla en la Antártida, clima polar. Si bien de momento se está certificando el prototipo en Zaragoza con uso oficina, se ha calculado para su autosuficiencia energética tanto en Riga como en la Antártida (con uso dormitorio). Ello ha conllevado tomar medidas mucho más exigentes en cuanto a aislamiento e instalaciones, así como el uso de materiales resistentes a las condiciones climatológicas del volcán antártico (Isla Decepción) donde se va a ubicar. Dicha ubicación también ha condicionado el dimensionamiento de las piezas desmontables para poder ser trasladadas a la isla y montadas con el material disponible en la misma.

Como se ha comentado, previo a la realización de este proyecto, se han desarrollado dos proyectos de investigación más que han permitido establecer las condiciones de contorno y diseño que debían cumplir los prototipos para poder ser transportados y utilizados en entornos con condiciones de seguridad y funcionalidad tan peculiares como las bases militares en despliegues en zonas de conflicto. En dichos proyectos, con cuyas estancias de investigación se caracterizaron energéticamente dos Bases militares, se

detectaron los problemas existentes de funcionalidad, seguridad y eficiencia energética de contenedores con diferentes usos, y se realizaron entrevistas a personal de mantenimiento y oficiales. Fueron desarrollados también en climas extremos para disponer de todos los condicionantes. Un proyecto se realizó en la Base Miguel de Cervantes del Líbano, en la frontera con Israel y el otro en la Base científica Gabriel de Castilla en la Isla Decepción, en la Antártida. Se monitorizaron condiciones climatológicas exteriores, condiciones de confort interiores y consumos de energía, y se realizaron pruebas de estanqueidad al aire blower door, termografías y mediciones de transmitancia.

Las conclusiones de este trabajo de investigación con las siguientes:

- Demanda de calefacción de 283,53 kWh/m² durante el periodo de estudio de 3 meses.
- Deficiente sistema de control de los sistemas de climatización. Sistemas manuales todo-nada.
- Registro de armónicos en las redes eléctricas e interferencias en los generadores de gasoil por altos picos de consumo de los sistemas de clima.
- Altas concentraciones de CO₂ por falta de ventilación con valores por encima de los 1500ppm durante el día y picos de 2500ppm durante la noche.
- Humedades relativas entre el 18 y el 35%.
- Gradientes verticales de temperatura de 5°C.
- Gradientes de temperatura entre marcos y vidrios superiores a los 10°C, lo que presenta altos riesgos de condensación con humedades relativas dentro del rango del RITE.
- Hermeticidad al aire baja con valores n50 de 6,15 h-1.
- Transmitancias de los cerramientos de fachada y suelos de 1,30 W/(m²k).
- Deterioro del asilamiento de los módulos especialmente en las juntas de unión entre los paneles por la pérdida de la estanqueidad al aire y al agua. Para iniciar este estudio es preciso diseñar el sistema de información, que posteriormente se implanta a nivel municipal.

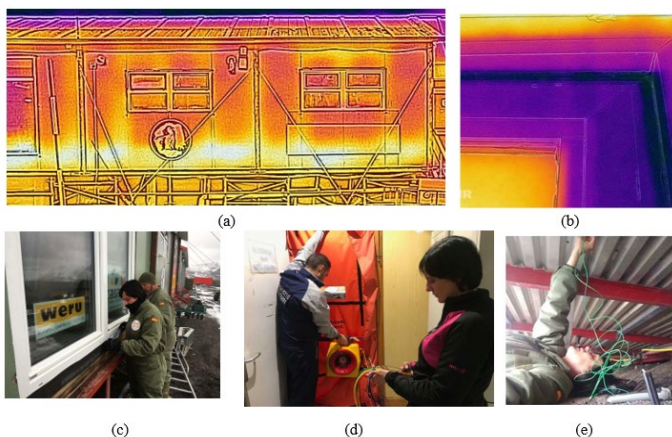


Fig. 1. Auditoría energética Módulo de vida Base Gabriel De Castilla (Antártida) (a) Termografía general exterior (b) Infiltraciones de aire en carpinterías (c) Instalación de nueva carpintería de alta eficiencia energética (d) Ensayo de hermeticidad blowerdoor (e) Medición de transmitancias de la envolvente energética.

Zeroenergymod: módulos móviles habitables de energía cero en Europa
Zeroenergymod: zero energy habitable mobile modules in Europe

Para el diseño final del prototipo se hizo un listado que recopilaba las consideraciones de todos los requerimientos detectados en los estudios anteriores, además de las indicaciones de la normativa militar y civil en el entorno europeo y NATO que rige las condiciones de construcción y eficiencia energética. Por último, se incluyeron los condicionantes de diseño para certificar el prototipo como edificación Passivhaus. Los condicionantes resultantes se dividieron en tres categorías: instalaciones y almacenamiento de energía, materiales y medidas pasivas para el diseño constructivo y demanda de energía, confort y calidad de aire. En la Fig. 2 se muestra el resumen del proceso:

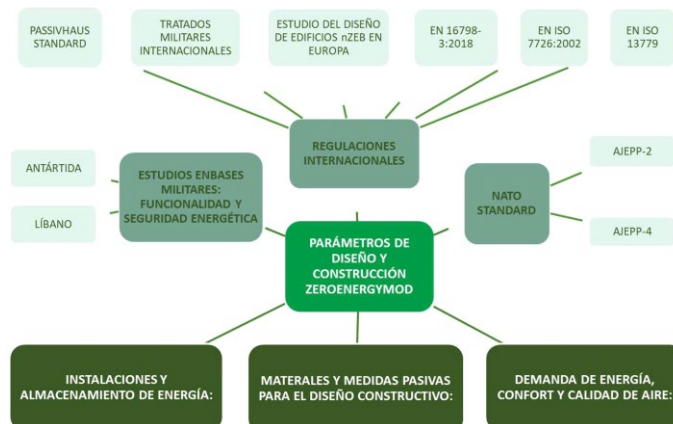


Fig. 2. Parámetros de diseño del ZEROENERGYMOD

A continuación, se enumeran los parámetros que se identificaron para diseñar el ZEROENERGYMOD:

A. Instalaciones y almacenamiento de energía:

Ventilación mecánica con recuperador de energía entálpico de alta eficiencia y bajo consumo específico de ventiladores.

- Control centralizado del sistema de ventilación y climatización.
- Eficiencia y control de la iluminación. Maximizar el uso de luz natural, y de LED.
- Sistemas de abastecimiento energético descentralizado.
- Disminuir encendidos y apagados de sistema de climatización. Preferible sistema con funcionamiento permanente en Antártida.
- Instalaciones aisladas térmicamente.
- Suministro conjunto ACS - aire acondicionado, con aerotermia de alto rendimiento.
- Uso de energía fotovoltaica.
- Instalar capacidades de almacenamiento de energía para las fuentes renovables.
- Sistema de monitorización de energía para configuración óptima de funcionamiento.
- Prevención de contaminación conservando recursos, reduciendo el uso de materiales peligrosos y minimizando la liberación de contaminantes.
- Alta eficiencia energética con técnicas disponibles y eficaz gestión de la energía.
- Puntos acceso a internet.
- Termómetro e higrómetro visible en lugar representativos.

B. Materiales y medidas pasivas:

- Alto aislamiento térmico (U aproximado de 0,15 W/m2K) y riguroso control de puentes térmicos que disminuyan demanda de energía y eviten la huella térmica.
- Estanqueidad al aire n50 < 0,6 h-1. Uniones estancas para evitar infiltraciones de aire, humedad que produce corrosión y entrada de polvo que estropea equipos.
- Paneles de cerramientos con poca dilatación térmica y materiales no porosos, resistentes a la corrosión por salinidad y humedad y a la abrasión por piroclasto.
- No utilizar madera que necesite tratamientos superficiales ni pinturas que se desprendan. Aconsejable acabado exterior de acero galvanizado o polímeros.
- Aislamientos que no se degraden frente a la humedad producida por infiltraciones.
- No usar colas o siliconas para sellados.
- Ventanas no correderas, con carpinterías y vidrios de gran calidad y espaciadores desecantes.
- Cámara técnica en pared, suelo o techo.
- Utilizar dobles puertas en climas fríos.
- Sellado acústico entre contenedores adyacentes.
- Modulable para carga máxima en traslado por tierra: 14.530 kg.
- Medidas máximas de cada módulo: 8588 * 2500*3065 mm para transporte por tierra.
- Desmontable en piezas de peso máximo 2 t.
- Contenedores de largo: 6-6.5 m, ancho 2.435-6 m, alto 2.6-2.79 m.
- Carga mínima nieve y viento: 100 kg/m2.
- Instalación de una sobrecubierta inclinada ventilada como medida de protección solar.
- Instalación de paneles de chapa microperforada en bastidores móviles para su colocación por el exterior en las ventanas en climas de alta severidad estival.

C. Demanda de energía, confort y calida de aire:

- Demanda de energía para calefacción < 15 kWh/m2año.
- Demanda de energía para refrigeración < 15 kWh/m2año.
- Consumo de energía primaria total < 120 kWh/m2año.
- Consumo de energía primaria renovable: 60 kWh/m2año para el conjunto de climatización, ACS, iluminación y electricidad general y auxiliar. En nuestro caso, el 100%



Fig. 3. Infografía del proyecto

de la energía será renovable.

- Diferencia de temperaturas superficiales interiores y temperatura del aire < 4,2 K.
- Gradiente de temperatura en zona de confort < 2 K.
- Temperatura operativa: entre 20°C y 24°C. (Passivhaus y AJEPP-2).
- Humedad relativa entre 40% y 70% (AJEPP-2).
- Contenido de CO2 < 1000 ppm en el ambiente interior.
- Patrón de uso establecido para Bases militares.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de aplicar las condiciones de diseño se ha desarrollado un diseño construido a partir de contenedores de 20 pies con estructura de chasis rígido apilable, modificado respecto a los disponibles actualmente para evitar los puentes térmicos. Se han seleccionado contenedores de clase HIGH CUBE para disponer de falso techo para el paso de instalaciones.

La cimentación consiste en una capa de aislamiento de 30 cm de espesor de poliestireno extrusionado de alta densidad y resistencia a compresión sobre el que descansa el chasis del módulo previamente confeccionado con paneles desmontables de 10 cm de lana de roca de alta densidad.

La envolvente vertical mantiene la continuidad de aislamiento con la cimentación y posee un aislamiento de base en los paneles desmontables del chasis de 10 cm de lana de alta densidad, y doble machihembrado. Por el interior se ha instalado otra capa de los mismos paneles y por el exterior se han instalado unas pieles de 30 cm de espesor de poliestireno extrusionado de alta densidad con acabado exterior en acero inoxidable. Se han integrado huecos formados mediante ventanas fijas con marcos de PVC de altas prestaciones y vidrios triples de baja emisividad con una transmisividad térmica instalada $U_w < 0,85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Por último, la cubierta cuenta con la misma solución constructiva, dotando al conjunto de continuidad completa en la línea de aislamiento estando configurada con anclajes de baja transmitancia térmica y alta resistencia mecánica para la fijación de la sobrecubierta.

La estrategia de hermeticidad se ha basado en el uso de cintas de hermeticidad por el interior sellando los encuentros entres paneles prefabricados y la estructura-chasis del contenedor.

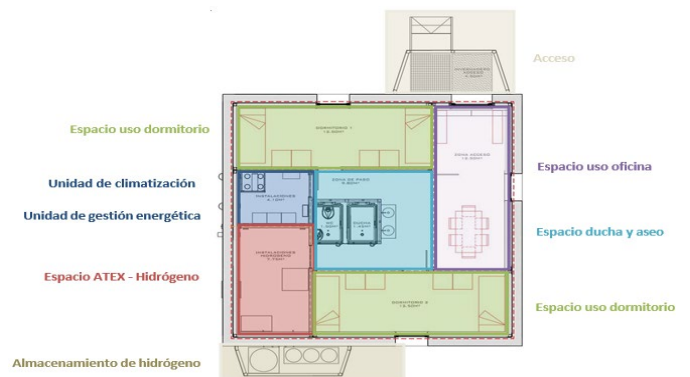


Fig. 4. Plano general distribución del prototipo ZEROENERGYMOD

En cuanto a las instalaciones se ha instalado un sistema de climatización “all in one” que satisface las necesidades de climatización (dimensionadas a 1 kW de potencia térmica nominal), agua caliente y ventilación. Este sistema 100% eléctrico estará alimentado a través de una pila de hidrógeno, recargada a su vez mediante energía eléctrica generada por fuentes renovables (paneles fotovoltaicos y un mini aerogenerador).

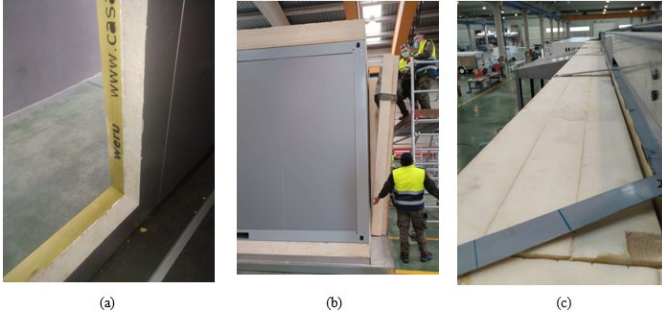


Fig. 5. Fotos montaje. (a) Instalación paneles interiores de aislamiento y montaje de premarcos. (b) Montaje de la piel exterior. (c) Vista del encuentro del aislamiento exterior con cubierta.

IV. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha justificado la necesidad de disponer de infraestructuras energéticamente autosuficientes para la construcción de bases militares en el despliegue de misiones internacionales de la NATO. Para cubrir esta necesidad, el consorcio de empresas CUDZ, B+Haus, ARPA y la Fundación de Hidrógeno solicitaron un proyecto europeo LIFE con el que se está construyendo un prototipo de módulos habitables, desmontables y modulares para la construcción de bases militares de las fuerzas armadas europeas, alimentados sólo con energías limpias mediante el almacenamiento de hidrógeno. Dicho módulo se realiza en base a contenedores desmontables de 20 pies, que cumplen con todos los condicionantes para ser transportados y utilizados en entornos con condiciones de seguridad y funcionalidad tan peculiares como las bases militares en despliegues en zonas de conflicto. Para el diseño final del prototipo se hizo un listado que recopilaba todas las consideraciones de seguridad y funcionalidad necesarias, además de todos los requerimientos de la normativa militar y civil en el entorno europeo y NATO que rige las condiciones de construcción y eficiencia energética en bases militares. En base al análisis realizado y a partir de los resultados obtenidos de la caracterización energética de Bases en el Líbano y la Antártida, se extraen las condiciones de diseño que debe cumplir el prototipo ZEROENERGYMOD, construido bajo el estándar Passivhaus.

En la actualidad se encuentra en proceso de montaje en la Base San Jorge adyacente al campo de maniobras de San Gregorio (Zaragoza), clima desértico, donde se procederá a la realización de pruebas reales de funcionamiento y al proceso de certificación oficial Passivhaus desde el mes de marzo de 2022. Posteriormente será trasladado a la Base de Riga en Letonia para someterse a pruebas de funcionamiento real en clima frío donde se continuará con el proceso de pruebas y monitorización y por último quedará ubicado de forma definitiva en la Base Gabriel de Castilla en la Antártida, clima polar.

Zeroenergymod: módulos móviles habitables de energía cero en Europa
Zeroenergymod: zero energy habitable mobile modules in Europe

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ACS	Agua caliente sanitaria
BAEs	Bases Antárticas Españolas
NATO	Organización del Tratado Atlántico Norte
RITE	Reglamento de Instalaciones térmicas de Edificios

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto está financiado por el LIFE 2019: LIFE “Climate Change Mitigation projects”, 2020-2023, ref. CCM/ES/001327. El proyecto ha sido galardonado con el premio a la mejor iniciativa de innovación en la II Gala Aragonesa de la Construcción 2022. Reconocimiento por todo su trabajo a Carlos Navarro y Javier Garú de B+Haus Arquitectura Eficiente, Beatriz Rodríguez, Adeline Rezeau y Migue Ángel García del Centro Universitario de la Defensa, Carlos Arié, Paula Barbero y todo el equipo de la Fundación de Hidrógeno de Aragón y por último a Jesús Montero y todo el equipo de ARPA Equipos de Campaña.

REFERENCIAS

- M. M. Hidalgo García, “La cumbre de Chicago de la NATO: las armas de destrucción masiva y la seguridad energética,” Doc. Inf. ieee (Instituto español estudios estratégicos), no. 32, pp. 1–4, 2012.
- NATO Military Committee, “Principles and Policies for Environmental Protection: MC 469/1.” 2011.
- NATO, “Wales Summit Declaration,” NATO Summit Wales, 2014. [Online]. Available: http://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_112964.htm. [Accessed: 29-Sep-2020].
- NATO, “Warsaw Summit Communiqué,” 2016. [Online]. Available: http://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_133169.htm. [Accessed: 29-Sep-2020].
- NATO, “‘Smart Energy’ camp opens eyes to promising energy-saving solutions,” 2013. [Online]. Available: https://www.nato.int/cps/en/natolive/news_101896.htm?selectedLocale=en. [Accessed: 29-Sep-2020].
- Dirección General de Armamento y Material. Subdirección General de Tecnología e Innovación. Ministerio de Defensa, 2011, Monografías del SOPT. “Sistemas de generación de energía y eficiencia energética en operaciones internacionales”. Ministerio de Defensa
- Dirección General de Armamento y Material., Subdirección General de Tecnología e Innovación. “Monografías del SOPT. Jornada tecnológica: Soluciones tecnológicas para la eficiencia y seguridad energética en misiones internacionales,” 2018, Ministerio de Defensa.
- Dirección General de Armamento y Material. Ministerio de Defensa, “Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID - 2020.”
- J. L. Palés, 2014, Transcripción Discurso en SICUR. Intranet AGM.
- V. Prado, T. P. Seager, A. R. Mechtenberg, and E. Bennett, “A systemic thermodynamic analysis of fuel consumption at forward operating bases,” in Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 2011, pp. 1–6.
- C. Samaras, W. J. Nuttall, and M. Bazilian, “Energy and the military: Convergence of security, economic, and environmental decision-making,” Energy Strateg. Rev., vol. 26, Nov. 2019.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.