

MÓDULOS HABITABLES DE CONSUMO DE ENERGÍA CASI NULO PARA BASES MILITARES EN ENTORNOS NATO

*Beatriz Rodríguez Soria, Dra. Ingeniera Industrial
Miguel Ángel García García, Dr. Ingeniero Industrial
Adeline Rezeau, Dra. Ingeniera Industrial
(Profesores del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza)*



 *Figura 1.—Prototipo montado en la Base San Jorge*

RESUMEN

Con la finalidad de disminuir la dependencia de combustibles fósiles así como reducir las emisiones de CO₂ en las Bases, Acuartelamientos y Establecimientos militares (BAEs) de las Fuerzas Armadas Europeas, a través de un proyecto europeo (LIFE 19 CCM/ES/001327), el consorcio compuesto por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, B+HAUS, ARPA Equipos Móviles de Campaña y la Fundación de Hidrógeno de Aragón, ha diseñado y construido un prototipo habitable construido en base a contenedores de 20 pies, desmontable, modular y autosuficiente energéticamente. Para alcanzar la auto-suficiencia energética, se han modificado substancialmente los módulos existentes según dos grandes líneas: 1) minimizar la demanda de energía, construyendo bajo el estándar Passivhaus que permite una reducción de la misma en torno al 90%; 2) producción de energía in situ con energías limpias (paneles fotovoltaicos y aerogenerador) y almacenamiento de la energía sobrante en forma de hidrógeno. Además, estos módulos eliminan la huella térmica, ya que además de poseer unas pérdidas energéticas por la envolvente muy bajas, no tienen puentes térmicos y sus infiltraciones de aire a través de la envolvente mínimas. En la actualidad, gracias a la colaboración de la Brigada Aragón I en la Base San Jorge, con el apoyo técnico y de personal del Batallón de Zapadores I, dicho prototipo se ha montado en sus instalaciones para monitorizar y estudiar en detalle su funcionamiento. El prototipo se va a probar en clima extremo árido en Zaragoza y en clima extremo frío en la Antártida, donde se ubicará definitivamente en la Base Gabriel de Castilla.

1. ANTECEDENTES

Si se analizan las BAEs construidas en las misiones asignadas al Ejército de Tierra de España, la principal tipología edificatoria utilizada son los contenedores de 20 pies (J.L. Palés, 2014). Dichos contenedores se encuentran alimentados casi exclusivamente con grupos electrógenos diésel en las misiones internacio-

nales, dada la inexistencia o escasa fiabilidad de las redes eléctricas locales (SOPT, 2011). Para su abastecimiento con gasoil precisan convoyes logísticos, cuya movilidad se encuentra dificultada debido a la continua acción de combatientes y por la precaria infraestructura de transporte de los países donde se despliegan las tropas (SOPT, 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 BAEs y el número de bajas debido a los ataques a las cadenas de suministro (V. Prado et. al, 2011).

El consumo de estas BAEs no es nada despreciable, si consideramos que, en el año 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 OTAN 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 (C. Samarras et. al, 2019). En el marco de esta misión se estima que en la BAE española Ruy González de Clavijo se necesitaba una media de 30.000 litros diarios de combustible para abastecer 730 contenedores de 20 pies que eran alimentados con 52 grupos electrógenos. Por otra parte, se estimó que estos consumos se repartían en un 20% en iluminación y en un 80% en calefacción y aire acondicionado (J.L. 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 (SOPT, 2018).

Detectada esta problemática, el Comité Militar de la OTAN aprobó el documento MC-469: «Principios y política militar OTAN para la Protección Ambiental», que establece las políticas y responsabilidades en el terreno de la protección medioambiental de los mandos OTAN y mandos nacionales que cooperen en las actividades militares de la Alianza (NATO, 2011). A partir de la Cumbre de la OTAN de Chicago de 2012, en la que los aliados acordaron mejorar la eficiencia energética de las fuerzas militares (M. M. Hidalgo, 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 OTAN, 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). Su finalidad es aportar medidas de eficiencia energética y medidas medioambientales concretas que deben considerarse en la construcción de las BAEs de la OTAN, así como establecer protocolos de seguimiento de los planes medioambientales.

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 (SOPT, 2018), (NATO, 2013), (Dirección general de armamento y material, 2020).

Se estima que con el prototipo construido se podrá disminuir en tono a un 90% la demanda de energía (en torno a 10,95 millones de litros de combustible al año) de las BAEs estudiadas (Afganistán y el Líbano), pudiendo así hacer posible su abastecimiento a través de energías renovables con almacenamiento estacional de hidrógeno.

2. CONDICIONANTES DEL PROYECTO

La construcción del prototipo que se presenta en este artículo, ha sido financiada por la Comisión Europea con el programa 2019 «LIFE Climate Change Mitigation projects», concedido con referencia LIFE 19 CCM/ES/001327, bajo el acrónimo ZEROENERGY-MOD. Dicho proyecto se está desarrollando por el Consorcio de empresas: Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, B+HAUS, ARPA y la Fundación de Hidrógeno de Aragón. Con él se ha construido en 2021 un prototipo habitable hecho en base a contenedores de 20 pies, desmontable, modular y autosuficiente energéticamente. para la construcción de bases de las Fuerzas Armadas europeas, alimentados con energías limpias mediante el almacenamiento de hidrógeno producido a través de fotovoltaica y mini eólica.

Aunque la base del diseño se ha realizado con parámetros energéticos y medioambientales, no se debe olvidar que se trata de un prototipo para entornos militares, donde la funcionalidad, versatilidad y seguridad son claves para la misión. En particular, el prototipo se ha construido para:

1. Cumplir con todos los requerimientos de los pliegos de licitaciones del ET para contenedores habitables y con los estándares medioambientales NATO para la construcción de bases.
2. Ser funcional y versátil y cumplir con los requerimientos de seguridad en el entorno de las BAEs.
3. Poder ser transportado e instalado solo con medios del ET.
4. Disminuir al máximo la huella térmica para aumentar la seguridad.

Para tener en cuenta todos los parámetros de diseño necesarios se han realizado varios estudios previos:

1. Se han analizado artículos de la Agencia Europea de Defensa, estándares NATO relacionados con la construcción de bases militares, la eficiencia energéti-

ca y el medio ambiente (STANAG 2582: Environmental protection best practices and standards for military camps in NATO operations (AJEPP-2) y el STANAG 7141: Joint NATO doctrine for environmental protection during NATO-led military activities (AJEPP-4), y requerimientos de las de los pliegos de licitaciones del ET para los contenedores de vida y ablución.

2. Se han analizado los resultados obtenidos de la caracterización energética de BAEs en climas extremos, como son la Base Miguel de Cervantes en el Líbano y la Base Gabriel de Castilla en Isla Decepción (Antártida). Para ello en dichas bases se monitorizaron condiciones climatológicas exteriores, condiciones de confort interiores y consumos de energía, y

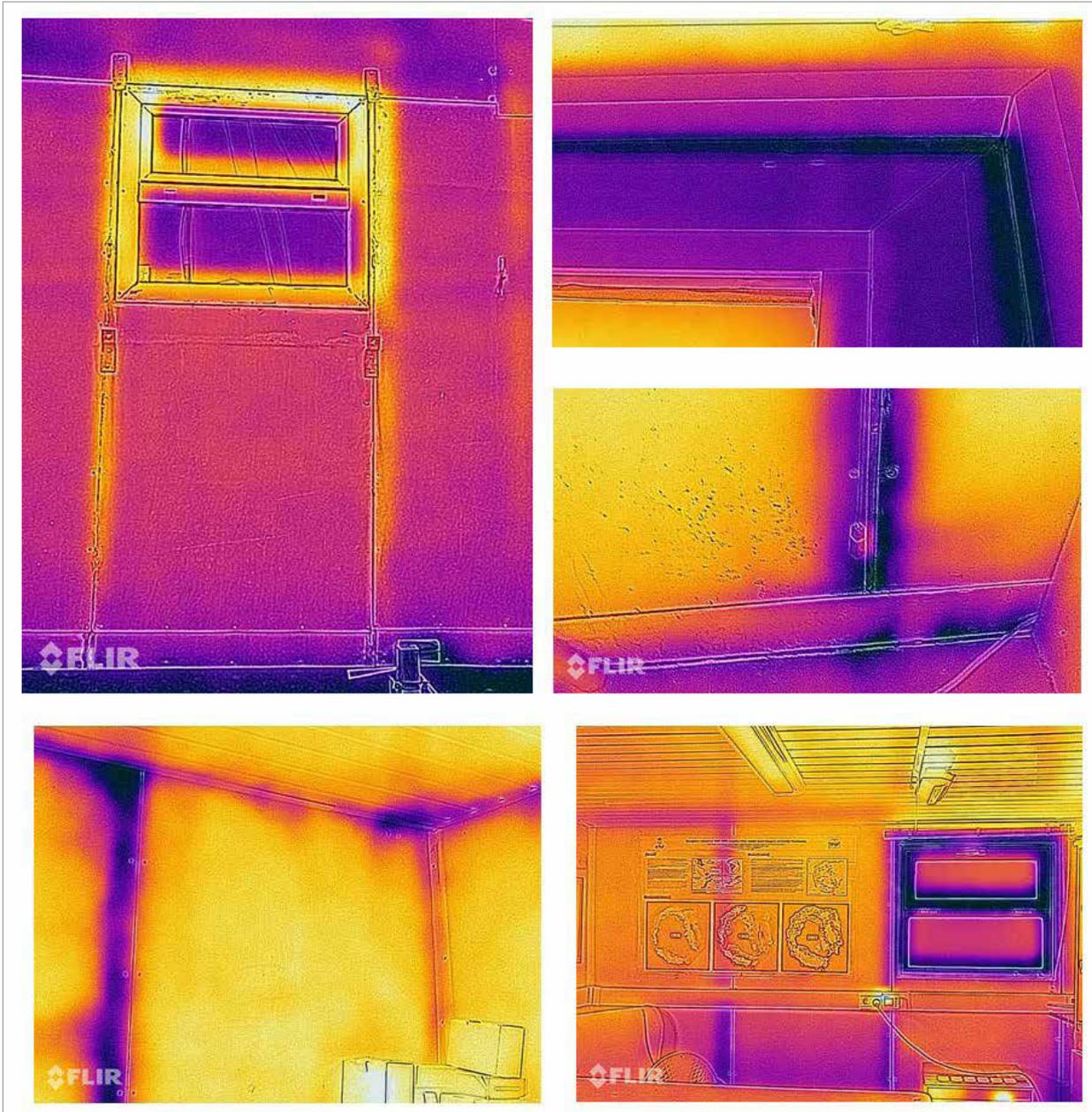


Figura 2.—Arriba a la izquierda: Termografía exterior del módulo científico en la Base Gabriel de Castilla para detección de puentes térmicos. Resto de fotografías: Termografías interiores realizadas durante el test de blower-door para detectar los puntos de infiltraciones de aire incontroladas

se realizaron pruebas de blower door, termografías y mediciones de transmitancia. En la imagen 1 pueden observarse algunos resultados.

3. Se han extraído condicionantes de diseño de las entrevistas realizadas a personal de mantenimiento y usuarios de dichas Bases.

4. Se han estudiado y aplicado las principales normativas internacionales y estándares de eficiencia energética en Europa (entre otras COM (2018) 773; Directiva (UE) 2019/944; Directiva 2012/27/UE; Directiva (UE) 2018/2002; Recomendación (UE) 2019/786 de la Comisión; Recomendación (UE) 2016/1318 de la Comisión; Mandate to CEN, CENELEC and ETSI 2010 M/480 EN; Principles for Nearly Zero-energy Buildings (BPIE) 2011; ZEBRA 2020 - nearly zero-energy building strategy; Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU, Final report, European Union, 2019; Synthesis Report on the National Plans for Nearly Zero Energy Buildings NZEBs)

5. Se ha realizado un estudio de las técnicas constructivas y sistemas de producción de energía utilizados en Europa para la construcción de Edificios de Consumo Casi Nulo.

Con los resultados de todos estos estudios se realizó un listado de condiciones de diseño que debía cumplir el prototipo de acuerdo a los requerimientos detectados. 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.

Cabe destacar que se trata de un prototipo que va a ser trasladado posteriormente a la Base Gabriel de Castilla en Isla Decepción (Antártida), para permanecer en funcionamiento definitivamente en la misma. Esta ubicación ha condicionado el diseño, siendo necesario tomar medidas de aislamiento y producción de energía sobredimensionadas para la mayoría de ubicaciones donde podría ser instalado este tipo de módulos. Además, el entorno tan exigente, con una alta salinidad, un aire muy frío saturado de vapor de

agua, el piroclasto arrastrado por fuertes rachas de viento, la acumulación de nieve, y la necesidad de preservar el medio ambiente con materiales ecológicos no contaminantes, han conllevado la utilización de determinados materiales que cambiarían en diferentes ubicaciones. Un ejemplo es la utilización de aislamientos de lana de roca de alta densidad en vez de poliuretano altamente contaminante, o el acabo exterior en acero inoxidable, en vez de polímeros reforzados con fibras, que serían más adecuados en entornos en conflicto, al evitar las esquirlas en caso de ataque, así como tener un precio mucho más asequible. 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.

Los principales requerimientos a cumplir han sido (B. Rodríguez, 2021):

MATERIALES Y MEDIDAS PASIVAS:

- Alto aislamiento térmico (U aproximado de $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$) y riguroso control de puentes térmicos que disminuyan demanda de energía y eviten la huella térmica.
- Infiltraciones $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$. Uniones estancas para evitar infiltraciones de aire, humedad que produce corrosión y entrada de polvo que estropea equipos, y eviten la huella térmica.
- Inercia térmica para mantener temperatura en caso de fallo temporal de energía.
- 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 que se degradan.

- 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: 14530 kg.
- Alta eficiencia energética con técnicas disponibles y eficaz gestión de la energía.
- Puntos acceso a internet.
- Termómetro e higrómetro visible en lugar representativo.
- Medidas máximas de cada módulo: 8588 * 2500 * 3065 mm para transporte por tierra.

INSTALACIONES Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA:

- Ventilación mecánica con recuperador de energía entálpico de alta eficiencia. En torno al 80% y bajo consumo específico de ventiladores.
- Control centralizado del sistema de ventilación y climatización.
- Eficiencia y control de la iluminación. Maximizar el uso de led y la luz natural.
- 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.

- Desmontable en piezas de peso máximo 2 T
- Contenedores de largo: 6-6.5m, ancho 2.435-6 m, alto 2.6-2.79 m
- Carga mínima nieve y viento: 100 kg/m²

DEMANDA DE ENERGÍA, CONFORT Y CALIDAD DE AIRE:

- Demanda de energía para calefacción < 15 kWh/m²año
- Demanda de energía para refrigeración < 15kWh/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% 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) Datos reales ahora
- Humedad relativa entre 40% y 70% (AJEPP-2)
- CO₂ < 1000 ppm



Figura 3.—Datos medidos en contenedores de vida en Bases del ET vs. requerimientos limitantes del diseño del prototipo

- Comprobar que no hay ninguna zona especialmente expuesta al exterior. Sino en Antártida realizar cálculo específico de carga de calefacción en esa zona
- Patrón de uso establecido para BAEs

En la figura 3 pueden compararse estos valores con mediciones realizadas en el Líbano y en la Antártida para esta misma tipología edificatoria. En naranja se encuentran los valores medidos y en verde los valores límites para los que ha diseñado el prototipo.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO

Antes de proceder a la instalación del prototipo, el Batallón de Zapadores I, realizó diversos trabajos previos necesarios para su funcionamiento; desde la construcción de una losa de cimentación que permite el correcto asentamiento de los contenedores, hasta la ejecución y conexión de las infraestructuras de abastecimiento, saneamiento y electricidad.

Previo a la instalación del prototipo en la Base San Jorge, se montó y desmontó en las instalaciones de ARPA para comprobar la correcta integración de los

módulos. Para asegurar que el montaje posterior por parte del ET será correcto, el personal de dicho Batallón participó en el desmontaje en las instalaciones de ARPA junto con personal de la empresa, bajo la supervisión de las empresas B+Haus y CUDZ. De esta manera, se asegura por un lado el correcto traspaso de conocimientos para posteriores instalaciones, y se realizan unos planos y guías de montaje para futuras construcciones en las que ha participado activamente personal del ET, detectando posibles problemas en el mismo.

Como resultado de aplicar las condiciones de diseño se ha construido un prototipo compuesto por cuatro contenedores de 20 pies con un chasis de bastidores rígido apilable, que permite construir la envolvente eliminando todos los puentes térmicos. El proceso de montaje y los elementos que componen el módulo pueden observarse en la imagen 3. Los paneles de cerramientos ubicados en el plano del chasis, son machihembrados, con 10 cm de aislamiento, y terminados en acero inoxidable. El chasis junto con los paneles, son la estructura que permanece invariable para todos los climas donde se pueda ubicar la BAE. Posteriormente, debido a la alta exigencia de aislamientos que implica la ubicación en la Antártida, se ha colocado otra capa de paneles de 10 cm más de aislamiento por el interior, que, en caso de ubicarse

en climas menos extremos, podría eliminarse o convertirse en una cámara técnica de instalaciones. En este caso se ha seleccionado el modelo de contenedor HIGH CUBE para disponer falso techo, al no tener en este caso paredes técnicas. Posteriormente, el conjunto de contenedores ya montado, posee unas pieles exteriores aislantes que se han diseñado para asegurar la ausencia de puentes térmicos y la eliminación de las infiltraciones de aire a través de las uniones. La edificación se compone de un suelo que puede hacer las veces de cimentación, de 30 cm de espesor de poliestireno extrusionado de alta densidad y resistencia a compresión. En este caso las pieles exteriores de aislamiento se realizan con paneles 30 cm de lana de alta densidad acabados 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 $U_w < 0,85 \text{ W/(m}^2\text{k)}$. 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 entre paneles prefabricados y la estructura-chasis del contenedor (R. Higuero, 2022).

Con este prototipo se consigue disminuir drásticamente la firma térmica, ya que se poseen altos aislamientos que disminuyen las pérdidas de calor en torno a un 90%, y se eliminan los puentes térmicos y las infiltraciones de aire caliente al exterior. Además, en el entorno de una BAE, debido a que los diseños se hacen para que las pérdidas en todos los módulos sean las mismas, se consigue eliminar la diferencia de la huella térmica de los puntos sensibles que desprenden más calor, como son el Centro de



Figura 4.—Proceso de montaje del prototipo en la Base San Jorge

Comunicaciones, el Puesto de Mando o los sistemas de generación de energía.

En las imágenes 5 y 1 pueden observarse tanto la distribución en planta como el prototipo final construido. En el caso concreto que nos ocupa, los cuatro contenedores rodean una zona central que hace de distribuidor y zona de servicios. La zona habitable tiene 50,25m² de superficie útil y la zona de instalaciones y producción y almacenamiento de energía 12,5m². Posee un vestíbulo previo para tener doble puerta que evite la entrada de aire sin climatizar en el acceso, y que en Isla Decepción se encontrará cerrado con cristalerías a modo de invernadero. El abastecimiento de calefacción y ACS se realiza con un equipo compacto que incluye un sistema de ventilación mecánica controlada con recuperación entálpica, una aerotermia que produce agua caliente y agua fría tanto realizar la climatización con una batería de agua, como para alimentar el depósito de ACS que tiene integrado.



Figura 5.—Diseño final del prototipo ZEROENERGYMOD

4. AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Batallón de Zapadores I, por el trabajo realizado en este proyecto, participando en el montaje y desmontaje del prototipo, por ejecutar todas las obras e infraestructuras necesarias para su instalación en la Base San Jorge, y por su predisposición para colaborar en el desarrollo de las guías de montaje del prototipo, aportando ideas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. L. Palés, 2014, Transcripción Discurso en SICUR. Intranet AGM.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, no. August, p. 100409, nov. 2019.
- [6] NATO Military Committee, «Principles and Policies for Environmental Protection: MC 469/1» 2011.
- [7] M. M. Hidalgo García, «La cumbre de Chicago de la OTAN: las armas de destrucción masiva y la seguridad energética», Doc. Inf. ieee (Instituto español estudios estratégicos), no. 32, pp. 1–4, 2012.
- [8] 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].
- [9] NATO, «Warsaw Summit Communiqué», 2016. [Online]. Available: http://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_133169.htm. [Accessed: 29-Sep-2020].

[10] 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].

[11] Dirección General de Armamento y Material. Ministerio de Defensa, «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID - 2020»

[12] B.Rodríguez; C.Navarro; M.A. García, «ZEROENERGYMOD: Zero energy habitable mobile modules in Europe». 13 conferencia Nacional Passivhaus, Murcia, España.

[13] R. Higuero, B. Rodríguez, C. Navarro, J. Garú, «Life zero energy mod: Zero energy habitable mobile modules in Europe». Contart, 2022. Toledo, España. ■