



CENTRO ALTI STUDI  
PER LA DIFESA



ISTITUTO DI RICERCA E  
ANALISI DELLA DIFESA

**Vergura Silvano**

**“Smart energy”: stato dell’arte delle tecnologie attualmente disponibili e applicazione di un sistema diversificato di fonti energetiche alternative alla logistica Air expeditionary dell’Aeronautica Militare**

---

**(Codice AS-SMA-10)**





## **ISTITUTO DI RICERCA E ANALISI DELLA DIFESA**

L'Istituto di Ricerca e Analisi della Difesa (di seguito IRAD), per le esigenze del Ministero della Difesa, è responsabile di svolgere e coordinare attività di ricerca, alta formazione e analisi a carattere strategico sui fenomeni di natura politica, economica, sociale, culturale, militare e sull'effetto dell'introduzione di nuove tecnologie che determinano apprezzabili cambiamenti dello scenario di difesa e sicurezza, contribuendo allo sviluppo della cultura e della conoscenza a favore della collettività e dell'interesse nazionale.

L'IRAD, su indicazioni del Ministro della difesa, svolge attività di ricerca in accordo con la disciplina di Valutazione della Qualità della Ricerca e sulla base della Programma nazionale per la ricerca, sviluppandone le tematiche in coordinamento con la Direzione di Alta Formazione e Ricerca del CASD.

L'Istituto provvede all'attivazione e al supporto di dottorati di ricerca e contribuisce alle attività di Alta Formazione del CASD nelle materie d'interesse relative alle aree: Sviluppo Organizzativo; Strategia globale e sicurezza/Scienze Strategiche; Innovazione, dimensione digitale, tecnologie e cyber security; Giuridica.

L'Istituto opera in coordinamento con altri organismi della Difesa e in consorzio con Università, imprese e industria del settore difesa e sicurezza; inoltre, agisce in sinergia con le realtà pubbliche e private, in Italia e all'estero, che operano nel campo della ricerca scientifica, dell'analisi e dello studio.

L'Istituto, avvalendosi del supporto consultivo del Comitato scientifico, è responsabile della programmazione, consulenza e supervisione scientifica delle attività accademiche, di ricerca e pubblicistiche.

L'IRAD si avvale altresì per le attività d'istituto di personale qualificato "ricercatore della Difesa, oltre a ricercatori a contratto e assistenti di ricerca, dottorandi e ricercatori post-dottorato.

L'IRAD, situato presso Palazzo Salviati a Roma, è posto alle dipendenze del Presidente del CASD ed è retto da un Ufficiale Generale di Brigata o grado equivalente che svolge il ruolo di Direttore.

Il Ministro della Difesa, sentiti il Capo di Stato Maggiore della Difesa, d'intesa con il Segretario Generale della Difesa/Direttore Nazionale degli Armamenti, per gli argomenti di rispettivo interesse, emana le direttive in merito alle attività di ricerca strategica, stabilendo le linee guida per l'attività di analisi e di collaborazione con le istituzioni omologhe e definendo i temi di studio da assegnare all'IRAD.

I ricercatori sono lasciati liberi di esprimere il proprio pensiero sugli argomenti trattati: il contenuto degli studi pubblicati riflette quindi esclusivamente il pensiero dei singoli autori e non quello del Ministero della Difesa né delle eventuali Istituzioni militari e/o civili alle quali i Ricercatori stessi appartengono.



CENTRO ALTI STUDI  
PER LA DIFESA



ISTITUTO DI RICERCA E  
ANALISI DELLA DIFESA

**Vergura Silvano**

**“Smart energy”: Stato dell’arte delle tecnologie attualmente disponibili e applicazione di un sistema diversificato di fonti energetiche alternative alla logistica Air expeditionary dell’Aeronautica Militare**

---

**(Codice AS-SMA-10)**

**“Smart energy”: stato dell’arte delle tecnologie attualmente disponibili e applicazione di un sistema diversificato di fonti energetiche alternative alla logistica Air expeditionary dell’Aeronautica Militare**

---



## **NOTA DI SALVAGUARDIA**

Quanto contenuto in questo volume riflette esclusivamente il pensiero dell’autore, e non quello del Ministero della Difesa né delle eventuali Istituzioni militari e/o civili alle quali l’autore stesso appartiene.

### **NOTE**

Le analisi sono sviluppate utilizzando informazioni disponibili su fonti aperte.

Questo volume è stato curato dall’**Ufficio Studi, Analisi e Innovazione dell’IRAD.**

Direttore

**Col. s. SM Gualtiero Iacono**

Capo dell’Ufficio Studi, Analisi e Innovazione

**Col. AArn Pil. Loris Tabacchi**

Progetto grafico

**1° Mar. Massimo Lanfranco – C° 2ª cl. Gianluca Bisanti – Serg. Manuel Santaniello**

Revisione e coordinamento

**C.V. Massimo GARDINI – S.Ten. Elena PICCHI – Funz. Amm. Aurora Buttinelli –  
Ass. Amm. Anna Rita Marra**

Autore

**Silvano Vergura**

Stampato dalla Tipografia del **Centro Alti Studi per la Difesa**

**Istituto di Ricerca e Analisi della Difesa**

**Ufficio Studi, Analisi e Innovazione**

Palazzo Salviati

Piazza della Rovere, 83 - 00165 – Roma

tel. 06 4691 3205

e-mail: [irad.usai.capo@casd.difesa.it](mailto:irad.usai.capo@casd.difesa.it)

**chiusa a dicembre 2023**

**ISBN 979-12-5515-062-6**

## INDICE

<b>Sommario</b>	<b>7</b>
<b>Abstract</b>	<b>10</b>
<b>1. Introduzione alla logistica <i>Air expeditionary</i> per l'A.M.</b>	<b>13</b>
<b>1.1 La logistica di proiezione</b>	<b>13</b>
<b>2. Requisiti, strategie di configurazione e programmazione delle attività per ottimizzare le prestazioni dei sistemi <i>smart energy</i> per l'Air Expeditionary</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Requisiti dei sistemi smart energy per l'Air expeditionary</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1 Trasportabilità</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2 Modularità</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3 Scalabilità</b>	<b>20</b>
<b>2.1.4 Interoperabilità</b>	<b>21</b>
<b>2.1.5 Affidabilità</b>	<b>23</b>
<b>2.1.6 Riparabilità</b>	<b>24</b>
<b>2.1.7 Robustezza/non vulnerabilità</b>	<b>25</b>
<b>2.1.8 Safety (Sicurezza interna)</b>	<b>27</b>
<b>2.1.9 Security (Sicurezza esterna)</b>	<b>29</b>
<b>2.2 Strategie di configurazione dei sistemi smart energy per l'Air expeditionary</b>	<b>31</b>
<b>2.2.1 Condizioni ambientali</b>	<b>32</b>
<b>2.2.2 Valutazione della risorsa solare</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3 Valutazione della risorsa eolica e localizzazione</b>	<b>35</b>
<b>2.3 Programmazione delle attività standard per ottimizzare i consumi energetici</b>	<b>37</b>
<b>2.4 Approccio multi-obiettivo per l'utilizzo delle risorse energetiche</b>	<b>38</b>
<b>3. Tecnologie smart energy attualmente disponibili</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Stato dell'arte sulle tecnologie attualmente disponibili</b>	<b>44</b>
<b>3.1.1 Tecnologie fotovoltaiche</b>	<b>44</b>
<b>3.1.2 Sistemi di accumulo di energia elettrica</b>	<b>45</b>
<b>3.1.3 Tecnologia eolica</b>	<b>48</b>
<b>3.2 Progettazione di un'installazione campale aeronautica in modalità smart energy completa dei servizi logistici e operativi di supporto (Air DOB smart energy)</b>	<b>50</b>
<b>3.2.1 Caso-studio #1: Sistema smart energy per campo base da 180 addetti</b>	<b>54</b>

3.2.2 Caso-studio #2: Sistema smart energy per campo base da 500 addetti	55
3.2.3 Gestione e controllo del sistema smart energy	56
4. Tecnologie smart energy di futuro impiego	59
4.1 Analisi dello stato della ricerca relativamente a tecnologie smart energy di futuro impiego	59
4.1.1 Reforming e ossidazione parziale del metano	61
4.1.2 Elettrolisi dell'acqua	62
4.2 Proiezione progettuale della futura Air DOB smart energy	63
4.2.1 Integrazione fonti rinnovabili di energia e idrogeno	65
5. Conclusioni	67
Abbreviazioni e acronimi	70
Bibliografia	71
Nota sull'IRAD e Nota sull'Autore	73

## SOMMARIO

Questa relazione tratta alcuni aspetti rilevanti per un sistema *smart energy* per l'*Air Expeditionary*. La logistica di proiezione comprende le funzioni e le attività indispensabili per il sostentamento delle unità dispiegate in zone operative e si preoccupa di rendere disponibile e utilizzabile ovunque (e nel minor tempo possibile) tutto ciò di cui le unità dispiegate hanno bisogno: materiali, capacità e servizi. È, quindi, necessario che la risposta sia flessibile e rapida e che fornisca un supporto completo e interoperabile a tutte le unità dispiegate in area operativa, all'interno di una coalizione NATO o di altre forze multinazionali o nazionali. L'obiettivo è garantire una prontezza anche in ambienti degradati o in situazioni estreme, dove le strutture preesistenti sono quasi assenti. La logistica di proiezione è un elemento essenziale nei processi di pianificazione, preparazione ed esecuzione delle operazioni aeree. Essa supporta tutte le fasi: dall'analisi e preparazione (*Survey e Pre-Deployment*) al rischieramento in teatro (*Deployment*), al consolidamento e conduzione delle operazioni, nonché al ripiegamento (*Re-Deployment*). All'interno di questo contesto, la sostenibilità ambientale delle operazioni gioca un ruolo rilevante. All'interno della sostenibilità ambientale è fondamentale, inoltre, il contributo che possono dare le fonti di energia rinnovabili durante le operazioni militari. Il focus predominante della presente ricerca riguarda un sistema fotovoltaico-eolico, supportato da batterie al litio. Considerata la specificità di un'operazione militare di tipo *expeditionary*, si evidenzia che il tema della ecosostenibilità del sistema energetico è incentrato principalmente sull'indipendenza e autonomia energetica, quali fattori strategici per il sostegno logistico di una qualsiasi campagna militare. Il concetto di *Smart Energy*, a cui ci si riferisce durante l'intera relazione, è, pertanto, da intendere come indipendenza da fornitori terzi di combustibile, utilizzo di fonti rinnovabili di energia, efficientamento energetico, economicità di risorse e protezione dell'ambiente. Pur perseguendo tutti gli obiettivi di sostenibilità energetica appena enunciati, è evidente che gli stessi sono applicati solo se e quando compatibili con gli obiettivi prioritari di ogni singola campagna militare. La specificità della logistica *Air Expeditionary* (necessità di essere operativi in 48 ore anche in situazioni di emergenza e non pianificate) richiede, infatti, che il sistema *smart energy* abbia un insieme di caratteristiche a cui non è possibile rinunciare. Tra queste si menzionano la trasportabilità, la scalabilità, la modularità, la sicurezza durante il trasporto e durante il funzionamento sul campo, l'affidabilità, la facilità di installazione e disinstallazione e così via. L'elaborato affronta questi aspetti in dettaglio, fornendo utili indicazioni sui parametri più importanti da considerare. Particolare attenzione è riservata alla formazione e addestramento del personale incaricato di gestire il sistema

elettrico durante tutte le operazioni: carico su aeromobile, scarico da aeromobile, installazione, gestione, manutenzione, disinstallazione, ricarica. Particolare attenzione è data, inoltre, al trasporto di batterie al litio sull'aeromobile, fornendo i riferimenti normative a cui riferirsi. Un punto di attenzione della presente attività di ricerca riguarda le possibili configurazioni da tenere a disposizione, in modo da scegliere la migliore, qualunque sia la condizione operativa di destinazione. Le fonti rinnovabili di energia, infatti, non sono programmabili, perché la radiazione solare o la ventosità di un giorno qualunque non è prevedibile. Tuttavia, la radiazione solare e la ventosità di un sito in un periodo dell'anno è statisticamente nota dai dati storici. Il testo propone alcune configurazioni tipo e suggerisce diversi strumenti web di radiazione solare e ventosità globale, da consultare prima dell'avvio dell'operazione militare. Accanto a questi aspetti tecnici è suggerita anche la programmazione delle attività in campo base (suddividendole tra pianificabili e non pianificabili), al fine di ottimizzare la gestione energetica e minimizzare i consumi energetici. La ricerca evidenzia la necessità di un approccio multi-obiettivo per raggiungere la migliore ed efficace gestione del sistema energetico, evidenziando i punti chiave da tenere sotto costante controllo. Dopo una rapida introduzione alle tecnologie rinnovabili proposte per l'*Air Expeditionary*, sono indicate due soluzioni energetiche per due casi studio: un campo base da 180 addetti e uno da 500. I risultati ottenuti in entrambi i casi richiedono batterie al litio di media potenza, al fine di accumulare l'energia necessaria a ciascun campo base. Quest'aspetto è rilevante ai fini della trasportabilità, poiché le attività di *Air expeditionary* sono basate su trasporto aereo e i regolamenti internazionali prevedono misure stringenti per il trasporto di batterie al litio che sono classificate come merce pericolosa. Le batterie di piccola potenza soddisfano quei requisiti, attuando le prescrizioni previste. Nel caso di batterie medie potenza, di interesse per le operazioni militari di proiezione, l'assolvimento di quei requisiti non è garantito. Quest'aspetto richiede approfondimenti che esulano dalla presente ricerca e dovranno essere valutati insieme alla dettagliata analisi dei carichi elettrici e alla predisposizione di configurazioni standard del sistema *smart energy*, come già introdotto nella presente relazione. L'ultima parte dell'elaborato riguarda il futuro prossimo delle tecnologie *smart energy* che possono essere utilmente sfruttate dalla logistica di proiezione. Il risultato cui si è giunti è che nel breve periodo, per diversi motivi, non si potranno sostituire *in toto* le attuali tecnologie. Le tecnologie attuali sono mature, quindi affidabili, e hanno costi iniziali e di gestione relativamente contenuti. Gli attuali sistemi, descritti in questa relazione, soddisfano, inoltre, le peculiarità della logistica di proiezione (trasportabilità, modularità, scalabilità, affidabilità, e così via). Non ci sono attualmente altre tecnologie che offrano contestualmente tutte queste caratteristiche, oltre

ad una migliore performance energetica. Le nuove tecnologie, di conseguenza, nel breve periodo, potranno affiancare e supportare quelle esistenti. Tra le più promettenti c'è la tecnologia dell'idrogeno che possiede la maggior parte delle caratteristiche appena discusse. L'idrogeno verde rappresenta l'elemento, il cui processo di produzione – che necessita di energia – è alimentato da fonti rinnovabili di energia. Pertanto, soddisfa le necessità della sostenibilità ambientale a cui questo intero lavoro è ispirato. Attualmente i costi di produzione dell'idrogeno verde sono più alti del cosiddetto idrogeno grigio che comporta l'emissione di CO<sub>2</sub>. L'attività di ricerca per ridurre i costi di produzione dell'idrogeno verde è costante ed è plausibile che nel breve periodo si abbiano risultati significativi. Questo è il motivo per cui la tecnologia dell'idrogeno è suggerita come valida tecnologia del prossimo futuro, a supporto dei sistemi *smart energy* per la logistica di proiezione. L'attività di ricerca termina con un decalogo dell'Autore per la sostenibilità ambientale di sistemi energetici, evidenziando che non tutti i punti possono essere perseguiti dall'*Air Expeditionary*, considerati i suoi obiettivi e peculiarità.

## **ABSTRACT**

This report discusses some relevant aspects of a smart energy system for the Air Expeditionary. The Air Expeditionary encompasses the functions and activities essential for sustaining the military units deployed in operational areas and is concerned with making available and usable everywhere (and in the shortest possible time) everything, which the deployed units need: materials, capabilities and services. It is therefore necessary for the response to be flexible and rapid, providing comprehensive and interoperable support to all units deployed in the area of operations, within a NATO or other forces. The goal is to ensure readiness even in degraded environments or extreme situations where pre-existing structures are almost absent. Air Expeditionary is a valuable element in the processes of planning, preparation, and execution of air operations. It supports all phases: from analysis and preparation (Survey and Pre-Deployment) to in-theater Re-Deployment (Deployment), consolidation of operations, and Re-Deployment (Re-Deployment). Within this context, the environmental sustainability of operations plays a relevant role and the contribution that renewable energy sources can make during military operations is crucial. The predominant focus of the present research concerns a photovoltaic-wind system, supported by lithium batteries. Given the specificity of an expeditionary military operation, it is pointed out that the issue of energy system eco-sustainability is mainly focused on the energy independence and autonomy as strategic factors for the logistical support of any military operation. Therefore, the concept of Smart Energy in this report is to be understood as independence from third-party fuel suppliers, use of renewable energy sources, energy efficiency, resource affordability and environmental protection. While pursuing all these energy sustainability goals, it is clear that they are applied only if and when compatible with the priority objectives of each military operation. In fact, the specificity of Air Expeditionary logistics (need to be operational in 48 hours even in emergency and unplanned contexts) requires the smart energy system to have a set of features, which cannot be given up. These include transportability, scalability, modularity, safety during transport and during the military operation, reliability, ease of installation and uninstallation, and so on. Accordingly, this research addresses these aspects in detail, providing useful insights. Particular attention is given to the training of personnel in charge of operating the electrical system, during all operations: loading onto aircraft, unloading from aircraft, installation, operation, maintenance, uninstallation, and reloading. In addition, devoted attention is given to the transport of lithium batteries on aircraft, providing regulatory references. A focus of the present research activity has been on the possible configurations to be kept on hand, so as

to choose the best one, whatever the target operating condition. In fact, renewable energy sources are not programmable, because solar radiation or windiness on any given day cannot be predicted. However, the solar radiation and windiness of a site at a period of the year is statistically known from historical data. Accordingly, the research proposes some typical configurations and suggests some web tools of solar radiation and global windiness, which should be consulted before starting the military operation. Along with these technical aspects, scheduling activities in the military camp (dividing them into plannable and unplannable) are also suggested in order to optimize the energy management and minimize the energy consumption. The research highlighted the need for a multi-objective approach to achieve the best and most effective management of the energy system, highlighting the key points to be kept under constant review. After a quick introduction to the proposed renewable technologies, two energy solutions are proposed for two case studies: a 180-employee military camp and a 500-employee military camp. The results achieved in both cases require medium power lithium batteries in order to store the energy needed at any base camp. This aspect is relevant to transportability, as Air expeditionary activities are based on air transportation, and international regulations stipulate stringent rules for the transportation of lithium batteries, which are classified as dangerous goods. Small power batteries meet those requirements by implementing the requirements. In the case of medium power batteries, the fulfillment of those requirements is not guaranteed. This aspect requires further investigation, which is beyond the scope of this research and will have to be evaluated together with the detailed analysis of electrical loads and the definition of standard smart energy system configurations, as already introduced in this report.

The last part of the research concerns the near future of the smart energy technologies, which can be usefully exploited by the Air Expeditionary. The result arrived at is that in the short term the current technologies cannot be fully replaced for several reasons. Meanwhile, the current technologies are mature, thus reliable, and relatively low initial and operating costs. In addition, the current systems described in this report meet the peculiarities of the projection logistics (transportability, modularity, scalability, reliability, and so on). Finally, there are currently no other technologies that simultaneously offer all these features, as well as better energy performance. Consequently, new technologies, in the short term, may complement and support the existing ones. Among the most promising is certainly the hydrogen technology, which has several of the characteristics just discussed. In addition, green hydrogen represents the hydrogen, the production of which is provided by the renewable energy sources. Thus, the green hydrogen meets the needs of environmental sustainability that this entire work is inspired by. Currently, the production costs of the green

hydrogen are higher than the so-called gray hydrogen, which involves the emission of CO<sub>2</sub>. The research efforts to reduce the hydrogen production costs are ongoing and it is plausible that significant results will be achieved in the short term. This is why the hydrogen technology is suggested as a possible viable technology of the near future, supporting the smart energy systems for the Air Expeditionary. The research activity ends with an Author's decalogue for the environmental sustainability of energy systems, pointing out that not all points can be pursued by the Air Expeditionary, given its goals and peculiarities.

## 1. Introduzione alla logistica *Air expeditionary* per l'A.M.

La logistica militare è la branca dell'arte militare che tratta le attività intese ad assicurare alle forze armate quanto necessario per vivere, muoversi e combattere nelle migliori condizioni di efficienza. Più specificamente, è la scienza della pianificazione ed esecuzione del movimento e del mantenimento delle forze. Per raggiungere lo scopo prefissato si occupa dell'intero ciclo di vita dei beni mobili e immobili, compresa la progettazione e lo sviluppo, l'approvvigionamento, l'acquisizione e la fornitura dei servizi, l'immagazzinamento, il trasporto, la distribuzione, la manutenzione, lo sgombero e l'alienazione dei materiali, nonché del supporto medico e sanitario (Savino, 2023).

Per comprendere appieno il concetto di logistica di proiezione, che sarà trattato a breve, è necessario comprendere la differenza tra logistica gestionale e logistica operativa. La logistica gestionale si occupa di fornire servizi logistici generali per le strutture stabili, assicurando il movimento e il supporto delle forze. Tra le sue funzioni rientra la gestione dell'intero ciclo di vita dei beni mobili e immobili, l'acquisizione e la fornitura dei servizi, la gestione dei trasporti e il supporto medico e sanitario, sempre facendo riferimento a strutture fisse. D'altra parte, la logistica operativa si occupa della pianificazione e dell'espletamento delle attività *Combat Service Support (CSS)*, che verranno analizzate in seguito, che sono connesse al movimento e alla sopravvivenza sul campo delle forze operative. In altre parole, si occupa di assicurare la disponibilità del personale e dei mezzi necessari nel luogo, nel momento opportuno e nelle quantità adeguate. Questa visione operativa della logistica riveste un ruolo fondamentale nella pianificazione delle operazioni.

I punti menzionati sono di fondamentale importanza per il successo delle operazioni stesse (Savino, 2023):

- **POSTO GIUSTO:** anche a grandi distanze dalla madrepatria, la logistica deve essere in grado di raggiungere qualsiasi luogo.
- **MOMENTO GIUSTO:** è cruciale avere una elevata capacità di risposta e tempistiche compatibili con le necessità delle componenti operative, cercando di ridurre al minimo i tempi necessari.
- **NELLE QUANTITÀ SUFFICIENTI:** è essenziale garantire un'autonomia che permetta di sostenere lo sforzo logistico nel lungo periodo, tenendo in considerazione anche i costi associati.

### 1.1 La logistica di proiezione

L'ampia distribuzione delle possibili aree di impiego, spesso distanti dalla Patria, e la necessità di operare con componenti complesse e integrate hanno portato alla richiesta di

uno strumento militare caratterizzato dalla natura "joint" ed "expeditionary", in grado di garantire il dispiegamento di "Task Force" agili, modulari ed interoperabili. (Savino, 2023)

La logistica di proiezione comprende le funzioni e le attività indispensabili per il sostentamento delle unità dispiegate in zone operative. Tutto ciò di cui le unità dispiegate hanno bisogno, inclusi materiali, capacità e servizi, deve essere reso disponibile e utilizzabile ovunque e nel minor tempo possibile. Questa capacità consiste nell'offrire una risposta flessibile e rapida, fornendo un supporto completo e interoperabile a tutte le unità dispiegate in area operativa, all'interno di una coalizione NATO o di altre forze multinazionali o nazionali. L'obiettivo è garantire una prontezza operativa tale da consentire la Conduzione di operazioni a 360°, anche in ambienti degradati o in situazioni estreme, dove le strutture preesistenti utilizzabili sono quasi assenti. La logistica di proiezione è un elemento essenziale nei processi di pianificazione, preparazione ed esecuzione delle operazioni aeree, contribuendo in ogni fase, dall'analisi e preparazione (*Survey e Pre-Deployment*) al rischieramento in teatro (*Deployment*), al consolidamento e alla conduzione delle operazioni, nonché al ripiegamento (*Re-Deployment*), per soddisfare le esigenze operative. L'Aeronautica Militare sta attualmente sviluppando diverse capacità logistiche di proiezione denominate *Air Combat Service Support (ACSS)*. Queste capacità sono prontamente disponibili grazie alle squadre di dispiegamento denominate *Deployment Team*, sin dalle prime fasi di un'operazione. La logistica di proiezione, attraverso il *Combat Support (CS)* e il *Combat Service Support (CSS)*, consente di proiettare in modo flessibile e modulare le capacità operative e logistiche di uno Stormo. Ciò garantisce il dispiegamento, il sostegno e il ripiegamento delle forze aeree. Le capacità del *Combat Service Support* rappresentano la transizione dai servizi logistici ordinari, come la manutenzione, il genio, la sanità, i trasporti e i rifornimenti, agli assetti logistici di tipo *Expeditionary e Deployable*, che sono in grado di fornire supporto vitale direttamente in area di operazioni. Questa transizione è stata determinata dall'evoluzione della natura dei conflitti e dei requisiti del supporto logistico nei teatri operativi. Di conseguenza, le unità logistiche specializzate sono state tra le prime ad essere dislocate in teatro, in prima linea, anticipando l'arrivo delle unità operative principali e condividendo gli stessi pericoli delle unità Combat. Per quanto riguarda i tempi di reazione e di intervento, è importante considerare due tipologie di logistica di proiezione: la logistica *Expeditionary* e la logistica *Deployable*. La logistica *Expeditionary* rappresenta il concetto di *agile logistics*. È costituita da componenti leggere, spesso aviotrasportabili con aeromobili da trasporto tattico che mantengono un'elevata prontezza operativa e possono essere dispiegate entro 48 ore. Hanno, tuttavia, una limitata autonomia di permanenza in teatro e non sono in grado di supportare efficacemente operazioni di durata superiore ai 60 giorni.

Ciò richiede equipaggiamenti, dispositivi e sistemi leggeri, flessibili e trasportabili in aereo. L'essere *expeditionary* è importante soprattutto per il *Combat Service Support* in quanto è tra le entità che entrano per prime in un nuovo teatro operativo. (Montagnolo, 2021). D'altra parte, la logistica *Deployable* si basa sul principio di *Combat Logistics* ed è impiegata in situazioni operative di più ampio respiro. Le componenti logistiche, proiettate tramite l'utilizzo combinato di mezzi aerei, terrestri e navali, hanno una prontezza operativa e una mobilità diversa rispetto alla logistica *Expeditionary*. Questo permette loro di avere una maggiore autonomia di permanenza in teatro e di offrire servizi di qualità superiore. Queste componenti sono mantenute per periodi più lunghi, fino a 6 mesi rinnovabili, ma richiedono tempi di rischieramento non inferiori a 4 settimane. In generale, il *CSS deployable* viene impiegato in operazioni che richiedono un impegno consistente di forze *Combat* e *Combat Service Support* o in teatri operativi con caratteristiche climatiche o ambientali che richiedono sistemi complessi di sostegno del personale impiegato. Le capacità del *CSS* vengono sviluppate in modo incrementale, partendo dalle componenti più leggere e caratterizzate da elevata prontezza operativa di tipo *Expeditionary*, fino ad arrivare a quelle più complete che compongono il segmento *Deployable*. È importante sottolineare che entrambe le tipologie di *CSS* possono essere considerate concorrenti in situazioni che richiedono una reazione immediata e/o una permanenza prolungata in area. La logistica *Expeditionary* rappresenta la forza iniziale che verrà gradualmente sostituita dalla logistica *Deployable*. Le capacità e le risorse devono essere prontamente proiettabili e *mission-oriented* per garantire la sostenibilità delle operazioni richieste; si tratta di capacità e risorse modulari, scalabili e *plug & play*. La modularità si riferisce all'indipendenza sostanziale delle singole capacità logistiche che possono essere utilizzate autonomamente o integrate in pacchetti di varia struttura e dimensione. La scalabilità si riferisce alla capacità del sistema di aumentare o diminuire le dimensioni in base alle necessità e alle disponibilità. Nel modello proposto, il sistema di supporto logistico è scalabile in base alle esigenze operative, adattandosi perfettamente alle specifiche del requisito operativo. Le tecnologie *plug & play*, termine derivato dal settore informatico, non richiedono una procedura di installazione o configurazione specifica da parte del sistema. Allo stesso modo, le singole capacità logistiche possono essere facilmente integrate in pacchetti capacità esistenti o scorporate da essi.

L'*Air Expeditionary Task Force* (AETF) costituisce l'apice delle capacità operative dell'Aeronautica Militare rappresentando una forza di proiezione che può essere adeguatamente dimensionata in base alle necessità. La sua importanza risiede nel fatto che può gestire crisi in modo autonomo o essere integrata all'interno di coalizioni più ampie nel

contesto di un dispositivo Joint/Combined. L'AETF, che combina diverse capacità operative, richiede adeguati supporti logistici che confluiscono nell'AETF C.S.S., inteso come complesso di strutture, sistemi ed equipaggiamenti che consentono un impiego rapido, efficace e sicuro in vari contesti operativi. Questo rappresenta un moltiplicatore di forza per la proiettabilità e la rapidità di intervento, caratteristiche dell'arma aerea. Le capacità principali che l'AETF possiede riguardano le aree operative (C2, C&CS) e le capacità di supporto tecnico-logistico (CSS).

## **2. Requisiti, strategie di configurazione e programmazione delle attività per ottimizzare le prestazioni dei sistemi *smart energy* per l'Air Expeditionary**

Questa sezione introduce i requisiti di un sistema *smart energy* per l'Air Expeditionary, suggerisce la definizione di strategie di configurazioni che devono tener conto del sito ospitante dell'operazione militare e, infine, propone di organizzare le attività campali maggiormente energivore, in modo da ottimizzare i consumi energetici. Come successivamente dettagliato, l'organizzazione delle attività in funzione dei consumi energetici non può, ovviamente, porsi in antitesi o in competizione agli obiettivi prioritari dell'operazione militare, ma esclusivamente in modalità compatibile agli stessi.

### **2.1 Requisiti dei sistemi *smart energy* per l'Air expeditionary**

Il sistema *smart energy* per Air expeditionary deve soddisfare diversi requisiti per garantire un'agevole manovrabilità nelle fasi di carico dei componenti sui velivoli in dotazione, scarico, installazione, operatività, dismissione e ricarica sui velivoli. L'agevole manovrabilità si ottiene, perseguendo l'approccio *plug & play*, ogni volta che ciò sia possibile. Questo approccio, in sintesi, presuppone che i sistemi debbano prevedere procedure di montaggio/connessione e smontaggio/disconnessione molto semplici. Come situazione-limite auspicabile si considera il caso in cui non sia necessario alcun attrezzo o, in sub-ordine, attrezzi facilmente reperibili e di facile uso. L'utilizzo di attrezzi dedicati e/o specifici potrebbe essere preso in considerazione solo in 2 casi:

- a) assenza di un sistema più semplice;
- b) necessità di consentire l'operazione di montaggio/connessione e smontaggio/disconnessione solo a persone qualificate per questa attività, perché aventi specifica formazione e addestramento.

Il caso b) è tipicamente considerato quando l'operazione prevede elevato rischio, sia per le persone direttamente coinvolte nelle operazioni sia per la sicurezza del sito in senso lato.

I principali requisiti sono descritti nel seguito. Si evidenzia, fin d'ora, che diversi requisiti sono tra loro connessi, per cui un aspetto peculiare o critico dei dispositivi *smart energy* può essere citato in più sub-requisiti. Quando, ad esempio, si trasportano delle batterie al litio, è indispensabile tener conto sia gli aspetti della loro collocazione durante il trasporto (trattata in Trasportabilità 2.1.1) sia gli aspetti di sicurezza durante il trasporto (trattata in Sicurezza 2.1.8).

### 2.1.1 Trasportabilità

La trasportabilità è il primo requisito da considerare per un sistema *smart energy* da utilizzare per l'*Air Expeditionary*. Questa necessità discende da tre principali aspetti: ingombro, peso, pericolosità. Nel caso di un sistema *smart energy* basato su tecnologia fotovoltaica (moduli rigidi o strutture flessibili a film sottile), tecnologia eolica e batterie di accumulo elettrico, un elemento che riveste particolare importanza è la batteria (in particolar modo quella al litio, tipicamente utilizzata in queste applicazioni). Il largo uso della batteria al litio è dovuto principalmente alla cospicua densità di potenza (potenza erogabile per kg di peso) e alla elevata numerosità di cicli di ricarica, prima che le prestazioni diminuiscano significativamente. Di contro, le batterie (anche quelle al litio) sono componenti pesanti, cioè, hanno un elevato peso specifico (massa per unità di volume) e sono pericolosi, se non accuratamente gestiti, perché possono essere fonte di incendio o esplosione. Per quanto riguarda il peso, ciò implica che, a parità di volume, un pallet di batterie al litio pesa molto più di un pallet di moduli fotovoltaici, che a sua volta pesa più di un pallet di pannelli fotovoltaici a film sottile. Il peso delle batterie, se in numero rilevante, impatta significativamente sul peso totale del sistema *smart energy* trasportabile sull'aeromobile e deve essere tenuto in considerazione anche in fase di disposizione fisica sull'aeromobile, ai fini dell'equilibrata ripartizione del carico.

Il trasporto di batterie al litio, specialmente batterie di medie dimensioni come quelle da 10 kW, richiede una rigorosa attenzione alla sicurezza per prevenire rischi legati all'incendio o all'esplosione. Seguono alcune indicazioni, da utilizzare come linee guida, per il trasporto sicuro di batterie al litio:

- **Regolamentazioni IATA/ICAO (2024)** che specificano come le batterie dovrebbero essere imballate, etichettate e maneggiate. Sono stabilite dall'*International Air Transport Association* (IATA) e dall'*International Civil Aviation Organization* (ICAO) per il trasporto di batterie al litio in aereo;
- **Classificazione e documentazione**, in particolare per le batterie al litio, in base al loro tipo, alla capacità e all'uso previsto. Oltre alle informazioni sulla batteria, devono essere specificate le precauzioni di sicurezza e le procedure di emergenza;
- **Imballaggio sicuro** in contenitori resistenti agli urti, alle vibrazioni e agli impatti. L'imballaggio deve prevenire cortocircuiti, proteggere dalle fiamme esterne e ridurre il rischio di danni meccanici alle batterie. È importante utilizzare contenitori progettati specificamente per il trasporto di batterie al litio;

- **Etichettatura** dei pacchi contenenti le batterie al litio, in modo da evidenziare la loro presenza con le etichette IATA/ICAO prescritte che indicano la presenza di batterie al litio e forniscono informazioni di contatto di emergenza;
- **Protezione da cortocircuiti** mediante tappi o nastro isolante;
- **Temperatura di trasporto** nel rispetto dei limiti di temperatura specificati dal produttore;
- **Personale adeguatamente addestrato** per affrontare situazioni di emergenza, ad esempio perdite o surriscaldamento delle batterie;
- **Monitoraggio** delle condizioni delle batterie durante il trasporto per rilevare eventuali segni di danni, surriscaldamento o altre anomalie.

Oltre alla regolamentazione IATA/ICAO già citata, si può tener conto di quanto riportato in *Air Force Interservice Manual 24-204: Preparing Hazardous Materials for Military Air Shipments* (2018), specificatamente per le sezioni 3.3.9.2 e 3.5.16, che evidenziano la necessità di requisiti di test, di massimo numero di celle per singolo pacco e di limiti di peso. Questi parametri devono essere definiti caso per caso e non ci sono indicazioni specifiche o limiti vincolanti, se non quelli dipendenti dagli ingombri dei pallet rispetto agli spazi disponibili sull'aeromobile.

Le batterie sono gli unici componenti attivi, cioè in grado di erogare energia, e richiedono quindi particolari attenzioni, come precedentemente descritto. Gli altri componenti di un sistema di energia, basato su fonti rinnovabili, non richiedono particolari prescrizioni di trasportabilità, se non quelle dovute ad ingombro, peso ed equa ripartizione dei carichi.

### 2.1.2 Modularità

La modularità in un sistema energetico si riferisce alla capacità di suddividere il sistema complessivo in unità o moduli più piccoli e autonomi che possono essere configurati, espansi o sostituiti in modo indipendente. Questi moduli, noti come sottosistemi o componenti modulari, sono progettati per svolgere funzioni specifiche e possono essere assemblati in diverse combinazioni per soddisfare esigenze specifiche. La modularità consente di avere una serie di vantaggi, di seguito elencati. Le seguenti proprietà sono riferite alla parte fotovoltaica, ma sono estensibili anche a sistemi eolici, costituiti da più turbine:

- **Flessibilità** che consente al sistema di adattarsi a diverse esigenze e condizioni. E' possibile, ad esempio, aumentare la capacità del sistema aggiungendo moduli fotovoltaici o batterie aggiuntive, quando il fabbisogno energetico cresce;
- **Facilità di manutenzione** poiché i singoli moduli possono essere ispezionati, mantenuti o riparati separatamente, riducendo i tempi di fermo impianto e semplificando le operazioni di manutenzione;
- **Aumento della disponibilità del sistema energetico** poiché la modularità aiuta a limitare la propagazione di difetti o guasti a tutto il sistema. In caso di problema ad un modulo questo può essere eliminato mentre gli altri continueranno a funzionare;
- **Scalabilità** poiché si può ampliare il sistema in modo graduale, in linea con le risorse disponibili o con l'evoluzione delle esigenze. Questo è particolarmente utile in situazioni in cui le dimensioni o il carico del sistema possono variare nel tempo;
- **Affidabilità** poiché i sistemi modulari possono essere progettati con ridondanza, cioè con moduli aggiuntivi che possono entrare in funzione in caso di guasto di uno dei moduli principali. Ciò aumenta l'affidabilità complessiva del sistema;
- **Risparmio economico** in quanto è possibile iniziare con un sistema più piccolo e aggiungere moduli man mano che cresce la necessità, invece di dover costruire un sistema completo fin dall'inizio;
- **Personalizzazione** poiché i sistemi modulari possono essere adattati alle esigenze specifiche di un'applicazione. Un campo base militare potrebbe personalizzare la configurazione del sistema energetico in base al numero di persone e al tipo di carichi elettrici.

### 2.1.3 Scalabilità

La scalabilità, in un sistema energetico basato su fonti rinnovabili, si riferisce alla capacità di espandere o ridurre il sistema in modo flessibile per adattarsi alle variazioni nei requisiti di potenza o energia. Questo concetto è particolarmente importante in applicazioni in cui i carichi energetici possono variare nel tempo o dove è necessario ampliare il sistema in futuro o quando si hanno fissati ingombri e pesi per il trasporto. Le seguenti proprietà sono riferite alla parte fotovoltaica di un sistema energetico, ma sono estensibili anche a sistemi eolici costituiti da più turbine:

- **Espansione della potenza:** un sistema fotovoltaico e di stoccaggio basato su batterie può essere espanso aumentando la quantità di moduli solari e/o la capacità

delle batterie. Questo consente di soddisfare crescenti esigenze energetiche senza dover sostituire completamente il sistema esistente;

- **Moduli fotovoltaici aggiuntivi:** per aumentare la potenza è possibile aggiungere moduli fotovoltaici al sistema. Questo richiede la valutazione della capacità del convertitore o dell'inverter per garantire che possa gestire la potenza aggiuntiva;
- **Batterie aggiuntive:** per aumentare la capacità di stoccaggio dell'energia si possono aggiungere batterie al sistema. Questo è utile per immagazzinare più energia solare durante il giorno e usarla nelle ore notturne o in condizioni nuvolose;
- **Sistema di controllo e monitoraggio:** un adeguato sistema di controllo e monitoraggio è essenziale per garantire che l'espansione del sistema sia coordinata e che tutti i componenti funzionino insieme in modo efficiente;
- **Costi e sostenibilità:** prima di espandere il sistema è importante valutare i costi associati e assicurarsi che l'espansione sia sostenibile e giustificata dalle esigenze energetiche;
- **Flessibilità di utilizzo:** la scalabilità consente di adattare il sistema a diverse applicazioni. Ad esempio, in un campo militare, il sistema potrebbe essere dimensionato in base al numero di soldati o alla presenza di veicoli elettrici;
- **Sicurezza e normative:** assicurarsi di rispettare le normative e i regolamenti tecnici relativi all'espansione di sistemi solari e alle batterie. Ciò può includere requisiti di sicurezza del convertitore e delle batterie;
- **Manutenzione:** l'espansione di un sistema richiede attenzione alla manutenzione continua per garantire che tutti i componenti funzionino in modo ottimale. Questo include il monitoraggio delle prestazioni, la pulizia dei moduli solari e la verifica delle batterie.

La scalabilità è un vantaggio importante dei sistemi energetici poiché consente di adattare il sistema alle esigenze in evoluzione senza dover effettuare investimenti sostanziali per un nuovo impianto. Questa flessibilità è particolarmente utile in contesti militari, residenziali, industriali e commerciali.

#### 2.1.4 Interoperabilità

L'interoperabilità dei sistemi energetici si riferisce alla capacità di diversi componenti o sistemi energetici di funzionare insieme in modo efficace e senza problemi. È questo, ad esempio, il caso di un sistema energetico combinato con impianto fotovoltaico, impianto eolico e batterie per l'accumulo. L'interoperabilità è fondamentale quando esistono diverse

tecnologie e protocolli per la produzione, la distribuzione e l'uso dell'energia. Segue un elenco delle principali caratteristiche dell'interoperabilità dei sistemi energetici:

- **Compatibilità tecnologica:** l'interoperabilità implica che le diverse tecnologie utilizzate nei sistemi energetici, come moduli fotovoltaici, batterie, inverter, sistemi di gestione dell'energia, siano compatibili tra loro. I moduli, ad esempio, devono interfacciarsi con gli inverter in modo efficiente per ottimizzare la produzione di energia (Cafarelli et al., 2021);
- **Standard e protocolli:** gli standard e i protocolli aperti giocano un ruolo chiave nell'interoperabilità. L'adesione a standard riconosciuti a livello globale può garantire che i componenti dei sistemi energetici possano comunicare e cooperare senza problemi. Il protocollo Modbus, ad esempio, è comunemente utilizzato per la comunicazione tra dispositivi energetici;
- **Integrazione dei sistemi:** l'interoperabilità è particolarmente importante quando si tratta di integrare sistemi diversi, come sistemi di produzione di energia solare, sistemi di stoccaggio dell'energia e sistemi di distribuzione dell'energia. Gli operatori di rete devono poter coordinare questi sistemi per garantire una fornitura stabile ed efficiente;
- **Controllo e monitoraggio centralizzato:** l'interoperabilità consente un controllo centralizzato dei sistemi energetici, il che è essenziale per monitorare le prestazioni, regolare la produzione e il consumo e gestire le risorse energetiche in modo ottimale;
- **Efficienza ed ottimizzazione:** i sistemi energetici interoperabili possono essere ottimizzati più facilmente. Possono, ad esempio, regolare la produzione di energia solare in base alla previsione meteo o alle esigenze di consumo;
- **Flessibilità e aggiornamenti:** un sistema interoperabile è flessibile e può essere aggiornato con relativa facilità per integrare nuove tecnologie o miglioramenti senza dover rinnovare l'intero sistema;
- **Riduzione dei costi e aumento dell'affidabilità:** l'interoperabilità può contribuire a ridurre i costi operativi, migliorare l'affidabilità e ottimizzare l'uso delle risorse energetiche;
- **Sicurezza:** l'interoperabilità deve essere implementata in modo da non compromettere la sicurezza dei sistemi energetici. È importante prevenire l'accesso non autorizzato o la manipolazione dei sistemi.

In sintesi, l'interoperabilità dei sistemi energetici è cruciale per massimizzare l'efficienza, l'affidabilità e la flessibilità nell'utilizzo delle risorse energetiche. La standardizzazione e la progettazione oculata dei sistemi sono fondamentali per garantire che le diverse tecnologie e componenti possano lavorare insieme in modo armonico e sicuro.

### 2.1.5 Affidabilità

Un sistema energetico basato su fotovoltaico e batterie utilizzato in un campo base militare deve essere altamente affidabile, in quanto la continuità dell'energia è fondamentale per sostenere le operazioni militari. Alcune caratteristiche fondamentali per l'affidabilità di questi sistemi in un contesto militare sono le seguenti:

- **Progettazione resiliente:** la progettazione del sistema deve essere resiliente e in grado di gestire le condizioni avverse tipiche di un ambiente militare come temperature estreme, condizioni meteorologiche variabili e possibili esposizioni a polvere o umidità. Questa progettazione dovrebbe anche prevedere misure di protezione contro atti vandalici o danneggiamenti intenzionali;
- **Alimentazione continua:** l'energia deve essere disponibile ininterrottamente. Questo richiede una capacità di stoccaggio di energia sufficiente per garantire la fornitura durante la notte, in condizioni nuvolose o in caso di picchi di consumo. È fondamentale evitare interruzioni nell'alimentazione elettrica;
- **Backup di emergenza:** oltre al sistema principale basato su fotovoltaico e batterie, è consigliabile avere un backup di emergenza, come un gruppo elettrogeno, per garantire l'alimentazione in situazioni estreme o nel caso di un guasto critico al sistema principale;
- **Sistema di monitoraggio:** l'installazione di un sistema di monitoraggio avanzato è essenziale. Questo consente di rilevare tempestivamente guasti o anomalie e di intraprendere azioni correttive. Il personale militare dovrebbe essere addestrato a interpretare e agire in base ai dati di monitoraggio, quindi in modalità *data-driven*;
- **Manutenzione preventiva:** la manutenzione preventiva dovrebbe essere una pratica regolare. Questo include la pulizia dei moduli solari, il controllo delle batterie e dei componenti elettronici su tutti i sistemi energetici, e la sostituzione delle parti usurate o danneggiate;
- **Gestione termica delle batterie:** le batterie al litio, comunemente utilizzate in sistemi di stoccaggio energetico, richiedono una gestione termica accurata per

evitare surriscaldamenti o temperature troppo basse che possono influire sulla loro durata e prestazioni;

- **Sicurezza fisica e digitale:** la sicurezza del sistema energetico è cruciale in un contesto militare. Dovrebbero essere adottate misure per proteggere il sistema da accessi non autorizzati o da possibili minacce informatiche;
- **Riserva di energia per situazioni di emergenza:** è importante garantire una riserva di energia in caso di situazioni di emergenza o di interruzioni prolungate. Ciò può includere batterie aggiuntive o sistemi di backup;
- **Addestramento del personale:** il personale militare deve essere addestrato per operare e mantenere in perfetta efficienza il sistema energetico. Questo include l'apprendimento delle procedure di emergenza e delle misure di sicurezza;
- **Standard di qualità e conformità normativa:** Assicurarsi che il sistema sia conforme a standard di qualità e a normative applicabili è essenziale per garantire l'affidabilità e la sicurezza del sistema energetico.

Nel contesto di un campo base militare, l'affidabilità del sistema energetico è un requisito fondamentale per sostenere tutte le operazioni, comprese le comunicazioni, la sorveglianza, il riscaldamento, il raffreddamento e altre attività critiche. Un sistema ben progettato, adeguatamente mantenuto e conforme alle normative è essenziale per garantire una fornitura energetica stabile e ininterrotta.

#### 2.1.6 Riparabilità

La riparabilità di un sistema energetico costituito da fotovoltaico e batterie è un aspetto importante, in quanto può ridurre i tempi di fermo impianto e i costi di manutenzione. Una progettazione che tiene conto della riparabilità facilita l'individuazione e la correzione dei guasti e la sostituzione delle componenti difettose. Le seguenti proprietà sono riferite alla parte fotovoltaica di un sistema energetico, ma sono estensibili anche a sistemi eolici, costituiti da più turbine o altre fonti di energia. Gli aspetti cruciali della riparabilità sono riportati di seguito:

- **Accessibilità ai componenti:** il sistema dovrebbe essere progettato in modo che i componenti critici siano facilmente accessibili per il personale di manutenzione. Questo include moduli fotovoltaici, batterie, inverter e componenti elettronici;
- **Sostituibilità dei componenti:** i componenti del sistema dovrebbero essere progettati in modo da essere sostituibili. Questo significa che dovrebbero essere facilmente smontabili e sostituibili senza dover smontare l'intero sistema;

- **Documentazione dettagliata:** deve essere disponibile una documentazione dettagliata che descriva come riparare e sostituire i componenti del sistema. Questa documentazione dovrebbe essere facilmente accessibile al personale di manutenzione, adeguatamente addestrato;
- **Disponibilità di pezzi di ricambio:** è importante avere una disponibilità pronta di pezzi di ricambio per i componenti critici. Ciò riduce i tempi di inattività in caso di guasto;
- **Addestramento del personale:** il personale di manutenzione deve essere adeguatamente addestrato per effettuare riparazioni e sostituzioni in modo sicuro ed efficiente. L'addestramento dovrebbe includere la gestione di situazioni di emergenza;
- **Diagnostica avanzata:** il sistema dovrebbe essere dotato di funzionalità di diagnostica avanzate per identificare guasti e problemi in modo tempestivo. Queste funzionalità possono semplificare il processo di riparazione;
- **Riciclaggio responsabile:** la riparabilità dovrebbe essere integrata con pratiche di riciclaggio responsabili. Questo è particolarmente importante per le batterie, che devono essere smaltite o riciclate in modo adeguato alla fine della loro vita utile;
- **Standard di qualità e normative:** il sistema dovrebbe essere progettato e realizzato in conformità con gli standard di qualità e le normative pertinenti per garantire la sicurezza e la riparabilità;
- **Monitoraggio remoto:** l'installazione di un sistema di monitoraggio remoto avanzato può contribuire a rilevare guasti o anomalie prima che si verifichino situazioni di emergenza, consentendo una riparazione proattiva.

### 2.1.7 *Robustezza/non vulnerabilità*

La robustezza e la non vulnerabilità di un sistema energetico sostenibile sono aspetti essenziali, specialmente in contesti critici come un campo base militare. Questi concetti si concentrano sulla capacità del sistema di resistere a situazioni avverse, tra cui eventi climatici estremi o attacchi intenzionali. Caratteristiche importanti per la robustezza e non vulnerabilità di un sistema energetico sostenibile sono i seguenti:

- **Resistenza agli eventi climatici estremi:** un sistema energetico sostenibile dovrebbe essere progettato per resistere a eventi climatici estremi come tempeste, alluvioni, gelate o temperature elevate. Questo può includere la scelta di materiali resistenti alle intemperie e la protezione dei componenti critici;

- **Protezione da attacchi intenzionali:** un sistema energetico in un contesto militare può essere esposto ad atti intenzionali. È, pertanto, importante prevedere misure di sicurezza fisica, come recinzioni, telecamere di sorveglianza o sistemi di allarme;
- **Sicurezza cibernetica:** la protezione dai potenziali attacchi cibernetici è fondamentale, specialmente in sistemi in cui la gestione dell'energia è automatizzata e basata su reti informatiche. La sicurezza cibernetica dovrebbe essere una priorità, con protocolli di protezione dei dati e dei controlli;
- **Isolamento dei sistemi critici:** i sistemi energetici dovrebbero essere progettati in modo che i componenti critici siano isolati o protetti da eventuali guasti in altre parti del sistema. Questo previene la propagazione dei danni;
- **Riserva di emergenza:** oltre al sistema principale, è consigliabile avere una riserva di energia di emergenza per garantire l'alimentazione durante eventi catastrofici o interruzioni prolungate;
- **Test di vulnerabilità:** periodicamente, è utile condurre test di vulnerabilità per valutare come il sistema reagirebbe a situazioni critiche o attacchi. Questi test possono identificare punti deboli nel sistema;
- **Pianificazione per situazioni di emergenza:** deve essere operativa una pianificazione dettagliata per situazioni di emergenza, inclusi piani di evacuazione e procedure per la riparazione e il ripristino del sistema in caso di guasti o attacchi;
- **Normative di sicurezza:** assicurarsi di conformarsi alle normative di sicurezza e alle linee guida specifiche per il settore militare in modo da garantire la robustezza e la non vulnerabilità del sistema;
- **Addestramento del personale:** il personale deve essere addestrato per affrontare situazioni di emergenza, compresi attacchi fisici o informatici, e per applicare procedure di sicurezza adeguate;
- **Comunicazione di emergenza:** assicurarsi che il sistema includa mezzi di comunicazione di emergenza per coordinare le attività durante situazioni critiche;
- **Riserva di risorse chiave:** è consigliabile avere una riserva di risorse chiave, come componenti di ricambio, che possano essere utilizzate in caso di situazioni di emergenza o per sostituire rapidamente parti danneggiate. Questo può ridurre i tempi di inattività e garantire un ripristino rapido;
- **Gestione avanzata delle emergenze:** la robustezza e la non vulnerabilità dovrebbero essere parte di un piano di gestione avanzato delle emergenze. Questo

piano dovrebbe definire chiaramente le procedure da seguire in caso di situazioni critiche e garantire che il personale sia preparato a rispondere in modo efficace;

- **Valutazione dei rischi:** è importante condurre periodicamente una valutazione dei rischi per identificare e mitigare potenziali minacce al sistema. Questo può aiutare a prevenire problemi e migliorare la sicurezza generale del sistema;
- **Collaborazione con esperti di sicurezza:** collaborare con esperti di sicurezza specializzati nella protezione dei sistemi energetici è fondamentale. Questi professionisti possono fornire consulenza sulla progettazione e l'implementazione di misure di sicurezza avanzate;
- **Protezione contro le minacce elettromagnetiche:** in situazioni militari, la protezione contro le minacce elettromagnetiche può essere cruciale per garantire che il sistema non sia vulnerabile a impulsi elettromagnetici o a interferenze radio;
- **Pianificazione della continuità operativa:** la pianificazione della continuità operativa dovrebbe essere parte integrante della strategia di gestione delle emergenze. Questo piano definisce come garantire la continuità delle operazioni in caso di situazioni di emergenza, incluse le misure di alimentazione di backup;
- **Riserva di combustibile di emergenza:** se il sistema include un gruppo elettrogeno come riserva di energia, è importante disporre di una riserva di combustibile di emergenza sufficiente per mantenere il gruppo elettrogeno in funzione durante situazioni di emergenza.

La robustezza e la non vulnerabilità dei sistemi energetici sostenibili in contesti militari sono essenziali per garantire la continuità delle operazioni e la sicurezza del personale. Questi sistemi devono essere progettati e gestiti con la massima attenzione alla sicurezza e alla resilienza, considerando le minacce e le sfide specifiche che possono emergere in un ambiente militare.

### 2.1.8 *Safety (Sicurezza interna)*

In questa e nella successiva sezione si analizzano gli aspetti legati alla *safety* (sicurezza interna) e *security* (sicurezza esterna). L'elemento fondamentale che consente di distinguere l'una dall'altra è l'intenzione (Delphi Ethica, 2023). La *security* si concentra sulla prevenzione e il contrasto di atti dannosi. Si tratta quindi di contrastare azioni, spontanee o deliberate che hanno l'**intenzione di nuocere**. La *security* consiste, quindi, nel contrastare gli atti che hanno un obiettivo di lucro e/o l'intento di nuocere. Esempi di problemi legati alla *security* sono il furto, l'aggressione, l'incendio doloso.

La *safety* designa, invece, tutti i mezzi di prevenzione e di intervento contro i rischi **accidentali** che possono arrecare danno a persone e cose, ma la cui origine è sempre involontaria. Esempi di problemi di *safety* sono le calamità naturali, gli incidenti sul lavoro, gli incendi elettrici, l'incendio per altre cause. La differenza tra *safety* e *security* è, quindi, chiara: se c'è un intento dannoso, il rischio si riferisce alla *security*, altrimenti alla *safety*. In questa sezione si affronta la *safety*.

La *safety* (sicurezza) in un sistema energetico basato su fonti rinnovabili e batterie si riferisce alla protezione e alla prevenzione di incidenti e situazioni pericolose. La sicurezza è un aspetto fondamentale in questi sistemi, sia per proteggere le persone che operano o vivono vicino agli impianti, sia per evitare danni all'ambiente. Punti cruciali sono i seguenti:

- **Protezione contro gli incidenti elettrici:** i sistemi fotovoltaici e le batterie possono generare tensioni e correnti pericolose. Assicurarsi che i componenti elettrici siano adeguatamente protetti da contatti accidentali e che siano presenti sistemi di interruzione in caso di guasto;
- **Protezione contro gli incendi:** le batterie, in particolare le batterie al litio, possono essere soggette a surriscaldamento o incendi se non gestite correttamente. È importante installare sistemi di protezione termica e antincendio e prevedere procedure di emergenza per spegnere eventuali incendi;
- **Manutenzione sicura:** le operazioni di manutenzione dei moduli fotovoltaici, delle batterie e degli inverter devono essere eseguite in modo sicuro. Il personale dovrebbe essere addestrato per lavorare in sicurezza con questi componenti;
- **Gestione dei prodotti chimici:** le batterie contengono prodotti chimici potenzialmente pericolosi. La gestione sicura di tali prodotti, inclusa la gestione dei rifiuti, è essenziale per la *safety*;
- **Protezione da sovraccarichi elettrici:** i sistemi fotovoltaici e le batterie dovrebbero essere protetti da sovraccarichi e cortocircuiti. Questo richiede l'installazione di dispositivi di protezione elettrica adeguati;
- **Protezione dall'esposizione agli agenti atmosferici:** i componenti del sistema dovrebbero essere protetti da danni causati da condizioni atmosferiche estreme, come pioggia, vento o temperature estreme. Questo può richiedere l'uso di alloggiamenti o protezioni speciali;
- **Protezione dell'ambiente:** la *safety* dovrebbe estendersi alla protezione dell'ambiente circostante. Ad esempio, prevenire perdite di liquidi dai sistemi di stoccaggio delle batterie per evitare inquinamenti;

- **Sicurezza dei dati:** in sistemi di controllo avanzati, la sicurezza dei dati è importante per proteggere le informazioni critiche dal punto di vista operativo da accessi non autorizzati;
- **Conformità normativa:** assicurarsi che il sistema sia conforme alle normative è fondamentale per garantire la *safety*. Ciò può includere ispezioni e certificazioni;
- **Formazione del personale:** il personale che opera o gestisce il sistema deve essere addestrato sulle problematiche specifiche di *safety* e deve essere in grado di rispondere a situazioni di emergenza in modo adeguato;
- **Monitoraggio costante:** l'implementazione di sistemi di monitoraggio costante può aiutare a rilevare problemi di *safety* in tempo reale e ad avviare azioni correttive.

La *safety* è un aspetto cruciale nei sistemi energetici basati su fonti rinnovabili e batterie poiché contribuisce a proteggere le persone e l'ambiente. La prevenzione degli incidenti e la gestione sicura dei componenti elettrici ed elettronici sono essenziali per garantire il corretto funzionamento e l'affidabilità del sistema.

#### 2.1.9 Security (Sicurezza esterna)

In questa sezione si analizzano specificatamente i rischi di *security* del sistema energetico, legati alla parte informatica, cioè al sistema di controllo e monitoraggio del corretto funzionamento del sistema energetico. La *security* di un sistema energetico, basato su impianto fotovoltaico e batterie, è fondamentale per proteggerlo da possibili minacce cibernetiche e garantire la continuità operativa. La sicurezza informatica è di importanza critica, specialmente nei contesti militari o in qualsiasi ambiente in cui la sicurezza delle operazioni è prioritaria. Aspetti da considerare sono i seguenti:

- **Protezione delle reti e dei sistemi:** assicurarsi che le reti di comunicazione e i sistemi di controllo del sistema energetico siano protetti da accessi non autorizzati. Questo può richiedere l'implementazione di firewall, sistemi di rilevamento delle intrusioni e autenticazione sicura;
- **Crittografia dei dati:** proteggere la comunicazione tra i componenti del sistema e i dati sensibili mediante l'uso di crittografia avanzata. Ciò impedisce che i dati siano intercettati o manipolati da terze parti non autorizzate;
- **Aggiornamenti e patch software:** mantenere costantemente aggiornato il software e i firmware dei componenti del sistema per correggere eventuali vulnerabilità. Questo può aiutare a prevenire attacchi informatici che sfruttano le debolezze del software;

- **Accesso autorizzato:** limitare l'accesso fisico e logico al sistema solo al personale autorizzato. L'implementazione di rigorosi controlli di accesso è fondamentale per prevenire intrusioni;
- **Gestione delle password sicura:** richiedere l'uso di password complesse e garantire che vengano cambiate regolarmente. Questo previene l'accesso non autorizzato dovuto a password deboli;
- **Audit e monitoraggio delle attività:** eseguire audit e monitorare costantemente le attività del sistema per rilevare anomalie o comportamenti sospetti. Il monitoraggio delle attività è fondamentale per rilevare intrusioni;
- **Sicurezza fisica:** proteggere fisicamente i componenti del sistema da accessi non autorizzati o danneggiamenti intenzionali. Questo può richiedere recinzioni, sorveglianza video e misure di protezione fisica;
- **Procedure di gestione delle minacce cibernetiche:** avere procedure ben definite per gestire le minacce cibernetiche e rispondere prontamente a incidenti. Queste procedure dovrebbero includere il ripristino sicuro del sistema e l'analisi delle cause;
- **Consapevolezza del personale:** addestrare il personale per essere consapevole delle minacce cibernetiche e delle pratiche sicure. Il personale dovrebbe essere in grado di riconoscere segnali di possibili attacchi e agire di conseguenza;
- **Backup e ripristino dei dati:** eseguire regolarmente il backup dei dati e testare i processi di ripristino in caso di perdita di dati dovuta a un attacco informatico;
- **Test di vulnerabilità:** eseguire test di vulnerabilità regolari per identificare potenziali debolezze nel sistema e adottare misure correttive;
- **Conformità normativa:** assicurarsi che il sistema sia conforme alle normative e ai regolamenti in materia di sicurezza informatica.

La security è fondamentale per prevenire attacchi informatici che potrebbero compromettere la sicurezza e l'affidabilità del sistema energetico. La protezione dei dati, dei sistemi e delle reti è un requisito essenziale per garantire che il sistema funzioni in modo sicuro e senza interruzioni. Per questo motivo, il sistema energetico, in particolar modo quando è connesso a reti elettriche di terze parti, deve essere gestito e mantenuto secondo le specificità appena descritte. Se il sistema è in isola, cioè non connesso a terze parti, la security riguarda solo la parte informatica sotto il diretto controllo del responsabile del sistema energetico. E' consigliabile, per questo motivo, assegnare ad una persona adeguatamente addestrata la responsabilità del sistema energetico anche durante un'operazione militare.

## 2.2 Strategie di configurazione dei sistemi smart energy per l'Air expeditionary

Le strategie di configurazione dei sistemi *smart energy* devono tener conto di molteplici aspetti, primi tra i quali la sorgente di alimentazione che è la fonte solare per i sistemi fotovoltaici, a concentrazione e solari termici, e la fonte eolica per i sistemi eolici. Poiché entrambe le fonti di alimentazione sono variabili e non deterministiche – come invece accade con un combustibile fossile – è necessario avere una precisa contezza del luogo dove il sistema *smart energy* dovrà operare, al fine di una efficace e realistica valutazione della prestazione energetica. Quest'ultima deve tener conto sia delle condizioni ambientali dell'area, sia del microclima, sia della situazione orografica del sito (cosiddetto *siting*) ospitante il sistema energetico. In un sito ad alta radiazione solare e bassa ventosità un sistema fotovoltaico sarà più performante di un sistema eolico. Il viceversa accade per un sito ad alta ventosità con radiazione solare limitata. A parità di sito, peraltro, le condizioni ambientali e, di conseguenza, la performance degli impianti, saranno diverse al variare delle stagioni. La radiazione solare invernale in un sito è diversa da quella estiva sia in termini di valori massimi, sia in termini di numero di ore equivalenti giornaliere, legate alle ore di luce giornaliere. Da queste considerazioni, si deduce che, una volta fissata la potenza necessaria alla corretta ed efficace operatività del campo base militare, si dovrebbero approntare diverse configurazioni di sistema energetico. Una prima classificazione non esaustiva, perché tiene conto solo della sorgente di alimentazione e non anche del *siting*, è la seguente:

1. sito ad alta radiazione solare ed alta ventosità;
2. sito ad alta radiazione solare e bassa ventosità;
3. sito a bassa radiazione solare ed alta ventosità;
4. sito a bassa radiazione solare e bassa ventosità.

L'elenco precedente suggerisce di predisporre almeno quattro differenti configurazioni per una fissata potenza necessaria al campo base militare. Il primo caso è quello maggiormente auspicabile dal punto di vista energetico perché consente al responsabile dell'impianto di decidere la quota parte di potenza da produrre con il sistema fotovoltaico e quella da produrre con generatori eolici. Anche gli ingombri per il trasporto, pertanto, possono essere gestiti di conseguenza. Nel secondo caso dovrà considerarsi maggiore potenza in capo al sistema fotovoltaico e viceversa nel terzo caso. L'ultimo caso prevede di aumentare i moduli o le turbine, a parità di potenza dei casi precedenti.

A queste considerazioni dovranno aggiungersi le specificità del sito di installazione perché le condizioni sul campo potrebbero essere anche abbastanza diverse da quelle medie dell'area.

Oltre a queste considerazioni, bisogna aggiungere che tutti i sistemi elettrici – quindi anche i moduli fotovoltaici, gli aerogeneratori e le batterie – garantiscono la prestazione dichiarata dal costruttore per fissati intervalli delle condizioni climatiche. La temperatura, in particolare, è uno dei parametri che maggiormente condiziona il funzionamento dei sistemi elettrici. Ad esempio, le batterie sono poco performanti sia per alte temperature che per basse temperature. I moduli fotovoltaici, invece, operano sempre meglio al diminuire della temperatura esterna. Le condizioni ottimali per un sistema fotovoltaico sono rappresentate da alta radiazione solare e bassa temperatura. L'umidità gioca un ruolo secondario. In conclusione, è fondamentale, conoscere le condizioni ambientali del sito di installazione del sistema *smart energy* in modo da confrontarle con le condizioni di corretto esercizio dei componenti elettrici. Se i parametri ambientali sono diversi da quelli del corretto esercizio di un singolo componente, detto componente non garantirà la prestazione attesa e potrebbe compromettere anche il corretto funzionamento di altre parti dell'impianto.

### 2.2.1 Condizioni ambientali

La Tabella 1 (MIL-STD-810H, 2019) fornisce una sintesi comprensiva delle tipologie climatiche ambientali naturali comunemente accettate (caldo, normale, freddo, molto freddo). I valori di temperatura sono riportati sia in scala °C che °F. La radiazione solare è riportata in  $W/m^2$  che è quella tipicamente utilizzata sulle schede tecniche dei componenti fotovoltaici. Si osserva che le temperature corrispondenti alla condizione *Basic-Cold* sono negative e molto basse e rappresentano sicuramente un elemento di criticità per alcuni componenti come le batterie. Ovviamente la situazione peggiora per la condizione *Cold* o *Severe Cold*.

Climatic Design Type	Daily Cycle <sup>1</sup>	Operational Conditions				Storage and Transit Conditions		
		Ambient Air Temperature <sup>2</sup> °C (°F)		Solar Radiation W/m <sup>2</sup> (Bph <sup>3</sup> )	Ambient Relative Humidity (Percent RH <sup>4</sup> )	Induced Air Temperature °C (°F)		Induced Relative Humidity (Percent RH)
		Daily Low	Daily High			Daily Low	Daily High	
Hot	Hot Dry (A1)	32 (90)	49 (120)	0 to 1120 (0 to 355)	8 to 3	33 (91)	71 (160)	7 to 1
	Hot Humid (B3)	31 (88)	41 (105)	0 to 1080 (0 to 343)	88 to 59	33 (91)	71 (160)	80 to 14
Basic	Constant High Humidity (B1)	Nearly Constant 24 (75)		Negligible	95 to 100	Nearly Constant 27 (80)		95 to 100
	Variable High Humidity (B2)	26 (78)	35 (95)	0 to 970 (0 to 307)	100 to 74	30 (86)	63 (145)	75 to 19
	Basic Hot (A2)	30 (86)	43 (110)	0 to 1120 (0 to 355)	44 to 14	30 (86)	63 (145)	44 to 5
	Intermediate <sup>6</sup> (A3)	28 (82)	39 (102)	0 to 1020 (0 to 323)	78 to 43	28 (82)	58 (136)	See note <sup>5</sup>
	Basic Cold (C1)	-32 (-25)	-21 (-5)	Negligible	Tending toward saturation	-33 (-28)	-25 (-13)	Tending toward saturation
Cold	Cold (C2)	-46 (-50)	-37 (-35)	Negligible	Tending toward saturation	-46 (-50)	-37 (-35)	Tending toward saturation
Severe Cold	Severe Cold (C3)	-51 (-60)		Negligible	Tending toward saturation	-51 (-60)		Tending toward saturation

<sup>1</sup> Designations in parentheses refer to corresponding climatic categories in MIL-HDBK-310 and AR-70-38 (except the A-3 category) and NATO STANAG 4370, AECTP 200, AECTP 230, (see Part One, paragraphs 2.2.1, 2.2.2, and 2.3).

<sup>2</sup> °C values (rounded to the nearest whole degree) derived from data obtained/established on °F scale.

<sup>3</sup> Bph represents British Thermal Units per square foot per hour.

<sup>4</sup> Sequence of RH presentation corresponds to sequence of air temperatures shown (e.g., for HOT-DRY daily cycle, 8 percent RH occurs at 32°C (90°F); 3 percent RH occurs at 49°C (120°F).

<sup>5</sup> Relative humidity for the A3 storage condition vary to widely between different situations to be represented by a single set of conditions.

<sup>6</sup> Values are only found in NATO STANAG 4370, AECTP 230.

**Tabella 1.** Classificazione delle condizioni climatiche e dei valori giornalieri estremi di temperatura, radiazione solare e umidità relativa, secondo MIL-STD-810H (2019), Approved for public release; distribution is unlimited.

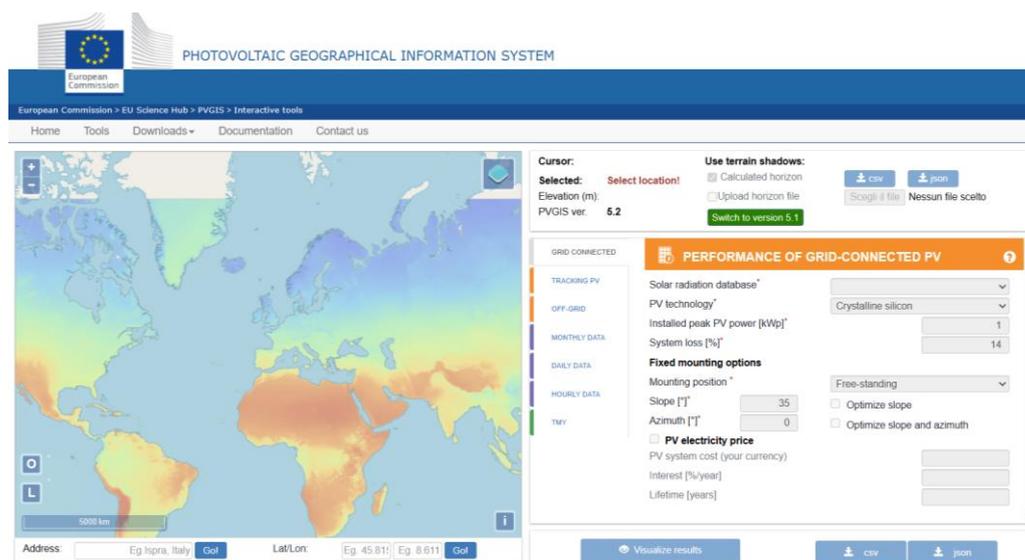
### 2.2.2 Valutazione della risorsa solare

Come già detto ad inizio della sezione, è fondamentale conoscere la risorsa solare di un sito destinato ad ospitare un sistema fotovoltaico poiché la radiazione solare è il combustibile dell'impianto fotovoltaico. Ci sono diverse fonti da cui attingere informazioni sulla radiazione solare e, tra esse, si evidenzia il seguente sito. Il Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS, 2023) è un sito della Commissione Europea che fornisce informazioni sulla radiazione solare e sulle prestazioni degli impianti fotovoltaici per qualsiasi località dell'Europa e dell'Africa, oltre che per gran parte dell'Asia e dell'America. Le principali caratteristiche del sito sono le seguenti:

- Accesso libero e gratuito al potenziale di produzione di energia elettrica da fotovoltaico per diverse tecnologie e configurazioni;
- Disponibile in inglese, francese, italiano, spagnolo e tedesco;
- Nessuna registrazione richiesta;
- Ampia documentazione di supporto;
- API per esigenze di accesso rapido e automatizzato;
- Mappe delle risorse solari e del potenziale fotovoltaico, per Paese o regione, in file pronti per la stampa.

La Figura 1 riporta la schermata iniziale di PVGIS, suddivisa in due colonne. La colonna a sinistra mostra la mappa, che può essere ingrandita o rimpicciolita secondo le proprie necessità, e consente di selezionare il punto di interesse sia inserendo le coordinate geografiche (latitudine e longitudine), sia cliccando col mouse su un punto della mappa. Si evidenzia che la mappa usa un codice a colori che consente di distinguere immediatamente le aree a maggiore radiazione solare da quelle a minore radiazione.

La colonna a destra si abilita solo dopo la selezione del punto di interesse e consente di inserire alcuni dati di input, legati alla tipologia (connesso in rete o in isola, con/senza inseguimento solare, ecc.) e alla potenza nominale del generatore fotovoltaico. Focalizzando l'attenzione sulla parte centrale della Figura 1 si osservano i diversi risultati di output che si possono ottenere: dati mensili, dati giornalieri, dati orari e tipico anno meteorologico. Ovviamente, il sistema restituisce anche l'energia prodotta mese per mese, sulla base dei dati storici di radiazione solare degli ultimi 10-15 anni.



**Figura 1.** Schermata di PVGIS della Commissione Europea per la risorsa solare.

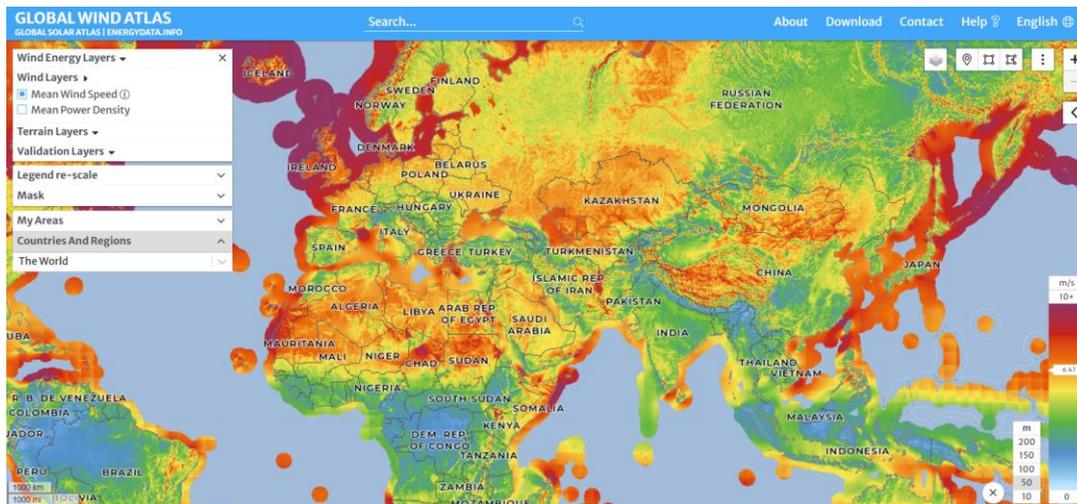
### 2.2.3 Valutazione della risorsa eolica e localizzazione

Al pari della risorsa solare della precedente sezione, è indispensabile anche la valutazione delle risorse eoliche e di stima della produzione energetica del sistema eolico, da effettuarsi nella fase di pianificazione. Sebbene continui a migliorare nel tempo, la qualità dei dati sulle risorse eoliche può variare notevolmente tra i vari database e all'interno di essi, e spesso i dati di alta qualità non sono disponibili per le località più remote. I dati migliori provengono da misurazioni effettive del sito raccolte all'altezza della turbina eolica prevista nel corso di almeno un anno, e in genere di più anni, per cogliere non solo la variabilità giornaliera e stagionale, ma anche quella inter-annuale di un sito. Questo livello di certezza è necessario per finanziare grandi parchi eolici, ma se si può tollerare una maggiore incertezza, si possono utilizzare stime molto più semplici (Naughton et al., 2021).

Il Global Wind Atlas (World Bank, 2023) è uno strumento di stima delle risorse eoliche e della produzione energetica delle turbine eoliche, disponibile gratuitamente sul web. L'Atlante eolico globale fornisce ai pianificatori le seguenti informazioni e funzionalità in formato online e scaricabile (Naughton et al., 2021):

- copertura globale onshore e copertura offshore fino a 200 km dalla costa;
- mappatura delle risorse eoliche con una spaziatura orizzontale di 250 m e ad altezze di 10, 50, 100, 150 e 200 m dal suolo/livello del mare;
- valutazione della risorsa eolica in un punto, in un'area personalizzata o all'interno di un Paese o di una unità amministrativa (ad esempio, Stato, provincia);
- valutazione della variabilità della risorsa vento per anno, mese e ora;
- inserimento di una curva di potenza della turbina eolica personalizzata per ottenere una stima della produzione di energia per un punto o area definita;
- produzione di energia per qualsiasi punto o area definita;
- possibilità di scaricare i dati in formato GIS (Geographic Information System) per essere utilizzati in altre piattaforme di analisi.

Alcune di queste caratteristiche possono risultare di interesse limitato per l'Air Expeditionary, ma dimostrano la potenzialità dello strumento che potrà essere usato in futuro anche per altre esigenze militari. La Figura 2 mostra la schermata iniziale del Global Wind Atlas, che utilizza il codice a colori descritto nella barra laterale. Al colore rosso corrisponde la massima ventosità, mentre il colore celeste individua le zone a più bassa ventosità.



**Figura 2.** Schermata di Global Wind Atlas della risorsa eolica.

Una volta presa la decisione di installare un sistema eolico ci sono ulteriori considerazioni da fare quando si sceglie la posizione esatta dell'installazione di una turbina eolica in un campo base. Questo tema è noto come localizzazione o *siting*. Le caratteristiche fisiche dell'area locale e del campo base possono influire sul flusso del vento e quindi sulle prestazioni di una turbina eolica. La vegetazione e le strutture possono ostruire il flusso del vento e le caratteristiche topografiche (colline o valli) possono accelerare e dirigere il vento in una determinata direzione. È improbabile che i metodi di raccolta dati a lungo termine comunemente utilizzati nello sviluppo commerciale siano fattibili nel processo di pianificazione militare, ma l'uso di una guida qualitativa più semplice per le valutazioni in loco può essere utile (Wegley et al., 1980).

Un secondo riferimento bibliografico per il processo di valutazione del sito delle turbine eoliche è stato proposto da Olsen e Preus (2015) e pubblicato dal *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Il documento è rivolto alle installazioni commerciali di piccoli impianti eolici, ma gran parte delle indicazioni sono applicabili anche per applicazioni militari. Essendo un documento più recente del precedente, contiene anche riferimenti più aggiornati ai fornitori di dati commerciali e alcuni casi di studio recenti.

Per missioni di lunga durata o se le attrezzature o le capacità sono disponibili, esistono metodi aggiuntivi per valutare la risorsa eolica locale con maggiore precisione, per posizionare in modo ottimale una turbina eolica per la massima produzione. Le misurazioni della velocità del vento possono essere effettuate con torri meteorologiche temporanee, unità lidar, che utilizzano metodi di telerilevamento per misurare la velocità del vento dal terreno e, eventualmente, anche droni con sensori e software specializzati per elaborare la velocità del vento durante il volo. Sono, inoltre, disponibili o in fase di sviluppo strumenti

software che forniscono le valutazioni dell'impatto della topologia locale e delle ostruzioni, ma richiedono competenze e formazione specifiche per essere utilizzati in modo efficace (Naughton et al., 2021).

### **2.3 Programmazione delle attività standard per ottimizzare i consumi energetici**

Ottimizzare i consumi energetici è un obiettivo di gestione energetica, che dovrebbe essere perseguito in qualunque contesto, quindi, sia nella propria abitazione sia in contesto aziendale sia in contesto militare. Questo obiettivo è la base della sostenibilità dell'utilizzo della risorsa energetica perché consente di risparmiare energia, in quanto la si utilizza solo quando serve, per il solo quantitativo necessario e per il solo tempo necessario. In condizioni di *Air Expeditionary*, che richiede il raggiungimento di un luogo per esigenze non pianificate da lungo tempo, la necessità di ottimizzare l'energia disponibile diventa un elemento imprescindibile per una lunga serie di motivazioni: limitazione dei quantitativi trasportabili su singolo aeromobile, non garantita possibilità di accedere a fonti terze di alimentazione energetica sul sito ospitante, possibili condizioni climatiche estreme per le attrezzature elettriche che riducono le prestazioni energetiche e così via.

Ciò premesso, l'ottimizzazione dei consumi energetici si basa su tre diversi aspetti: efficienza energetica dei componenti e dispositivi elettrici, gestione dell'impianto elettrico o sue parti, organizzazione delle attività. Questa sezione tratta dell'ultimo aspetto, cioè della organizzazione delle attività del campo base, ai fini dell'ottimizzazione energetica.

Le attività in un campo base di *Air Expeditionary* non possono ovviamente essere programmate e condotte col fine prioritario di ottimizzare il consumo di energia elettrica, essendo ben altre le priorità. Alcune attività, tuttavia, quanto meno in sede di programmazione, possono essere organizzate per l'ottimizzare l'utilizzo di energia. In linea di principio, bisogna utilizzare il più possibile l'energia solare o eolica, quando essa viene prodotta, perché l'immagazzinamento di energia in batteria e la seguente scarica della batteria provocano perdite di energia. In altre parole, l'energia presa dalle batterie è sempre inferiore di quella che era stata precedentemente prodotta ed immessa nella batteria. Considerando che la radiazione solare è massima a metà giornata, dalle 11.00 alle 15.00, quell'intervallo di tempo dovrebbe essere utilizzato per le attività energivore. L'attività di mensa, ad esempio, può essere pianificata all'interno di quella fascia oraria, con l'accortezza della contemporaneità massima. In altre parole, bisogna programmare l'attività di mensa in modo tale che la sala mensa sia piena per il minor tempo possibile piuttosto che sia semi-piena per un periodo lungo, in quanto alcuni consumi come l'illuminazione dipendono dal tempo di funzionamento piuttosto che dalla numerosità dei presenti. Per

motivi analoghi, i sistemi di raffrescamento e riscaldamento dovrebbero essere concentrati per gli spazi e i tempi necessari al funzionamento delle diverse attività. Bisogna, inoltre, accorpare le funzioni che possono essere svolte in parallelo, in modo da concentrare i consumi in intervalli prefissati e in modo che i consumi energetici siano utili per il numero più ampio di addetti.

Questi suggerimenti non tengono conto delle possibili e diversificate criticità di un campo base militare, che solo il Committente può valutare sulla base delle proprie conoscenze e competenze. Tuttavia, in generale, l'approccio da seguire dovrebbe essere di suddividere tutte le attività del campo base in attività pianificabili e attività non pianificabili. Per quelle pianificabili, l'organizzazione delle attività consente certamente un risparmio energetico ed una ottimizzazione dell'utilizzo di energia prodotta da FER.

Infine, una valida strategia è quella di segmentare le attività dell'operazione in funzione dell'alimentazione energetica necessaria, come nel seguente esempio:

1. Alimentazione di mezzi da combattimento e strutture di assoluta necessità/emergenza/urgenza, che richiede alimentazione stabile, sicura e sufficiente;
2. Alimentazione di strutture con attività programmabile (tende da notte, mensa, servizi igienici, ecc.);
3. Alimentazione di strutture di comunicazione o altre apparecchiature (smartphone, gps, segnalatori), tipicamente poco energivore;
4. Alimentazione di dispositivi portatili dei militari (gps, sistemi di comunicazione). Ogni militare potrebbe essere dotato di pannello arrotolabile per situazioni di emergenza;
5. Alimentazione di veicoli elettrici non finalizzati ad azioni sul campo, ma ad utilizzi non rischiosi né di emergenza.

## **2.4 Approccio multi-obiettivo per l'utilizzo delle risorse energetiche**

L'utilizzo di risorse energetiche in un campo militare deve essere tenuto in grande considerazione, perché le risorse energetiche possono essere limitate. Il vantaggio dell'utilizzo di un sistema elettrico composto da impianto fotovoltaico, impianto eolico e pacco batteria consiste nella incontrollabile disponibilità del combustibile (radiazione solare per il sistema fotovoltaico e ventosità per il sistema eolico). In altre parole, la radiazione solare e la ventosità di un sito non sono sotto il controllo di alcuno e sono disponibili anche in territori ostili. Nondimeno, tali risorse devono essere adeguatamente utilizzate, per garantire il costante, corretto ed efficace supporto alle attività del campo base. Il proficuo utilizzo delle risorse energetiche deve basarsi su un approccio multi-obiettivo, il cui punto di

equilibrio tra esigenze a volte contrastanti è trovato nel perseguimento/raggiungimento dei target prioritari. Questo implica che, nel tempo, le priorità del campo base possono cambiare e, conseguentemente, anche gli obiettivi dovranno essere rimodulati. Quindi, l'approccio multi-obiettivo non è statico, ma è intrinsecamente dinamico, dovendosi adattare alle esigenze su campo, che possono variare anche molto rapidamente. Oltre che dinamico e veloce, l'approccio multi-obiettivo deve essere anche flessibile, in modo da adattarsi ad esigenze differenti, anche se le priorità restano le stesse. Definite le caratteristiche di un approccio multi-obiettivo, si possono individuare i seguenti punti-chiave:

- **Bilanciamento tra fonti rinnovabili:** monitorare costantemente le prestazioni dell'impianto fotovoltaico e dell'impianto eolico, utilizzando dati meteorologici e previsioni per pianificare l'uso ottimale di entrambe le fonti, in modo da massimizzare la produzione di energia da fonti rinnovabili;
- **Gestione intelligente della batteria:** implementare un sistema avanzato che bilanci l'accumulo e il rilascio di energia in base alle esigenze dell'installazione, utilizzando algoritmi di ottimizzazione, per massimizzare la durata della batteria e minimizzare le perdite;
- **Monitoraggio e riduzione del consumo energetico:** utilizzare sensori e sistemi di monitoraggio per identificare i picchi di consumo energetico, introducendo politiche di gestione dell'energia che promuovano l'efficienza e l'uso consapevole dell'energia elettrica;
- **Addestramento e sensibilizzazione:** Coinvolgere il personale militare e non, presente nel campo base, nell'ottimizzazione dell'uso dell'energia, fornendo addestramento e informazioni sulle pratiche energetiche efficienti e promuovendo una cultura di consapevolezza energetica all'interno del campo;
- **Tecnologie emergenti:** aggiornamento costante sulle nuove tecnologie nel settore energetico, valutando la possibilità di integrare soluzioni avanzate come sistemi di storage all'avanguardia, reti intelligenti o altre innovazioni che possano migliorare ulteriormente l'efficienza energetica;
- **Integrazione con reti esterne:** quando possibile, considerare l'integrazione del sistema energetico del campo con reti esterne. Questo potrebbe consentire di sfruttare risorse energetiche esterne e migliorare la flessibilità complessiva del sistema energetico *dell'Air Expeditionary*. Tuttavia, come già riportato nella sezione 2.1.7. Robustezza/Vulnerabilità, la connessione a reti terze deve essere massimamente sicura per evitare cyberattacchi o intrusioni nel sistema informativo;

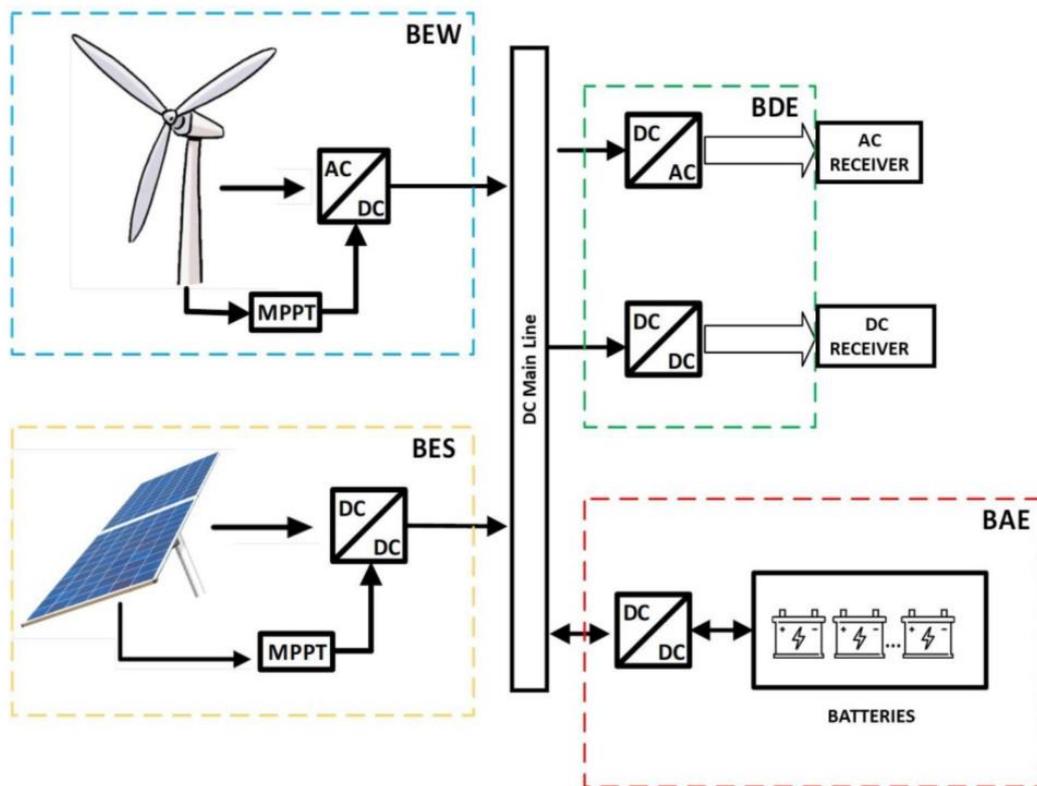
- **Automazione e controllo remoto:** implementare sistemi di automazione e controllo remoto per gestire in modo ottimale l'erogazione dell'energia. Questi sistemi consentono di adattare la produzione e la distribuzione in tempo reale in risposta alle variazioni delle condizioni atmosferiche, dei carichi e delle esigenze operative. Essi consentono, inoltre, di monitorare i consumi e valutarne i trend, aumentando la consapevolezza del consumo energetico;
- **Manutenzione preventiva:** pianificare la manutenzione preventiva per garantire che tutti gli elementi del sistema (moduli FV, turbine eoliche, batterie) siano in condizioni efficienti. La manutenzione preventiva può contribuire a prevenire guasti e garantire un funzionamento continuo. In particolare, i moduli devono essere costantemente osservati e, se necessario, puliti, considerando l'alta probabilità che un campo possa essere installato in zona polverosa. La polvere depositata sui moduli può ridurre significativamente la prestazione energetica;
- **Misurazione delle prestazioni:** implementare sistemi di monitoraggio delle prestazioni a lungo termine per valutare l'efficacia delle strategie, analizzando i dati per apportare miglioramenti continui e ottimizzare ulteriormente le prestazioni del sistema nel tempo. Questo punto è in sinergia con il precedente punto Automazione e controllo remoto;
- **Collaborazione con esperti di energia:** consultare professionisti del settore per ottenere valutazioni indipendenti, suggerimenti e soluzioni per il miglioramento delle prestazioni energetiche sulla base di dati acquisiti sul campo base in precedenti operazioni militari;
- **Formazione continua del personale:** prevedere addestramento e formazione su nuove tecnologie e procedure per il personale direttamente coinvolto nell'esercizio e manutenzione del sistema energetico. La formazione continua può massimizzare l'efficienza operativa e garantire che il personale sia in grado di utilizzare al meglio le risorse energetiche disponibili;
- **Implementazione di tecnologie smart:** implementare tecnologie smart, come sensori intelligenti e sistemi di gestione energetica, al fine di automatizzare processi decisionali complessi e migliorare l'efficienza energetica;
- **Risposta a situazioni di crisi:** elaborare piani dettagliati per la gestione dell'energia in situazioni di crisi o di emergenza. La capacità di rispondere rapidamente e in modo efficiente a situazioni critiche è fondamentale per mantenere la sicurezza e l'operatività del campo base;

- **Benchmarking con altre installazioni:** confronta le prestazioni energetiche di un campo con altre installazioni simili. Il benchmarking può rivelare *best practices* e aree di miglioramento, contribuendo a mantenere il sistema all'avanguardia. In generale, lo studio delle pregresse esperienze e il confronto dei dati possono rilevare importanti informazioni per l'aggiornamento delle procedure e dell'organizzazione sul campo (ad esempio, modifica degli orari di mensa);
- **Valutazione periodica delle strategie:** controllare e aggiornare le strategie in base ai cambiamenti nelle tecnologie e nelle esigenze operative del campo. Un approccio dinamico e flessibile garantirà la massima efficienza nel lungo termine.

I precedenti punti-chiave sono quelli principali, a parere dell'autore, per un approccio multi-obiettivo all'utilizzo delle risorse energetiche di un campo base militare. Sicuramente il Committente, sulla base di esperienze pregresse, può individuare altri punti-chiave a completamento della precedente lista. L'implementazione di questo approccio multi-obiettivo richiede, infine, una pianificazione accurata, una gestione attiva e un impegno costante per adattarsi alle condizioni in evoluzione. La combinazione di strategie mirate a diversi obiettivi consente di ottenere un sistema energetico più efficiente, resiliente e sostenibile nel contesto specifico di un campo militare.

### 3. Tecnologie smart energy attualmente disponibili

Questa sezione introduce le tecnologie attualmente fruibili, che possono essere agevolmente utilizzate per l'*Air Expeditionary*, ovvero prodotti commercialmente disponibili, che garantiscono flessibilità di utilizzo, interoperabilità tra sistemi, rapidità degli interventi di manutenzione e sostituzione, elevata disponibilità del bene e del servizio connesso. La Figura 3 riporta uno schema concettuale (Fraczek et al., 2022) di un sistema elettrico costituito da sistema fotovoltaico, sistema eolico e batteria. È agevole notare che ciascuno dei tre sistemi è connesso ad un elemento comune (*DC Main Line*) tramite apposito convertitore, che ha la funzione di riportare tutti e tre i sistemi ad uno stesso valore di tensione continua, consentendo quindi la connessione in parallelo. Dalla *DC Main Line* è possibile alimentare sia carichi in corrente costante, tramite un ulteriore convertitore DC-DC, sia carichi in corrente alternata, tramite un convertitore di tipo DC-AC.



**Figura 3.** Schema concettuale di sistema elettrico eolico-fotovoltaico, supportato da batteria (Fraczek et al., 2022). Articolo *open access* distribuito sotto le condizioni della Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Altro elemento particolare è il convertitore DC-DC connesso alle batterie. Si osserva che esso è bidirezionale rispetto alla *DC Main Line*, evidenziando che la batteria assorbe energia durante la carica e la eroga durante la scarica. Il convertitore DC-DC del sistema

FV è, invece, unidirezionale rispetto alla *DC Main Line*, poiché il sistema FV può solo erogare energia. Lo stesso accade per il sistema eolico, ad eccezione del fatto che esso è collegato con un convertitore AC-DC alla *DC Main Line*, perché tipicamente un sistema eolico produce energia elettrica in corrente alternata. La Figura 4 riporta un modello di sistema integrato modulare FV-eolico della HCI Energy (a) e un modulo FV trasportabile della Solar Alpha Engine (b), mentre la Figura 5 riporta il rendering del concept di un campo base, evidenziando una possibile dislocazione dei diversi impianti (Naughton et al., 2021)

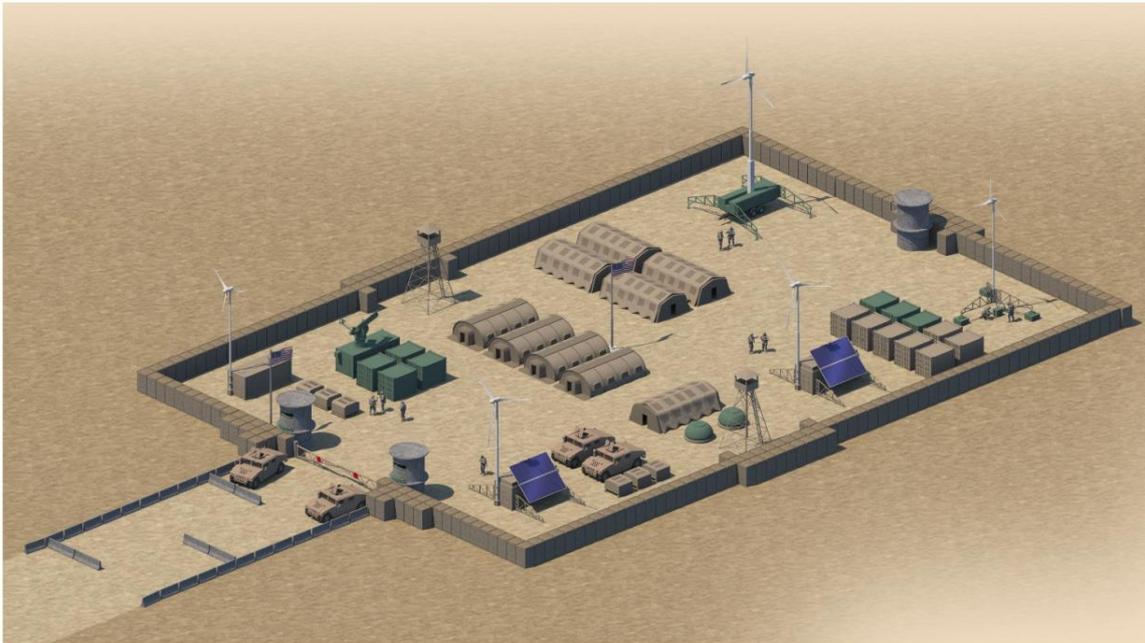


(a)



(b)

**Figura 4.** (a) Sistema modulare integrato fotovoltaico-eolico della HCI Energy. (b) sistema FV trasportabile della Solar Alpha Engine.



**Figura 5.** Rendering del concept di un campo base con sistema *smart energy*.

### **3.1 Stato dell'arte sulle tecnologie attualmente disponibili**

Questa sezione affronta gli aspetti tecnici dei sistemi *smart energy* per l'*Air Expeditionary*. Le tecnologie proposte riguardano essenzialmente il sistema fotovoltaico (FV), il sistema eolico e il sistema di accumulo. All'interno dei sistemi solari per la produzione di energia elettrica ci sono anche i cosiddetti concentratori solari, che non sono considerati in questa relazione, perché funzionanti esclusivamente in presenza di radiazione diretta, mentre i moduli FV producono energia anche in caso di cielo nuvoloso, perché operativi anche con la sola radiazione diffusa.

#### **3.1.1 Tecnologie fotovoltaiche**

I sistemi fotovoltaici convertono l'irraggiamento solare in elettricità in corrente continua (DC) utilizzando dispositivi a semiconduttore. Il modulo FV, insieme alla risorsa solare e agli altri componenti del sistema, determinerà le prestazioni dell'impianto FV.

Data la variabilità della risorsa solare, è necessaria una combinazione di gestione dell'energia e di accumulo di energia per ottimizzare l'intero sistema (Anderson et al., 2011).

I semiconduttori tipicamente utilizzati per i moduli fotovoltaici sono il silicio (cristallino, policristallino e amorfo), il diseleniuro di rame e indio (CIS), il cadmio-tellurio (CdTe), l'arseniuro di gallio (GaAs). Le tecnologie a film sottile includono celle in silicio amorfo (a-Si), CIS o CdTe. A volte le celle sono unità fisicamente separate, come nel caso delle celle in silicio cristallino e policristallino. In altri casi, le celle sono formate durante la fabbricazione del modulo, come nella maggior parte dei moduli a film sottile. Accanto alle configurazioni

standard si sono affermate, negli ultimi anni, le celle multi-giunzione per aumentare la prestazione energetica. Tipicamente l'efficienza di moduli FV varia tra 10% e 25%, dipendendo soprattutto dal materiale semiconduttore utilizzato oltre che dalla tecnologia di produzione. Oltre ai moduli FV, bisogna tener conto di tutti gli altri componenti necessari al corretto ed efficace funzionamento: l'insieme di questi elementi è chiamato Balance of System (BoS). In esso bisogna considerare il sistema di montaggio dei moduli, l'inseguitore solare, se presente, gli inverter, gli interruttori, i fusibili e i cavi. Senza entrare nel dettaglio di ogni singolo componente citato, si possono evidenziare le principali specificità. L'inseguitore solare consente ai moduli di avere sempre un'esposizione ottimizzata rispetto al sole che rappresenta il combustibile per produrre energia. L'inseguitore solare bi-assiale consente di avere la massima produzione di energia, quello mono-assiale un po' inferiore, mentre la posa fissa ha la prestazione peggiore. È il caso di evidenziare che un inseguitore solare è un nuovo componente, di tipo meccanico, che si aggiunge al sistema a posa fissa; quindi, esso stesso è soggetto ad usura ed a eventuali malfunzionamenti o rotture. Il suo utilizzo, di conseguenza deve essere valutato complessivamente e preso in considerazione quando la maggiore energia prodotta compensa largamente gli svantaggi introdotti. È agevole trovare su internet immagini di inseguitori solari mono-assiali o biassiali, utilizzando anche la parola chiave *tracker*.

Relativamente alla potenza prodotta, i moduli FV producono elettricità in corrente costante (DC), ma la maggior parte degli utilizzatori funzionano con corrente alternata (AC). Questo implica la necessità di un sistema elettronico di potenza che converta la corrente in DC in corrente in AC. Questo dispositivo è l'inverter che, in funzione della potenza e della configurazione scelta, può essere di tipo monofase o di tipo trifase. Gli altri componenti sono utilizzati per la protezione (fusibili e interruttori) dei componenti e per la connessione tra le diverse parti dell'impianto.

### 3.1.2 Sistemi di accumulo di energia elettrica

L'accumulo di energia viene utilizzato quando l'elettricità è necessaria in un momento diverso da quello in cui è stata generata o a un livello di potenza superiore a quello possibile con l'apparecchiatura di generazione elettrica (Anderson et al., 2011). Questa sezione prende in considerazione le opzioni di accumulo di energia che si traducono in una produzione di energia elettrica, in quanto esistono opzioni di accumulo di energia non elettrica, come i volani e i compressori. L'accumulo termico, invece, è quello utilizzato con i sistemi solari a concentrazione, che, come già detto, non sono trattati in questa relazione, poiché producono energia dalla sola radiazione diretta; quindi, richiedono condizioni di

installazioni ben precise e non compatibili con la flessibilità necessaria ad operazioni di tipo *Air Expeditionary*.

La Tabella 2 (Anderson et al., 2011) illustra le caratteristiche principali delle diverse tipologie di batterie. Sono riportati anche i super-condensatori e le ultra-batterie, anche se non sono considerati in questa relazione, perché tipicamente utilizzati per picchi di potenza e non per esigenze energetiche.

<b>Tipologia</b>	<b>Descrizione</b>
Piombo acido (Pb)	Batteria elettrochimica con tecnologia matura, a basso costo iniziale, con una durata ragionevole dell'ordine dei 1.000 cicli, utilizzata sia per applicazioni di potenza che di energia.
Nickel-cadmio (NiCd)	Batteria elettrochimica con tecnologia matura, costo iniziale più elevato di quella al piombo, migliore durata del ciclo, utilizzata in applicazioni sia energetiche che di potenza, soprattutto in ambienti freddi.
Nickel metal idrato (NiMH)	Batteria elettrochimica a base di nichel con prestazioni migliori in termini di potenza ed energia/peso.
Ioni di litio	Le batterie a base di litio offrono prestazioni migliori in termini di potenza ed energia rispetto al peso e al volume. Ottime per le applicazioni di potenza. Sono quelle largamente utilizzate per applicazioni smart energy di interesse per l'Air Expeditionary.
Sodio solfuro (NaS)	Disponibili in commercio, funzionano a circa 300°C nella gamma dei megawatt (MW) per un massimo di 4 ore. Non utili per applicazioni Air Expeditionary.
Batterie metallo-aria	Batteria allo stato solido ad alta potenza. Alcuni tipi di batterie non sono ricaricabili. Non utili per applicazioni Air Expeditionary.
Super condensatori	Dispositivi a stato solido ad altissima potenza ma non ad elevata energia. Non utili per applicazioni Air Expeditionary.
Ultra-batterie	Combinazione di un super-condensatore e di una batteria al piombo per una maggiore potenza, pur mantenendo le prestazioni energetiche della batteria al piombo.

**Tabella Z.** Descrizione di batterie e super-condensatore.

A questo riguardo è bene chiarire la differenza tra potenza ed energia, utile per comprendere anche altri aspetti trattati nella relazione. La potenza è l'energia assorbita in un istante, mentre l'energia è l'insieme di tutte le potenze assorbite nel tempo considerato. Come esempio pratico, si può considerare il contratto di fornitura di energia elettrica della propria abitazione. Nella maggioranza dei casi, ogni utente privato ha un contratto di potenza di 3 kW col distributore di energia. Ciò significa che ogni volta che si supera quella soglia di potenza, l'interruttore di massima potenza sgancia il contatore e l'abitazione viene disalimentata per motivi di sicurezza. Anche se la potenza massima che l'utente può assorbire in un istante è la stessa (3 kW), l'energia assorbita in un mese (somma delle energie giornaliere, a loro volta somma delle energie orarie e così via) è solitamente diversa da quella del mese successivo e del mese precedente. Questo è il motivo per cui, a parità di potenza contrattualizzata col distributore (3 kW), il costo della bolletta è differente, essendo differente l'energia assorbita. Tutto ciò dipende, ovviamente, dalla numerosità e potenza unitaria dei dispositivi elettrici in funzione. Più dispositivi di elevata potenza si mettono in funzione, più velocemente si raggiunge la soglia dei 3 kW, che abilita lo sgancio dell'interruttore di protezione. Questa sintetica descrizione della differenza tra potenza ed energia spiega perché non sono considerati i super-condensatori in questa relazione, in quanto non funzionali alle esigenze di energia del campo base, per quelle che sono le informazioni disponibili all'Autore. Resta inteso che, nel caso in cui nel campo base è presente qualche dispositivo che può necessitare di elevata potenza quasi istantaneamente, l'opzione del super-condensatore dovrebbe essere presa in considerazione dal responsabile del sistema *smart energy*.

È agevole trovare su internet e in riviste specializzate i diagrammi potenza-energia dei sistemi di accumulo, in cui sono evidenziati i limiti di energia e potenza per ciascuna tecnologia. Spesse volte sono indicati per unità di peso o di volume, in modo da confrontare le diverse tecnologie, indipendentemente dalla potenza dei singoli dispositivi.

Di solito, i sistemi di accumulo sono scelti in funzione dell'applicazioni di destinazione che variano dall'alta potenza per brevi periodi (da pochi secondi a 15 minuti) all'energia per lunghi periodi (da ore a giorni). I sistemi di accumulo di energia per la qualità dell'alimentazione, compresi i gruppi di continuità (UPS), forniscono, ad esempio, un'elevata potenza per brevi periodi, da millisecondi a minuti (Anderson et al., 2011). Le applicazioni a supporto delle uscite dei sistemi fotovoltaici o eolici funzionano per periodi medi, da pochi secondi a diverse ore. È questo il caso di operazioni *dell'Air Expeditionary*. Le applicazioni di accumulo di energia, come le applicazioni off-grid o le microgrid isolate, richiedono sistemi in grado di scaricarsi per 1-3 giorni, ma non sono di interesse per *l'Air Expeditionary*.

Per ogni applicazione possono esserci ulteriori requisiti critici, come il peso o il volume (già considerato nella sezione 2.1.1 Trasportabilità) e le spese di manutenzione e riparazione.

L'*Operation and Maintenance* (O&M) deve essere valutato attentamente per garantire che siano disponibili le competenze tecniche per soddisfare le esigenze dei sistemi di accumulo di energia selezionati. Tutti i sistemi di accumulo di energia presentano molti pericoli e rischi che possono essere ridotti al minimo attraverso una corretta progettazione, installazione, funzionamento, manutenzione e smaltimento. Il tema della sicurezza delle batterie è stato già discusso nella sezione 2.1.1 Trasportabilità e 2.1.9 Safety.

Qualche ulteriore nota è da dedicare alle batterie al litio che sono oggi largamente utilizzate ad integrazione dei sistemi fotovoltaici ed eolici.

Le batterie al litio hanno nomi come ioni di litio, litio metallico, litio ferro fosfato e polimero di litio. Il nome dipende dal produttore o dalla struttura interna che distingue una particolare batteria dalla moltitudine di batterie al litio. La maggior parte dei pacchi di batterie al litio richiede circuiti di carica interni per evitare il salto termico e la rottura delle celle. I circuiti di carica prevengono condizioni quali la sovratemperatura, il sovraccarico e l'eccesso di pressione interna (Anderson et al., 2011).

L'efficienza di carica/scarica è dell'80%-90%, mentre il tasso di autoscarica è del 5% - 10% al mese, migliore rispetto alle batterie NiMH che si auto-scaricano più rapidamente. La densità di energia in peso e volume è significativamente superiore a quella delle batterie al piombo. Tipicamente le batterie sono connesse in serie per aumentare la tensione e/o in parallelo per aumentare la corrente. Combinandoli insieme, si aumenta rapidamente la potenza che è pari al prodotto tra la tensione della serie e la corrente del parallelo.

Diverse aziende stanno sviluppando batterie al litio di grandi dimensioni per applicazioni su scala *utility*, che non sono di interesse di un'operazione *Air expeditionary*, poiché le potenze necessarie a questo tipo di operazione militare sono significativamente inferiori a quelle *utility scale*, anche per un campo base da 1000 o 2000 addetti.

### 3.1.3 Tecnologia eolica

Le turbine eoliche sono usualmente classificate per potenza o per tecnologia costruttiva. Dal punto di vista costruttivo, esistono due principali tipologie di turbine eoliche: le turbine eoliche ad asse orizzontale (HAWT, cioè *horizontal axis wind turbines*) e le turbine eoliche ad asse verticale (VAWT, cioè *vertical axis wind turbines*) (Anderson et al., 2011). In generale, le HAWT sono le più comuni tra le tecnologie di turbine eoliche e sono

tipicamente tri-pala, cioè, aventi tre pali che raccolgono il vento trasformandolo in energia elettrica. Sebbene esistano diverse varietà di VAWT, esse sono meno efficienti delle HAWT, mediamente hanno un maggiore costo per kW di potenza, necessitano di più sofisticati sistemi di controllo e hanno maggiori costi di O&M. Queste caratteristiche hanno limitato la diffusione delle VAWT rispetto alle HAWT. I generatori eolici convertono l'energia del vento in elettricità attraverso un generatore a trasmissione diretta o più frequentemente attraverso un moltiplicatore-generatore-convertitore. Poiché la corrente alternata prodotta dalla turbina eolica ha una frequenza variabile (le utenze, invece, richiedono una frequenza fissa a 50 hertz), la corrente viene prima convertita in corrente continua e poi invertita in corrente alternata alla frequenza di rete. Per piccole turbine, l'inverter è parte integrante dell'unità, mentre per potenze maggiori l'inverter è separato.

Tipicamente le HAWT sono posizionate sopravento. Poiché devono essere orientate verso il vento le turbine di piccola potenza utilizzano, inoltre, un meccanismo di imbardata passivo (simile a una banderuola), mentre quelle di dimensioni maggiori usano un meccanismo attivo di imbardata che ruota la turbina in modo da raccogliere il massimo vento. Le turbine non possono lavorare in qualunque condizione di ventosità. In caso di venti troppo deboli, la produzione di energia è quasi completamente utilizzata per compensare le perdite. In caso di venti forti, invece, si presentano problemi di tenuta strutturale, quindi, ogni turbina ha un valore-soglia di massima ventosità, superato il quale è necessario bloccare la turbina, mettendola a sfavore di vento, in modo da non raccogliere il vento e non ruotare. Le turbine eoliche di piccole dimensioni (le uniche di interesse per l'Air Expeditionary) possono variare notevolmente in termini di dimensioni e forma. Le torri possono variare da 10m per una turbina da 1 a 3 kW a 40m per una turbina da 100 kW. I diametri di rotazione possono variare da 2m per una turbina da 1 kW a 21m per una turbina da 100 kW (Anderson et al., 2011). A parità di sito di installazione, tipicamente la ventosità aumenta man mano che ci si allontana dal suolo, ma non ha molto senso utilizzare una piccola turbina su un palo molto alto, per motivazioni che esulano dallo scopo di questa ricerca. Basti pensare che la potenza eolica generata da una turbina è proporzionale al cubo della velocità del vento. Ciò implica che, se il vento raddoppia, la potenza eolica precedente deve essere moltiplicata per otto. Oltre agli innegabili vantaggi della notevole maggiore produzione di energia, bisogna tener conto anche delle conseguenti maggiori sollecitazioni sull'intera struttura. In generale è bene rispettare le indicazioni del costruttore poiché i pali sono dimensionati in funzione del peso da reggere e delle condizioni operative previste.

A differenza del sistema FV, il sistema eolico risente notevolmente delle condizioni circostanti all'impianto. Nel caso in cui il campo base avesse una collina alle proprie spalle,

la turbina potrebbe raccogliere ben poco vento, anche se i dati di ventosità generale dell'area sono abbastanza alti. Quindi, le informazioni orografiche del sito ospitante il campo base sono parimenti importanti come quelle raccolte dai siti internet di ventosità, di cui si è già trattato nella sezione 2.2.3 *Valutazione della risorsa eolica e localizzazione*.

### **3.2 Progettazione di un'installazione campale aeronautica in modalità smart energy completa dei servizi logistici e operativi di supporto (Air DOB smart energy)**

Questa sezione introduce alcuni concetti basilari per la progettazione di un'installazione campale completa dei servizi logistici e operativi di supporto. Il Committente, sulla base del progetto SEDA di SMA 4° Reparto, ha fornito le planimetrie di due casi-studio che rappresentano la tipologia standard o di maggiore interesse per un campo base. Le due planimetrie dei due casi-studio sono riportate nelle Figure 6 e 7. In particolare, la Figura 6 è riferita ad un campo base che accoglie 180 addetti, mentre la Figura 7 è riferita ad un campo base con 500 addetti.

La premessa fondamentale è che la progettazione di un sistema *smart energy* per l'*Air Expeditionary* richiede una conoscenza approfondita e dettagliata delle esigenze operative e delle attività di un campo base. I concetti basilari e il dimensionamento di massima sono riferiti, quindi, a condizioni generiche. Una progettazione dedicata, invece, dovrà partire da una dettagliata analisi dei carichi elettrici e da una classificazione dei carichi privilegiati per ordine di priorità. In altre parole, bisogna classificare i carichi elettrici in base alla possibilità che uno o più carichi possano essere non alimentati, in caso di limitata disponibilità di energia. Le informazioni necessarie alla classificazione devono essere fornite esclusivamente dal Committente. In generale, la progettazione dell'impianto elettrico per un campo base militare, indipendentemente dalla numerosità di 180 o 500 persone, richiede una pianificazione dettagliata per garantire l'efficienza e la sicurezza delle operazioni.

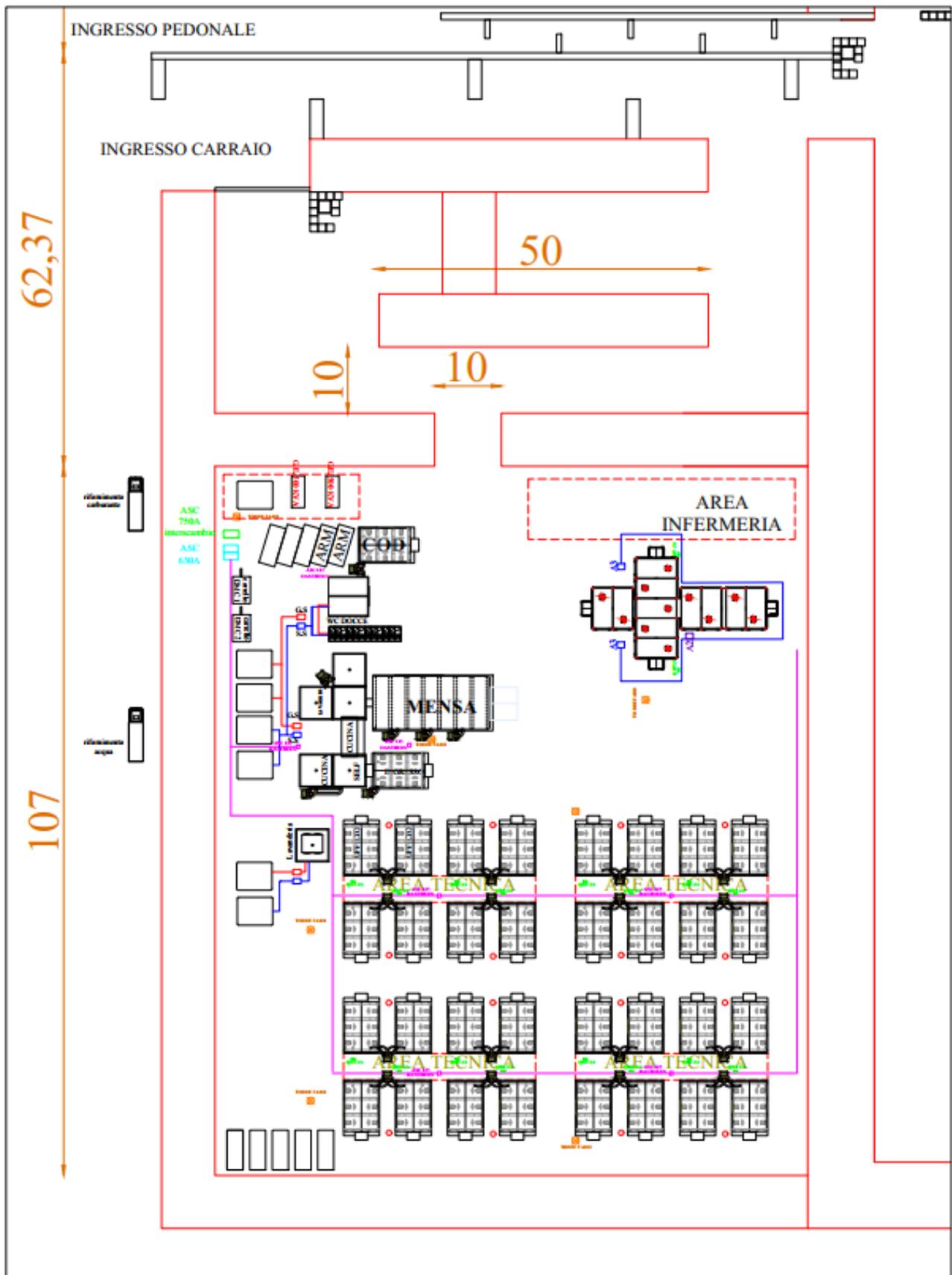


Figura 6. Planimetria di campo base con 180 addetti.

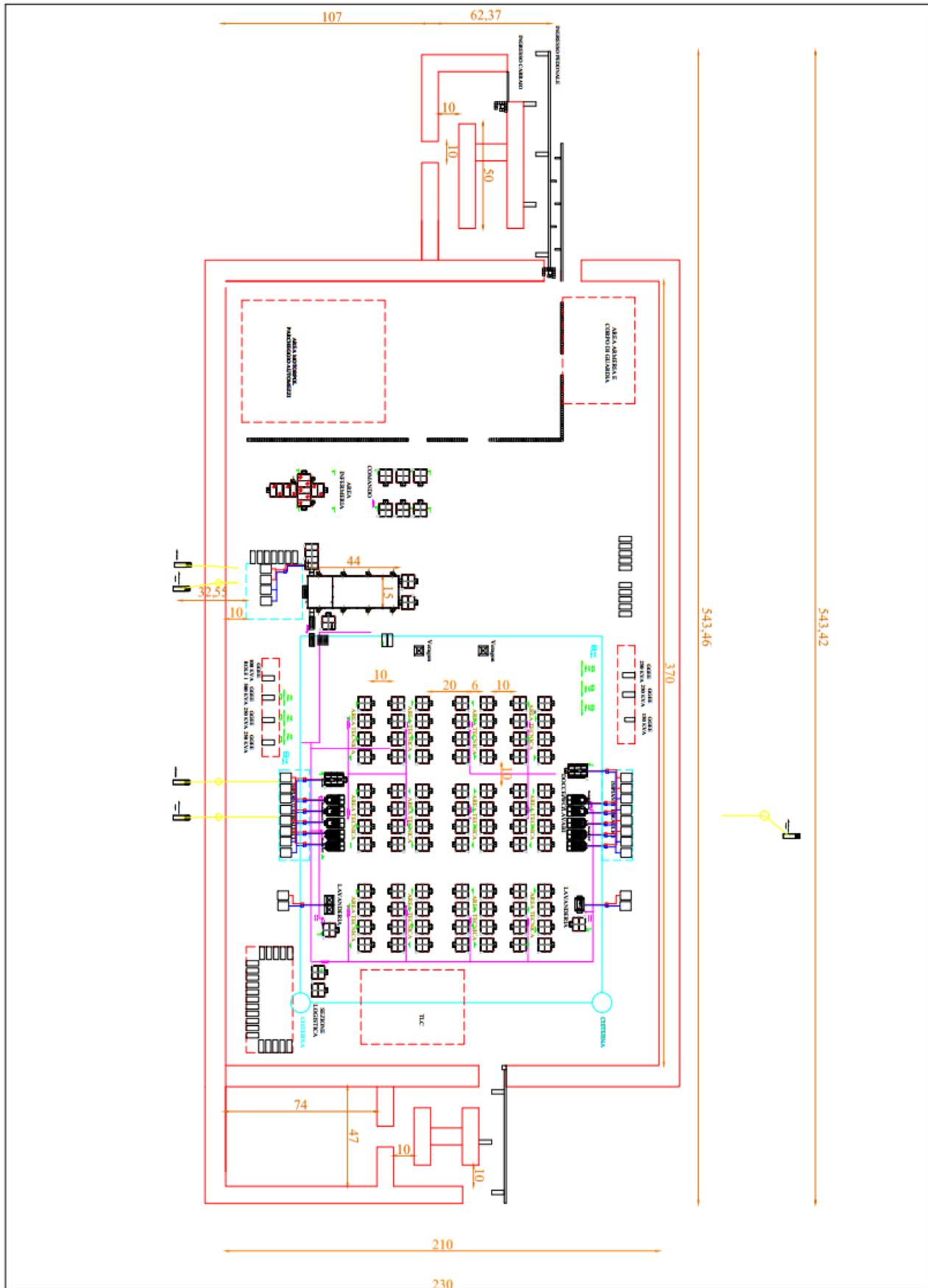


Figura 7. Planimetria di campo base con 500 addetti.

Ciò premesso, i criteri generale sono i seguenti:

1. **Analisi dei carichi elettrici:** Calcolare con precisione il carico elettrico totale previsto per soddisfare le esigenze del campo militare, inclusi i sistemi di illuminazione, il riscaldamento, il raffreddamento, le comunicazioni, le attrezzature mediche, la mensa, gli apparecchi elettronici, eventuali veicoli elettrici e altro. È essenziale dimensionare correttamente il sistema per evitare sovraccarichi. È, inoltre, indispensabile classificare i carichi privilegiati per ordine di priorità di alimentazione energetica;
2. **Sorgenti di generazione:** Definire le fonti di alimentazione disponibili (moduli FV, sistema eolico, batterie e generatori diesel per emergenze) e dimensionare i componenti. Dovrebbero essere previsti sistemi di backup per garantire l'affidabilità dell'alimentazione elettrica;
3. **Distribuzione dell'energia:** Progettare il sistema di distribuzione dell'energia a tutte le aree del campo. Considerare la suddivisione del campo in zone per semplificare la distribuzione. I carichi privilegiati devono avere linee dedicate;
4. **Sicurezza elettrica:** Assicurarsi che l'impianto elettrico rispetti rigorosi standard di sicurezza elettrica per evitare incidenti elettrici. Questo include l'installazione di interruttori automatici e dispositivi di protezione da contatti diretti e da contatti indiretti, come interruttori differenziali, e la corretta messa a terra;
5. **Efficienza energetica:** Ottimizzare l'efficienza energetica dell'impianto elettrico per aumentare la disponibilità di energia da fonte rinnovabile e ridurre il consumo di combustibile, se si utilizzano generatori per casi di emergenza o per backup dei sistemi a Fonte di Energia Rinnovabile (FER). L'uso di apparecchiature a basso consumo energetico e l'implementazione di sistemi di gestione dell'energia possono contribuire a questo scopo;
6. **Cavi e cablaggio:** Scegliere il tipo di cavi e cablaggio adatto alle esigenze del campo, tenendo conto delle distanze e delle condizioni ambientali. La protezione e l'isolamento corretti sono fondamentali. È bene ricordare che tutte le apparecchiature devono tener conto delle condizioni climatiche in cui dovranno operare, come già specificato nella sezione 2.2.1. *Condizioni ambientali*;
7. **Illuminazione:** Progettare sistemi di illuminazione efficienti ed efficaci per garantire la visibilità e la sicurezza nelle ore notturne. L'uso di illuminazione a LED riduce il consumo energetico;

8. **Comunicazioni:** Assicurare che l'impianto elettrico supporti le esigenze di comunicazione del campo militare, inclusi i sistemi di comunicazione radio, le reti dati e i sistemi di sicurezza;
9. **Manutenzione e riparazioni:** Pianificare la manutenzione preventiva dell'impianto elettrico, assicurare l'accesso a parti di ricambio e personale qualificato per le riparazioni in caso di guasti;
10. **Sicurezza fisica:** Proteggere l'infrastruttura elettrica da atti vandalici o di sabotaggio. Questo potrebbe richiedere l'installazione di recinzioni, sistemi di sorveglianza o la posizione strategica degli elementi chiave dell'impianto.

Seguendo i precedenti criteri generali, si è formulata una ipotesi di progettazione per i due campi base, considerando carichi elettrici che, per numerosità e potenza, possano soddisfare i bisogni, rispettivamente, di un campo da 180 addetti e di un campo da 500 addetti. Per addetto si intende sia il personale militare sia il personale non militare presente nel campo base.

### *3.2.1 Caso-studio #1: Sistema smart energy per campo base da 180 addetti*

Questa sezione propone l'applicazione dei concetti basilari di progettazione di un sistema energetico sostenibile per un campo base militare con un numero di addetti pari a 180. L'obiettivo principale è garantire una fornitura stabile e affidabile di energia elettrica per soddisfare i bisogni della mensa, delle camerate, dei veicoli elettrici e di altri dispositivi elettrici nel campo base. L'ipotesi di eventuali veicoli elettrici può essere presa in considerazione per spostamenti di limitata distanza o per addetti che, per loro specifica attività, devono spostarsi molto frequentemente all'interno del campo base. Può essere considerata anche per le necessità di movimento merci interno al campo base. In questo caso, si dovrà considerare un veicolo elettrico con capacità di carico o carrello aggungibile.

La parte più delicata della progettazione dell'impianto elettrico è l'analisi dei carichi elettrici, poiché condiziona tutti i passi successivi. Come già detto, quest'analisi dovrebbe tener conto di carichi privilegiati e relative priorità che solo il Committente può fornire. Come approccio di studio si sono considerati i seguenti carichi con relative potenze:

- Mensa: 20 kW (incluso il riscaldamento e la refrigerazione);
- Camerate: 40 kW (riscaldamento, illuminazione e prese elettriche);
- Veicoli Elettrici: 5 kW (ricarica dei veicoli elettrici);
- Dispositivi Elettrici: 15 kW (computer, comunicazioni, illuminazione);
- Altro (illuminazione esterna, sistemi di sicurezza, ecc.): 5 kW.

Il sistema di alimentazione potrà essere basato su un impianto FV e più batterie per garantire la continuità dell'alimentazione. Ovviamente si potrebbe considerare anche un impianto eolico o una loro combinazione ma, come già detto, ciò dipende dalle condizioni ambientali del sito ospitante e la scelta dovrebbe attenersi a quanto proposto nella sezione 2.2. *Strategie di configurazione dei sistemi smart energy per l'Air expeditionary*. In alcuni casi, infatti, potrebbe essere utile il solo sistema eolico. Quindi, senza perdere di generalità, questa progettazione considera solo l'impianto FV, rimandando ad altri approfondimenti lo studio progettuale di dettaglio.

Per coprire i carichi elettrici, l'impianto FV dovrà avere una potenza totale di almeno 90 kW. Questa potenza tiene conto della variazione stagionale dell'irraggiamento solare e delle perdite. Il posizionamento dei pannelli solari dovrebbe essere suddiviso in diverse aree per sfruttare al meglio l'irraggiamento:

- Area 1 (sul tetto della mensa): 20 kW;
- Area 2 (campo vicino alle camerate): 30 kW;
- Area 3 (parcheggio per veicoli elettrici): 20 kW;
- Area 4 (illuminazione esterna): 20 kW.

Per garantire la continuità dell'alimentazione si possono considerare batterie al litio ad alta capacità, per immagazzinare almeno 100 kWh di energia elettrica.

### 3.2.2 *Caso-studio #2: Sistema smart energy per campo base da 500 addetti*

Questa sezione propone l'applicazione dei concetti basilari di progettazione di un sistema energetico sostenibile per un campo base militare con 500 addetti. L'obiettivo principale è garantire una fornitura stabile e affidabile di energia elettrica per soddisfare i bisogni della mensa, delle camerate, dei veicoli elettrici e di altri dispositivi elettrici nel campo base. L'ipotesi di eventuali veicoli elettrici può essere presa in considerazione per spostamenti di limitata distanza o per addetti che, per loro specifica attività, devono spostarsi molto frequentemente all'interno del campo base. Può essere considerata anche per le necessità di movimento merci interno al campo base. In questo caso, si dovrà considerare un veicolo elettrico con capacità di carico o carrello aggungibile.

La parte più delicata della progettazione dell'impianto elettrico è l'analisi dei carichi elettrici, poiché condiziona tutti i passi successivi. Come già detto, quest'analisi dovrebbe tener conto di carichi privilegiati e relative priorità, che solo il Committente può fornire. Come approccio di studio si sono considerati i seguenti carichi con relative potenze:

- Mensa: 50 kW (incluso il riscaldamento e la refrigerazione);

- Camerate: 100 kW (riscaldamento, illuminazione e prese elettriche);
- Veicoli Elettrici: 12 kW (ricarica dei veicoli elettrici);
- Dispositivi Elettrici: 35 kW (computer, comunicazioni, illuminazione);
- Altro (illuminazione esterna, sistemi di sicurezza, ecc.): 12 kW.

Il sistema di alimentazione potrà essere basato su un impianto FV e più batterie per garantire la continuità dell'alimentazione. Ovviamente si potrebbe considerare anche un impianto eolico o una loro combinazione, ma, come già detto, ciò dipende dalle condizioni ambientali del sito ospitante e la scelta dovrebbe attenersi a quanto proposto nella sezione 2.2. *Strategie di configurazione dei sistemi smart energy per l'Air expeditionary*. In alcuni casi, infatti, potrebbe essere utile il solo sistema eolico. Quindi, senza perdere di generalità, questa progettazione considera solo l'impianto FV, rimandando ad altri approfondimenti lo studio progettuale di dettaglio.

Per coprire i carichi elettrici, l'impianto FV dovrà avere una potenza totale di almeno 220 kW. Questa potenza tiene conto della variazione stagionale dell'irraggiamento solare e delle perdite. Il posizionamento dei pannelli solari dovrebbe essere suddiviso in diverse aree per sfruttare al meglio l'irraggiamento:

- Area 1 (sul tetto della mensa): 50 kW;
- Area 2 (campo vicino alle camerate): 70 kW;
- Area 3 (parcheggio per veicoli elettrici): 40 kW;
- Area 4 (illuminazione esterna): 50 kW.

Per garantire la continuità dell'alimentazione, si possono considerare batterie al litio ad alta capacità, per immagazzinare almeno 250 kWh di energia elettrica.

Per ciascuno dei due casi-studio appena trattati, è bene ricordare l'importanza che la posa in opera e lo smontaggio di tutte le apparecchiature elettriche e relativi accessori siano fatti da personale adeguatamente addestrato. È solo il caso di ricordare che un modulo FV esposto al sole, senza alcun carico elettrico connesso, ha una tensione ai suoi capi. Se connesso in serie con altri moduli, la tensione totale può essere pericolosa per l'uomo.

### 3.2.3 *Gestione e controllo del sistema smart energy*

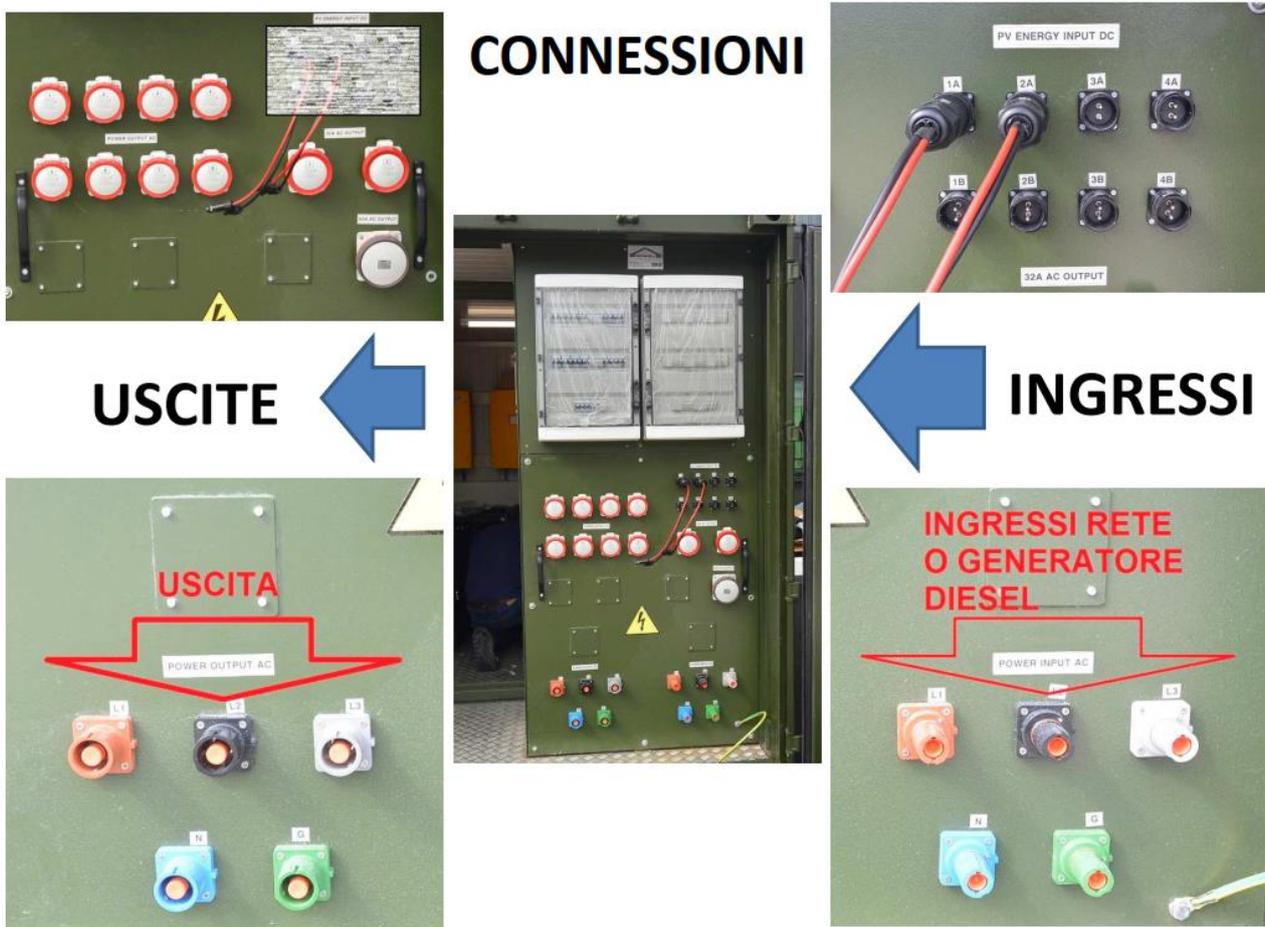
Indipendentemente dalla dimensione del campo base e dalla numerosità del numero di addetti, l'energia prodotta dal sistema smart energy dovrà essere gestita da un sistema di controllo e monitoraggio delle prestazioni. Precedenti esperienze sul campo del Committente hanno consentito di individuare soluzioni efficaci a questo scopo, che possono integrarsi con quanto definito nelle precedenti sezioni. Ne è esempio la Figura 8, che riporta

una *powerbox* di controllo e gestione del sistema FV, con integrazione di un eventuale generatore diesel per backup o situazioni di emergenza.



**Figura 8.** Powerbox per gestione e controllo di sistema smart energy.

La powerbox, disposta all'interno di un container ISO 10', consente la trasformazione, l'accumulo, la gestione, l'erogazione e la distribuzione di energia elettrica prodotta da pannelli FV installabili sulle coperture di tendo strutture. Può gestire n. 8 stringhe di pannelli connessi a n. 4 inverter FV che trasformano la corrente continua in corrente alternata, come già evidenziato ad inizio sezione. La powerbox è dotata di n. 3 inverter bidirezionali, connessi ad altrettante batterie, che sono allocate all'interno della stessa powerbox. La Figura 9 riporta in dettaglio i quadri di gestione e le connessioni input/output.



**Figura 9.** Quadri di gestione e di ingressi/uscite della powerbox.

La Figura 10 riporta il dispiegamento di un HANAGAR MMTS con 300 pannelli organizzati in 8 stringhe e 4 inverter, utilizzati in occasione dell'esercitazione NATO Toxic Trip 2019, tenutosi a Villafranca di Verona nel 2019.



**Figura 10.** Esercitazione NATO Toxic Trip 2019, Villafranca di Verona, 2019.

#### **4. Tecnologie smart energy di futuro impiego**

Questa sezione focalizza l'attenzione sulle tecnologie *smart energy* del prossimo futuro. Un aspetto rilevante è che non potrà esserci una sostituzione delle tecnologie attuali, per diverse motivazioni. In primis, le tecnologie attuali sono mature, con alti livelli di efficienza relativamente a ciascuna specifica tecnologia, affidabili nel medio-lungo periodo e la cui gestione dell'intero ciclo di vita (*Life Cycle Assessment, LCA*) necessita di competenze tecniche e personale che sono attualmente disponibili. Tutto ciò implica che il patrimonio di tecnologie e competenze esistenti potrà essere utilizzato ancora per lunghi anni, avendo certezza di risultato e minimizzazione dei costi, grazie alla scalabilità dei sistemi FER e alla maturità delle loro tecnologie. La ricerca su questi sistemi è attualmente focalizzata sul miglioramento delle prestazioni, sull'affidabilità, sulla più lunga durata dei componenti, sulla diagnostica dei guasti, sul monitoraggio attivo delle prestazioni e sulla *cybersecurity* dei sistemi energetici connessi alla rete elettrica gestita da terzi (*Vodapally e Ali, 2023*). L'ultimo punto non riguarda direttamente le operazioni di *Air Expeditionary*, se i sistemi elettrici sono autonomi, cioè non connessi alla rete, come può accadere. Un secondo aspetto riguarda le tecnologie che si stanno studiando e testando tramite simulazioni o dimostratori sperimentali. Relativamente all'ambito di interesse delle operazioni di tipo *Air Expeditionary* non ci sono attualmente tecnologie sostenibili che possano sostituire quelle descritte nelle precedenti sezioni, garantendo le stesse prestazioni energetiche e le stesse vincenti caratteristiche, quali affidabilità, scalabilità, modularità, interoperabilità, trasportabilità, robustezza, durabilità, e così via. Poi ci sono altre motivazioni che, per importanza, risultano di ordine secondario rispetto alle precedenti oppure esulano completamente dagli aspetti tecnici su cui è focalizzata la presente relazione. Come dettagliato nel seguito, è plausibile attendersi nel breve periodo l'integrazione delle attuali tecnologie smart con altre tecnologie, prima fra tutte quella basata sull'idrogeno.

##### **4.1 Analisi dello stato della ricerca relativamente a tecnologie smart energy di futuro impiego**

Le fonti energetiche rinnovabili ed i nuovi combustibili possono essere una soluzione al problema energetico, ma il problema fondamentale nella diffusione di tali fonti sta nella loro disponibilità ad intermittenza. La fonte eolica e quella solare, di cui abbiamo trattato nelle precedenti sezioni, soffrono questa limitazione in quanto il loro funzionamento è vincolato alla presenza di vento o sole. Le soluzioni proposte sono sempre integrate da batterie che consentono, infatti, di accumulare l'energia nei momenti di produzione energetica superiore ai consumi e restituirla nei momenti di energia insufficiente. Ciò accade

nonostante la migliore pianificazione possibile basata sui dati raccolti in decenni su piattaforme pubbliche (PVGIS o atlante eolico globale, introdotti nelle precedenti sezioni). Le batterie al litio hanno tanti vantaggi e anche alcune problematiche, già esaurientemente trattate. A quelle si aggiungono altre problematiche legate alla disponibilità mondiale (approvvigionamento) della risorsa primaria delle batterie, cioè il litio, e alla tecnologia di produzione delle batterie. Bisogna anche portare in conto l'aspetto legato allo smaltimento delle batterie a fine vita, affinché la sostenibilità dell'intero sistema sia garantita dalla culla alla morte, come si suol dire in ambito tecnico. Per affrontare questa nuova sfida, grande fiducia è riposta nell'idrogeno utilizzato come vettore energetico per lo stoccaggio di energia. La locuzione vettore energetico implica che l'idrogeno  $H_2$  utilizzato per la produzione di energia elettrica non è liberamente disponibile sotto questa forma, ma bisogna ricavarlo da altri prodotti attraverso processi chimici o termici e così via. Uno dei maggiori vantaggi dell'idrogeno, una volta prodotto sotto forma di  $H_2$ , è la sua versatilità sia per lo stoccaggio (può essere accumulato in forma gassosa o in forma liquida) sia per la generazione di energia. L'idrogeno è un gas incolore che viene usualmente associato ad un colore in base al processo chimico o fisico necessario alla sua produzione. In particolare, l'idrogeno è classificato come segue (mondoidrogeno, 2022):

- **Idrogeno nero:** consiste nella scomposizione della molecola dell'acqua in idrogeno e ossigeno, attraverso l'elettrolisi. L'energia elettrica necessaria all'elettrolisi è prodotta da centrali elettriche a gasolio o carbone;
- **Idrogeno viola:** si scompone la molecola d'acqua in idrogeno e ossigeno attraverso elettrolisi, utilizzando l'energia elettrica prodotta da centrali nucleari;
- **Idrogeno grigio:** è l'idrogeno prodotto dal metano  $CH_4$  che viene scisso dal carbonio attraverso una reazione chimica (*reforming*) che produce elevate quantità di  $CO_2$  che è climalterante;
- **Idrogeno blu:** è una tecnica recente che consiste nel produrre l'idrogeno grigio catturando e stoccando definitivamente la  $CO_2$  prodotta (Carbon Capture and Storage CCS);
- **Idrogeno verde:** è il meno inquinante e consiste nella produzione di idrogeno tramite elettrolisi, utilizzando l'energia elettrica prodotta solo da FER.

Attualmente circa il 90% dell'idrogeno prodotto nel mondo è grigio perché i costi di produzione sono particolarmente bassi rispetto alle altre soluzioni tecniche (1,25-1,5 €/kg). L'idrogeno verde è, invece, il più oneroso (7-8 €/kg), ma la ricerca punta ad un miglioramento dell'efficienza superiore al 60% che potrebbe ridurre i costi di produzione a meno di 3 €/kg (mondoidrogeno, 2022).

#### 4.1.1 Reforming e ossidazione parziale del metano

La reazione di reforming del gas naturale è il metodo attualmente più utilizzato per la produzione di idrogeno. Come idrocarburo si utilizza tipicamente il metano CH<sub>4</sub> e il processo di produzione si basa su reforming con vapore o ossidazione parziale del metano. Nel primo caso, il metano è a contatto con vapore ad alta temperatura e pressione e si sfruttano le proprietà di catalizzatori al fine di accelerare la reazione chimica. Il processo di reforming a vapore è endotermico, quindi necessita di energia sotto forma di calore affinché la reazione avvenga. Solitamente il calore necessario al processo chimico è ottenuto bruciando parte del metano. I prodotti di reazione sono idrogeno e monossido di carbonio, secondo la seguente reazione chimica:



Nell'ossidazione parziale, invece, il metano reagisce con una quantità limitata di ossigeno che non è sufficiente per ossidare completamente gli idrocarburi in anidride carbonica e acqua. I prodotti di reazione sono sempre idrogeno e monossido di carbonio, ma l'ossidazione parziale produce meno idrogeno, a parità di quantità di combustibile rispetto al reforming con vapore. L'ossidazione parziale del metano è un processo esotermico ovvero emette calore e per questo risulta essere più veloce del reforming con vapore:



A valle delle precedenti reazioni chimiche, in entrambi i processi il monossido di carbonio ed il vapore vengono fatti reagire con l'aiuto di un catalizzatore per produrre anidride carbonica e altro idrogeno:



L'anidride carbonica viene rimossa nella fase finale del processo ottenendo l'idrogeno puro.

#### 4.1.2 Elettrolisi dell'acqua

L'elettrolisi è il noto processo che consente di convertire l'energia elettrica in energia chimica scomponendo la sostanza di partenza nei suoi elementi costituenti. Attraverso l'elettrolisi, ad esempio, è possibile scomporre l'acqua per produrre idrogeno e ossigeno. Nonostante sia una tecnica ben nota, solamente il 4% dell'idrogeno viene prodotto attraverso questo processo a causa degli alti costi energetici e nonostante l'idrogeno prodotto sia altamente puro. Il reforming, come già detto nella sezione precedente, è invece il processo con cui si produce circa il 90% dell'idrogeno, anche se esso richiede un ulteriore processo di purificazione dell'idrogeno prodotto. Il processo di elettrolisi avviene in una cella elettrolitica che è formata da tre elementi principali: due elettrodi, un elettrolita e un separatore. Forzando il passaggio di corrente tra i due elettrodi, la corrente elettrica dissocia le molecole di acqua negli ioni  $H^+$  e  $OH^-$ . A causa del campo elettrico prodotto dagli elettrodi, gli ioni  $H^+$  si concentreranno sull'elettrodo negativo (catodo) e gli ioni  $OH^-$  sull'elettrodo positivo (anodo). Le reazioni ai due elettrodi, separatamente, sono le seguenti:



La reazione completa di ossidoriduzione è la seguente:



Quando si collegano insieme più celle elettrolitiche, in serie o in parallelo, si ottiene il cosiddetto elettrolizzatore la cui portata dipende da diversi fattori, quali la tipologia di elettrolita, la distanza ed estensione degli elettrodi e l'intensità della corrente nella cella elettrolitica. Relativamente all'elettrolita, poiché l'acqua non è un buon conduttore di corrente elettrica solitamente si aggiungono sali specifici (idrossido di sodio, NaOH, e idrossido di potassio, KOH) per aumentare la produzione d'idrogeno. La quantità di sale presente nell'acqua può arrivare fino al 28% del peso d'acqua. Si stima che per produrre in media un chilogrammo di idrogeno, utilizzando un elettrolizzatore senza particolari accorgimenti costruttivi, servano circa 50kWh di energia elettrica operando con tensioni di circa 2V e con densità di corrente di circa 2000 A/m<sup>2</sup>, se l'efficienza dell'elettrolizzatore è di circa il 75%. Nella configurazione monopolare tutte le singole celle sono connesse in parallelo, ovvero tutti i catodi sono connessi tra loro e tutti gli anodi sono connessi tra loro. Nella configurazione bipolare le celle sono connesse in serie, quindi ogni catodo di una cella è a

contatto con l'anodo della successiva (Carmo et al., 2013). Questo tipo di configurazione permette all'elettrolizzatore di raggiungere efficienze più elevate rispetto ad un elettrolizzatore in configurazione monopolare, in quanto le celle connesse in serie hanno minori perdite, a parità di produzione di idrogeno. Le soluzioni per rendere compatte queste macchine aumentano notevolmente i costi di investimento iniziale dell'impianto. L'elettrolisi richiede notevoli quantità di energia e può essere classificato come idrogeno verde solo se alimentato con energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili (eolico e/o fotovoltaico). Se invece si utilizza una fonte fossile per alimentare l'elettrolizzatore, comunque ci sarà produzione di CO<sub>2</sub> e quell'idrogeno non potrà essere classificato come idrogeno verde.

#### **4.2 Proiezione progettuale della futura Air DOB smart energy**

Nel breve-medio periodo, un sistema smart energy per l'Air Expeditionary potrà basarsi sull'integrazione ed interoperabilità di FER di tipo eolico e fotovoltaico con sistema di accumulo costituito da batterie ed idrogeno. Questa configurazione, benché complessa, è molto flessibile e consente di poter gestire il sistema elettrico e le diverse configurazioni pianificate in maniera personalizzata rispetto alla missione di interesse. Tutti questi sistemi sono modulari e scalabili, quindi possono agevolmente essere adattati alle necessità di trasportabilità. In molti casi risultano essere, inoltre, complementari tra di loro ed un sistema può essere maggiormente performante proprio quando l'altro lo è meno. È diffuso il caso di aree geografiche in cui la ventosità notturna è superiore a quella diurna. In queste aree si ha una buona performance del sistema FV di giorno, quando il sistema eolico è meno performante; il viceversa accade di notte. Anche per i sistemi di accumulo di energia (batterie) e i vettori energetici (idrogeno) c'è una complementarità poiché le batterie hanno una risposta più veloce ma una minore densità di energia rispetto all'idrogeno. Un sistema è, quindi, più utile dell'altro in alcune circostanze e viceversa. In sintesi, la diversificazione delle fonti di energia e dei sistemi di accumulo garantisce notevoli vantaggi, particolarmente utili per operazioni di *Air Expeditionary*.

Il successo dello sviluppo dell'economia dell'idrogeno comporta innumerevoli vantaggi per l'ambiente, la sicurezza energetica, l'economia e gli utenti finali (Abe et al., 2019). Tuttavia, come altri metodi di produzione di energia, l'idrogeno presenta delle sfide, tra cui costi elevati e problemi di sicurezza lungo l'intera catena del valore. L'energia da idrogeno ha suscitato una notevole attenzione per il suo potenziale nel promuovere la trasformazione energetica, guidare una profonda decarbonizzazione e garantire la sicurezza energetica. Negli ultimi anni si è assistito a una progressiva ricerca e applicazione pratica dell'economia dell'idrogeno, grazie ai cospicui investimenti governativi nella tecnologia dell'idrogeno. In

caso di idrogeno verde, esso è fonte di energia pulita e zero emissioni di carbonio, quindi, l'energia dell'idrogeno presenta notevoli opportunità di sviluppo che hanno attirato l'attenzione di importanti settori produttivi. La Figura 11 (Niu et al., 2023) mostra le strategie politiche di pianificazione e grandi progetti per promuovere lo sviluppo dell'energia da idrogeno da parte delle maggiori economie europee (Li et al., 2022). Molti dei progetti, su cui hanno investito e continuano ad investire i diversi governi, sono legati ad applicazioni di rete al fine di recuperare in maniera efficiente i surplus di energia dovuti ai picchi di produzione fotovoltaica e/o eolica. Questo elemento sta avendo l'effetto di un rapido sviluppo delle tecnologie basate sull'idrogeno, con diversificazione sia delle applicazioni finali sia della potenza unitaria dei dispositivi, che utilizzano l'idrogeno come combustibile. Tipicamente si utilizzano le cosiddette celle a combustibile (fuel cell) di cui esistono diverse tipologie, a seconda delle temperature di funzionamento e del tipo di elettrolita. Quelle a basse temperature hanno i vantaggi di limitati problemi di materiali e corrosione, un'alta densità di potenza e bassi tempi di avviamento, mentre lo svantaggio è rappresentato dal catalizzatore costoso. Le basse temperature di funzionamento richiedono, infatti, un catalizzatore molto performante per ottenere reazioni sufficientemente rapide e il desiderato valore di potenza. Le celle operanti a temperature più elevate richiedono, di contro, catalizzatori meno performanti poiché il processo chimico è agevolato dall'alta temperatura.

Dal punto di vista della tecnologia esistono celle a combustibile di tipo PEM (con elettrolita polimerico), AFC (con elettrolita alcalino) detta anche pila a combustibile di Bacon, PAFC (ad acido fosforico), MCFC (a carbonati fusi) o le più recenti DMFC (a metanolo diretto).

		Germany	UK	Italy	France	Holland	Spanish	Malta	Belgium	Austria	Portugal
<b>National interest in hydrogen</b>		High	Mid	Mid	High	Mid	High	Mid	Mid	Mid	High
	<b>Year in which the National Strategy was released</b>	2020	Forthcoming	N/A	2020	2020	2020	Forthcoming	N/A	Forthcoming	2020
<b>Main areas of decarbonization</b>	Energy							√			
	Industrial	√			√	√	√	√		√	√
	Architecture		√								
	Transportation	√			√	√	√	√		√	√
<b>Main Objectives</b>		6.5 GW of installed electrolytic cell capacity by 2030	National strategy to be released by November 2021; focus on blue and green hydrogen	Focused on production, storage, wind power hydrogen production and regulation; more hydrogen-related projects	6.5 GW of installed electrolytic cell capacity by 2030	Installed electrolyzer capacity of 3-4 GW by 2030	4 GW of installed electrolyzer capacity by 2030	Installed electrolyzer capacity of 2-4 GW by 2030	Local governments take the lead in developing hydrogen energy while waiting for the overall national strategy	National-level hydrogen energy strategy expected to be released soon	Installed electrolyzer capacity of at least 1 GW in 2030, 70% of the existing pipeline network in the territory is ready to transport hydrogen

**Figura 11.** Strategie delle principali economie europee per lo sviluppo della tecnologia dell'idrogeno (Niu et al., 2023). Articolo *open access* distribuito sotto le condizioni della Creative Commons Attribution (CC BY) license.

#### 4.2.1 Integrazione fonti rinnovabili di energia e idrogeno

L'energia solare, eolica e le altre fonti di energia rinnovabile sono caratterizzate da intermittenza e significative fluttuazioni nella produzione di energia (Niu et al., 2023). Talvolta, l'eccesso di energia solare ed eolica rispetto a quella necessaria in quel momento può rappresentare anche una perdita, se le batterie connesse sono già totalmente cariche. In generale, l'intero sistema elettrico dovrebbe garantire un certo equilibrio tra la potenza totalmente richiesta e quella totalmente fornita, in modo da evitare numerosi passaggi di energia da un sistema all'altro, poiché ognuno di essi è affetto da perdite e il rendimento non è mai unitario. Più numerosi sono i passaggi, minore è l'energia finale utilizzata rispetto a quella inizialmente prodotta. Quando ciò non è possibile, è necessario immagazzinare l'energia in eccesso in sistemi di backup o cercare metodi alternativi per raggiungere un equilibrio tra carico elettrico e generazione di energia. Sebbene l'accumulo tradizionale di batterie sia efficace per la fornitura di energia a breve termine e la gestione della domanda,

non è adatto per l'accumulo di energia su larga scala e a lungo termine a causa di problemi intrinseci come l'auto-scaricamento delle batterie (Divya, 2009). L'energia da idrogeno presenta diversi vantaggi come l'elevata densità energetica e la facilità di stoccaggio e trasporto. Lo stoccaggio dell'energia dell'idrogeno, caratterizzato da un'elevata densità di immagazzinamento dell'energia, rappresenta una soluzione unica per convertire l'elettricità in eccesso in produzione e stoccaggio di idrogeno. L'idrogeno immagazzinato può poi essere utilizzato in modo efficiente per generare elettricità quando necessario, garantendo un equilibrio in tempo reale tra domanda e offerta di elettricità e promuovendo l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili (Hydrogen Council, 2017). L'integrazione del fotovoltaico, dell'accumulo di energia e dell'elettrolisi in un sistema PV-storage-elettrolisi dell'idrogeno, è un approccio efficace per lo sfruttamento delle energie rinnovabili (Niu et al., 2023)

## 5. Conclusioni

L'attività di ricerca trattata in questa relazione mostra che logistica *Air Expeditionary* può assolvere a tutti i suoi compiti utilizzando anche le fonti rinnovabili di energia per le esigenze energetiche del campo base, qualunque sia la numerosità degli addetti in esso presenti. L'obiettivo di una maggiore sostenibilità ambientale della logistica di proiezione è percorribile già nel tempo presente e lo sarà ancor di più nel futuro prossimo. È da tenere in considerazione che gli obiettivi di un'operazione militare di tipo *expeditionary* sono prioritari rispetto a qualunque altra esigenza. La sostenibilità energetica di un sistema *smart energy* per l'*Air expeditionary* deve essere, pertanto, declinata compatibilmente con gli obiettivi dell'operazione militare. All'interno di questo perimetro sono di rilevante importanza l'indipendenza e l'autonomia da combustibili di terzi parti, l'uso di fonti rinnovabili di energia, l'economicità delle risorse, l'efficientamento energetico e la protezione dell'ambiente.

La relazione ha mostrato che alcune delle attuali fonti rinnovabili di energia (fotovoltaico ed eolico) insieme ad un sistema di accumulo (quello proposto è basato su batterie al litio) sono in grado di soddisfare i bisogni energetici del campo base, adattandosi alle dimensioni dello stesso. La modularità, la scalabilità e l'interoperabilità di questi sistemi consentono di progettare e predisporre diverse configurazioni chiavi in mano, in modo da utilizzare quello più conveniente per ciascuna operazione militare. Accanto a questa soluzione bisogna evidenziare la problematica del trasporto per via aerea di batterie al litio, nel rispetto dei regolamenti internazionali vigenti. La soluzione a questa problematica esula dalla presente attività di ricerca e l'Autore ritiene che la trasportabilità di batterie al litio di media potenza necessiti un approfondimento dedicato. Oltre agli aspetti tecnici, la migliore configurazione deve essere scelta in funzione delle condizioni climatiche e orografiche del sito ospitante. A questo riguardo, è molto utile l'utilizzo di siti internet che forniscono informazioni sulle condizioni climatiche di area, grazie alla raccolta decennale di dati storici, questo garantisce l'affidabilità del dato. I siti proposti non sono le uniche fonti da cui prendere le informazioni climatiche e, sicuramente, l'Aeronautica Militare italiana avrà altri *database* con un maggior grado di dettaglio e ulteriori informazioni. Ai fini di questa relazione, è importante evidenziare una possibile modalità di acquisizione immediata di informazioni climatiche al fine di scegliere la configurazione energetica più performante per ogni singola operazione di logistica di proiezione. Grazie alla modularità e scalabilità, precedentemente introdotta, non è necessario predisporre un numero elevato di configurazioni. È sufficiente un ventaglio di opzioni (da quattro a otto) che copra tutte le possibili condizioni, includendo quelle estreme di massima e minima ventosità e radiazione solare. Progettate le configurazioni estreme, quelle intermedie possono essere agevolmente progettate

sfruttando la modularità e scalabilità dei sistemi eolici e fotovoltaici. Accanto alle soluzioni tecniche, che dovranno basarsi su tecnologie consolidate e recenti, un ruolo fondamentale è giocato dall'organizzazione delle attività in campo base. L'organizzazione delle attività pianificabili (e nella logistica Air expeditionary non tutte lo sono, per ovvi motivi) consente, infatti, un importante risparmio energetico che incide direttamente sull'ottimizzazione dell'intero sistema energetico, intesa come la sicura, affidabile, efficace ed efficiente gestione dell'energia disponibile. I tre pilastri su cui focalizzare l'attenzione per predisporre un efficace sistema *smart energy* per l'Air Expeditionary sono i seguenti: efficienza energetica dei componenti e dispositivi elettrici, progettazione e gestione dell'impianto elettrico, organizzazione delle attività in campo base. Questi sono i requisiti minimi affinché un sistema smart energy per la logistica di proiezione possa essere considerato sostenibile. A parere dell'Autore, la sostenibilità ambientale, relativamente al solo aspetto dello sfruttamento delle risorse naturali, può essere perseguita secondo il seguente decalogo (Vergura, 2017):

1. Non utilizzare risorse naturali, se non assolutamente necessario;
2. Se necessario, preferire sistemi la cui fonte primaria si rigenera più velocemente (rinnovabili);
3. Se necessario usarle, sfruttare le risorse direttamente disponibili senza alcun intervento infrastrutturale;
4. Se necessario intervento infrastrutturale, preferire infrastrutture poco invasive che producono impatto minimo;
5. Anche se a impatto nullo o minimo, imporre un uso razionale delle risorse al fine di consumarne il meno possibile;
6. Anche se le risorse sono usate in modo razionale, usare solo sistemi di utilizzo ad alta efficienza;
7. Anche con sistemi ad alta efficienza, preferire quelli con esternalità negative nulle o molto limitate;
8. Anche in presenza di esternalità negative limitate, preferire sistemi con esternalità positive elevate;
9. Diversificare geograficamente gli impianti per consentire all'ecosistema di assorbire gli impatti negativi;
10. Limitare temporalmente lo sfruttamento delle risorse e imporre il ripristino dello stato dei luoghi.

Il decalogo precedente è di portata generale ed alcune di esse? non possono certamente essere perseguite dalla logistica di proiezione, mentre altre sono perseguibili ed infatti sono state inserite nella presente relazione.

## Abbreviazioni e acronimi

- AC: ALTERNATING CURRENT (CORRENTE ALTERNATA)
- ACSS: AIR COMBAT SERVICE SUPPORT
- AETF: AIR EXPEDITIONARY TASK FORCE
- BoS: BALANCE OF SYSTEM
- C2: COMMAND & CONTROL
- C2 LOG-COMANDO & CONTROLLO LOGISTICO
- CIS: DISELENIURO DI RAME E INDIO
- CdTe: CADMIO-TELLURIO
- GaAs: ARSENIURO DI GALLIO
- CCS: CARBON CAPTURE AND STORAGE
- CS: COMBAT SUPPORT
- CSS: COMBAT SERVICE SUPPORT
- DC: DIRECT CURRENT (CORRENTE COSTANTE/STAZIONARIA)
- DOB: DEPLOYED OPERATING BASE
- FER: FONTE DI ENERGIA RINNOVABILE
- FV: FOTOVOLTAICO
- HAWT: HORIZONTAL AXIS WIND TURBINES
- IATA: INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION
- ICAO: INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION
- LCA: LIFE CYCLE ASSESSMENT
- NATO: NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION
- NDAB: NATO DEPLOYABLE AIR BASE
- NREL: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY
- O&M: OPERATION AND MAINTENANCE
- ONU: ORGANIZZAZIONE DELLE NAZIONI UNITE
- PVGIS: PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM
- VAWT: VERTICAL AXIS WIND TURBINES

## Bibliografia

1. Abe, J.O.; Popoola, A.P.I.; Ajenifuja, E.; Popoola, O.M. (2019). *Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation*. International Journal Hydrogen Energy.
2. Anderson E., Antkowiak M., Butt R., Davis J., Dean J., Hillesheim M., Hotchkiss E., Hunsberger R., Kandt A., Lund J., Massey K., Robichaud R., Stafford B., and Visser C. (2011), *A Broad Overview of Energy Efficiency and Renewable Energy Opportunities for Department of Defense Installations*. Nationale Renewable Energy Laboratory.
3. Air Force Interservice Manual 24-204 (2018): Preparing Hazardous Materials for Military Air Shipments.
4. Caffarelli A., Pignatelli A., De Simone G., Tsolakoglou K. (2021). *Sistemi Fotovoltaici. Progettazione, Gestione, Manutenzione Impiantistica*, Maggioli Editore.
5. Carmo M., Fritz D.L., Mergel J., Stolten D (2013). *A comprehensive review on PEM water electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy.
6. Delphi Ethica (2023). *Differenza tra Safety e Security*. Testo disponibile al sito <https://www.delphiethica.com/blog/gestione-rischio-e-terrorismo/differenza-tra-safety-e-security.html>, consultato il 4/11/2023.
7. Divya, K.C.; Østergaard, J. (2009). *Battery energy storage technology for power systems—An overview*. Electric Power System Research.
8. Fraczek M., Górski K., Wolaniuk L. (2022). *Possibilities of Powering Military Equipment Based on Renewable Energy Sources*. Applied Sciences
9. Hydrogen Council (2017). *Hydrogen Scaling Up: A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition*. Brussels, Belgium.
10. Li, Y., Shi, X., Phoumin H. (2022). *A strategic roadmap for large-scale green hydrogen demonstration and commercialisation in China: A review and survey analysis*. International Journal Hydrogen Energy.
11. Lithium Battery Shipping Regulations (LBSR) (2014), IATA.
12. MIL-STD-810H (2019). *Environmental engineering considerations and laboratory tests*. Department of defense test method standard.
13. Mondoidrogeno (2022). *I colori dell'idrogeno (e i diversi costi)*. <https://mondoidrogeno.com/colori-idrogeno>, consultato il 10/11/2023
14. Montagnolo M. (2021). *Surveying, planning and monitoring system: micro uas per la pianificazione logistica -un case study del 3° stormo*. Università degli Studi di Napoli Federico II, tesi di laurea.

15. Naughton B., Houchens B., Summerville B., Whipple B., Reen D., Gentle J., Lang, E. (2021). *Design Guidelines for Deployable Wind Turbines for Military Operational Energy Applications*. Sandia National Laboratories.
16. Niu M., Li X., Sun C., Xiu X., Wang Y., Hu M., Dong H. (2023). *Operation Optimization of Wind/Battery Storage/Alkaline Electrolyzer System Considering Dynamic Hydrogen Production Efficiency*. Energies.
17. Olsen T., Preus R. (2015). *Small Wind Site Assessment Guidelines*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
18. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) (2023), [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en)
19. Savino G. (2023). *Logistica di proiezione e capacità "expeditionary" in a.m. - integrazione dei sistemi logistici in contesti multinazionali*. Università degli Studi di Napoli "Federico II", tesi di laurea.
20. Vergura S. (2017). *Da smart city a smart community*. Libro auto-prodotto.
21. Vodapally S. N., Ali M. H. (2023). *Overview of Intelligent Inverters and Associated Cybersecurity Issues for a Grid-Connected Solar Photovoltaic System*. Energies.
22. Wegley H. L., Ramsdell J. V., Orgill M. M., Drave R. L. (1980). *A Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems*. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory.
23. World Bank (2023). *Global Wind Atlas*. <https://globalwindatlas.info/>

## Nota sull'IRAD e Nota sull'Autore

### IRAD<sup>1</sup>

L'Istituto di Ricerca e Analisi della Difesa (IRAD) è l'Organismo che gestisce, nell'ambito e per conto del Ministero della Difesa, la ricerca su temi di carattere strategico.

Costituito come Centro Militare di Studi Strategici (Ce.Mi.S.S.) nel 1987 e riconfigurato come IRAD nel 2021 a seguito dell'entrata in vigore della Legge 77/2020 - art. 238 bis, l'IRAD svolge la propria opera avvalendosi di esperti civili e militari, italiani ed esteri, in piena libertà di espressione di pensiero.

Quanto contenuto negli studi pubblicati riflette quindi esclusivamente l'opinione del Ricercatore e non quella del Ministero della Difesa.

### Autore



Silvano Vergura è Professore Ordinario del Politecnico di Bari da luglio 2023. Ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrica e il dottorato di ricerca in Elettrotecnica presso il Politecnico di Bari, rispettivamente nel 1999 e nel 2003. I suoi principali interessi di ricerca riguardano la modellazione e il monitoraggio dei sistemi di energia rinnovabile (RES), l'analisi non lineare dei sistemi di potenza e le nuove tecnologie per le Smart Cities. Ha focalizzato l'attenzione sull'analisi delle prestazioni energetiche degli impianti fotovoltaici attraverso l'analisi a infrarossi e la statistica descrittiva e inferenziale dei dati elettrici. È stato ed è attualmente componente di comitato di programma internazionale di diverse conferenze e simposi internazionali e redattore di riviste internazionali. È stato revisore di oltre 40 riviste internazionali. È autore o coautore di oltre 100 pubblicazioni internazionali stampate con revisione alla pari. Ha un brevetto sull'invecchiamento dei moduli fotovoltaici e ha progettato diversi software, uno dei quali (DISS) dedicato all'elaborazione di immagini all'infrarosso di moduli fotovoltaici difettosi. È Senior Member IEEE. È stato membro del Senato Accademico del Politecnico di Bari dal 2015 al 2019 e Direttore Vicario del Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione del Politecnico di Bari dal 2019 al 2021. Ulteriori informazioni sono disponibili sul sito [www.silvanovergura.it](http://www.silvanovergura.it)

---

<sup>1</sup> [http://www.difesa.it/SMD\\_/CASD/IM/CeMiSS/Pagine/default.aspx](http://www.difesa.it/SMD_/CASD/IM/CeMiSS/Pagine/default.aspx)

