

L'ACQUA

ESTRATTO

Luc Deroo

IMPIANTI FOTOVOLTAICI GALLEGGIANTI SUI SERBATOI DELLE DIGHE





Direttore Responsabile

Armando Brath

direttore@idrotecnicaitaliana.it

Comitato Tecnico-Scientifico

Renata Archetti

Lorenzo Bardelli

Giuseppe Bortone

Bruno Brunone

Paolo Carta

Rosella Caruana

Carlo Ciaponi

Pierluigi Claps

Maria Cristina Collivignarelli

Paolo De Girolamo

Roberto Deidda

Vittorio Di Federico

Renato Drusiani

Giorgio Federici

Francesco Federico

Marco Franchini

Gabriele Freni

Maurizio Giugni

Andrea Goltara

Salvatore Grimaldi

Ruggiero Jappelli

Goffredo La Loggia

Stefano Lanzoni

Francesco Macchione

Beatrice Majone

Antonio Massarutto

Mario Rosario Mazzola

Alberto Montanari

Michele Mossa

Francesco Napolitano

Roberto Ranzi

Giuseppe Rossi Paradiso

Paolo Salandin

Maria Giovanna Tanda

Attilio Toscano

Lucio Ubertini

Massimo Veltri

Pasquale Versace

Responsabile della Redazione

Olimpia Arcella

arcella.acqua@idrotecnicaitaliana.it

Redazione

acqua@idrotecnicaitaliana.it

328 1205467

Impaginazione e grafica

Michele Massara - PixelStudio

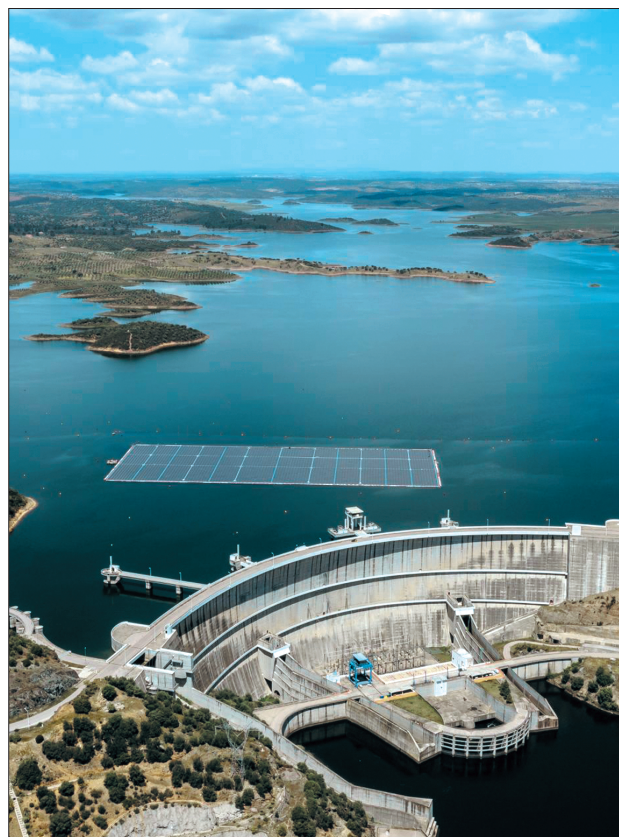
pixelstudio@fastwebnet.it

Segreteria, Pubblicità

Caterina Porfidia

320 7872904

caterina@idrotecnicaitaliana.it



Impianto Fotovoltaico sul bacino della Diga di Alqueva (Portogallo).

Editore

Associazione Idrotecnica Italiana

Via di Santa Teresa, 23 - 00198 ROMA

www.idrotecnicaitaliana.it

e-mail: acqua@idrotecnicaitaliana.it

RIVISTA ASSOCIATA



Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 15595 del 21 agosto 1974

Iscrizione al ROC n. 4201 del 29 agosto 2002

Spedizione in abbonamento postale 70% - ROMA

Le opinioni e i contenuti espressi dagli Autori non impegnano la Direzione

La riproduzione delle illustrazioni e degli articoli pubblicati dalla rivista è riservata e non può avvenire senza l'autorizzazione della Casa Editrice.

Finito di stampare nel mese di febbraio 2023 da Romana Editrice srl - Via dell'Enopolio, 37 - 00030 San Cesareo (RM)



Luc Deroo*

IMPIANTI FOTOVOLTAICI GALLEGGIANTI SUI SERBATOI DELLE DIGHE

FLOATING PV SOLAR ON DAM RESERVOIRS**

Nell'ambito del XXVII Congresso ICOLD, con riferimento alla "Question 107 Dams and climate change", è stata presentata anche la memoria "I pompaggi idroelettrici nella transizione energetica. La situazione italiana." a cura di Ezio Baldovin, Gian Luca Morelli e Mirko Mura (Geotecna Progetti), pubblicata nel 2021 nel n. 2 de L'ACQUA. In relazione alle possibili sinergie esistenti tra le due tecnologie, si propone la traduzione dell'articolo dell'Ing. L. Deroo, che illustra lo stato dell'arte sull'installazione di pannelli fotovoltaici galleggianti su serbatoi idroelettrici e le opportunità per l'ibridizzazione di idroelettrico e solare. Esso è basato sul continuo lavoro del Comitato Tecnico T di ICOLD che, tra l'altro, si occupa di analizzare nuovi utilizzi di dighe e serbatoi (per esempio per lo stoccaggio di energia) allo scopo di favorire l'utilizzo dell'energia rinnovabile. In effetti l'adozione del solare fotovoltaico galleggiante (FPV) è in rapido aumento, come mostrato da un recente rapporto di SERIS e della World Bank "Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report (World Bank Group, 2019a; 2019b). Nel Settembre 2020, inoltre, un rapporto (Lee, 2019) pubblicato dai ricercatori del DoE National Renewable Energy Laboratory (USA) afferma che la combinazione di pannelli solari galleggianti ed energia idroelettrica potrebbe portare ad una produzione pari a circa il 40% dell'elettricità mondiale.

I serbatoi delle dighe sono partner naturali di questa tecnologia in quanto mettono a disposizione la superficie su cui vengono installati i pannelli. Possono inoltre fornire ulteriori vantaggi: esistenza di sistemi per la trasmissione dell'energia, raffreddamento dei pannelli e potenziale di ibridizzazione. Tuttavia, devono ancora essere compiuti alcuni progressi sia nelle conoscenze di base che relativamente alle opzioni di progettazione degli FPV su invasi di dighe (FPV-DR), particolarmente perché installare FPV su serbatoi di grandi dighe comporta alcune specifiche sfide.

Parole chiave: Fotovoltaico flottante (FPV), Serbatoio di diga (DR), Ibridizzazione, Pannello, Ormeaggio.

Within the XXVII ICOLD Congress, with reference to Question 107 Dams and climate change, also the paper "I pompaggi idroelettrici nella transizione energetica. La situazione italiana" by Ezio Baldovin, Gian Luca Morelli and Mirko Mura (Geotecna Progetti), published in issue 2 of L'ACQUA of 2021, has been presented. In relation to the possible synergies between the two technologies, the translation of this article by Ing. L. Deroo, President of the T ICOLD Technical Committee "Perspective and New Challenges and Solutions for Tanks in the Twenty-first Century", is proposed. It illustrates the state of the art of the installation of floating photovoltaic panels on hydroelectric reservoirs and opportunities for the hybridization of hydroelectric and solar. The article is based on the continuous work of the Technical Committee T of ICOLD which, among other, analyses new uses of dams and reservoirs (for example for energy storage) to promote the use of renewable energy. The adoption of floating PV solar (FPV) is rapidly increasing, as shown by a recent report of SERIS and the World Bank "Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report" (World Bank Group, 2019a; 2019b). In September 2020, in addition, a report (Lee, 2019) published by the researchers of the DoE National Renewable Energy Laboratory (USA) states that the combination of floating solar panels and hydropower could produce up to 40 per cent of the world electricity.

Dam reservoirs are natural companions to this technology. They provide the surface on which the panels can be installed. They may also provide additional benefits: energy transmission facilities, cooling of the panels and potential for hybridization. But some progress still needs to be made in both the knowledge base and the design options for FPV on dam reservoirs (FPV-DR), particularly because installing FPV on large dam reservoirs involves some specific challenges.

Keywords: Floating Photovoltaic (FPV), Dam Reservoir (DR), Hybridization, Panel, Mooring.

* Ing. L. Deroo, ISL, Francia, Presidente del Comitato Tecnico T ICOLD "Prospective and new challenges for dams and reservoirs in the 21st century".

** Traduzione e adattamento a cura dell'Ing. Ezio Baldovin dell'articolo pubblicato sulla rivista Hydropower & Dams n. 3, 2021, pp.62-66.

1. IL CONTESTO

I serbatoi delle grandi dighe stanno iniziando ad essere utilizzati per i progetti FPV. È importante che ciò avvenga tenendo in debita considerazione le caratteristiche specifiche dei serbatoi stessi. Ad esempio, l'ancoraggio e l'ormeggio risultano complessi a causa delle grandi profondità e delle importanti variazioni del livello dell'acqua. Gli impatti fisici sui pannelli sono più grandi, specialmente considerando che le onde in grandi serbatoi sono più alte. Inoltre, gli standard di sicurezza delle dighe richiedono una valutazione specifica atta a verificare che gli impianti FPV non rappresentino una nuova minaccia per le dighe stesse.

Di tale tema si è occupato il Comitato T dell'ICOLD "Prospective and new challenges for dams and reservoirs in the 21st century", che ha dedicato la riunione annuale nel dicembre 2020 al solare fotovoltaico galleggiante sui serbatoi artificiali, ed ha riunito professionisti delle industrie delle dighe e dei FPV. Il presente articolo presenta alcune delle conclusioni dell'incontro e suggerisce modi in cui l'FPV può essere utilizzato su grandi bacini artificiali.

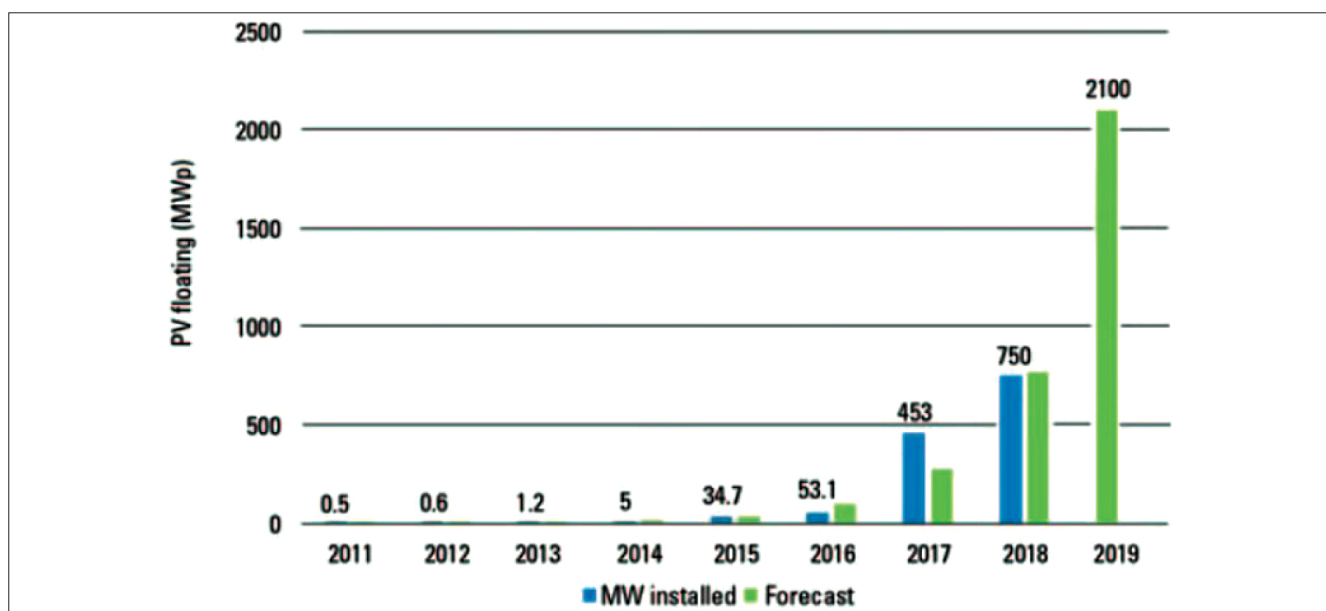


Figura 1 - Crescita degli impianti fotovoltaici galleggianti FPV (fonte *World Bank Group*, 2019a).

2. CASI DI STUDIO E LEZIONI APPRESE

2.1 Dieci anni di progetti di FPV

Il solare galleggiante è apparso meno di 10 anni fa, nel 2011. In dieci anni è stata installata una potenza di picco maggiore di 2 GW, con impianti che vanno da meno di 100 kWp fino a 100 MWp. Il ritmo di crescita è molto elevato e sono previsti numerosi nuovi impianti FPV di grandi dimensioni.

La maggior parte dei progetti FPV è stata realizzata su corpi idrici diversi dai serbatoi delle grandi dighe: stagni, laghi di cava, bacini idrici industriali, bacini di piccole dighe.

I più grandi progetti fino ad oggi utilizzano laghi formati nelle miniere di carbone.

L'installazione sui serbatoi delle dighe risulta al momento essere meno frequente. Tuttavia, alcuni progetti di riferimento hanno fornito lezioni utili.

L'impianto FPV Dami è stato realizzato sul bacino idroelettrico di Dami in Vietnam e commissionato a giugno 2019. L'impianto ha una potenza di picco di 47.5 MWp per una potenza totale installata pari a 175 MW. La selezione del sito per questo progetto ha considerato i seguenti vantaggi del bacino di Dami: l'impianto idroelettrico e quello fotovoltaico galleggiante hanno lo stesso proprietario; il sito è protetto da forti venti e tifoni grazie alla presenza delle montagne circostanti ed inoltre le fluttuazioni del livello del lago sono basse (meno di 3 m).

In Europa, EDP ha installato un progetto pilota sul bacino di Alto Rabagão e recentemente una nuova centrale FPV da 4.5 MWp sul bacino di Alqueva. Il progetto Alto Rabagão fornisce feedback interessanti per quanto riguarda l'ormeggio su un corpo idrico con una profondità di 60 m ed una variazione del livello del serbatoio di 30 m, oltre che con onde alte fino a 1 m. Un altro progetto pilota è stato realizzato presso la Diga di Les Toules in Svizzera, da Romande Energie. Le condizioni alla quota elevata di 1810 m s.m. sono impegnative: la variazione del livello dell'acqua è di 50 m, sui pannelli installati possono essere presenti un manto nevoso fino a 50 cm ed uno spessore di ghiaccio fino a 60 cm, le temperature variano da -25°C a 30°C e può esserci vento con velocità fino a 120 km/h. Nonostante le condizioni difficili, la resa elettrica in questa località d'alta quota è del 20% superiore a quella delle valli.

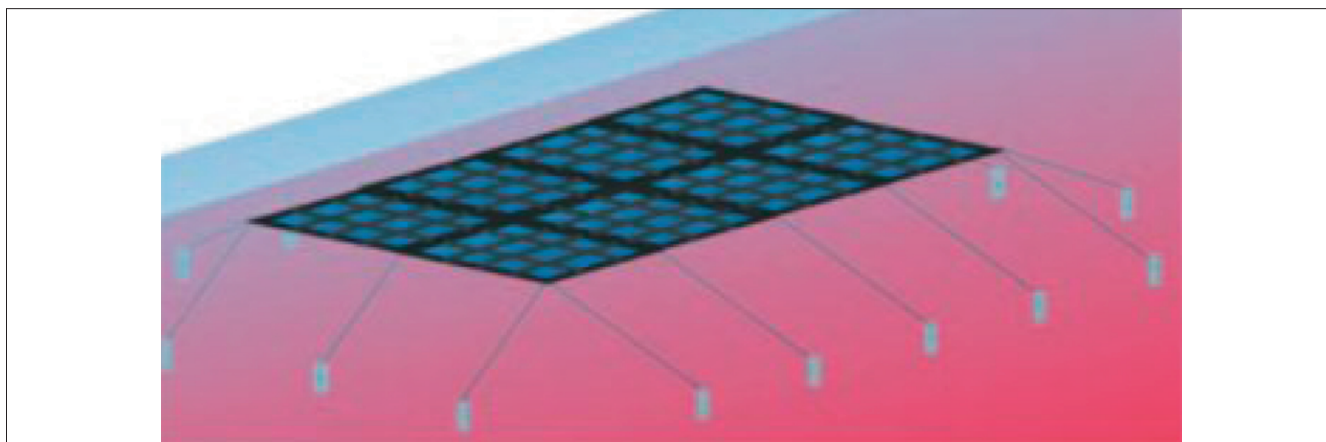


Figura 2 - Piccola isola con pannelli FVP, in cui sono illustrati i moduli PV, la struttura, le linee di ormeggio e gli ancoraggi.

2.2 Sfide tecniche di impianti FPV su serbatoi di diga

La realizzazione di impianti FPV sui serbatoi delle dighe implica particolari sfide tecniche che sono associate ai carichi specifici su tali serbatoi ed ai requisiti di sicurezza delle dighe.

Le onde indotte dal vento su grandi bacini idrici sono più alte rispetto a quelle sui corpi idrici più piccoli. Gli impatti delle onde richiedono, infatti, un'attenta valutazione e le isole FPV devono essere progettate considerando tale aspetto, il che non è così facile.

- Il calcolo convenzionale per la stima dell'altezza delle onde (basato sulla velocità del vento nelle stazioni meteorologiche vicine, valutazione del fetch e formulazioni empiriche dalla letteratura tecnica) non è sempre abbastanza preciso. Non tiene conto, ad esempio, del possibile rigonfiamento delle onde causato dalla riflessione sulle rive del serbatoio.
- Ci sono effetti di accoppiamento: i carichi del vento e delle onde non dipendono solo dalle condizioni naturali nel sito della diga, ma anche dalla geometria e dalle caratteristiche del progetto FPV-DR. Gli impatti delle onde sono smorzati da una serie di moduli fotovoltaici galleggianti o da barriere sull'acqua.
- La struttura di supporto degli impianti FPV è soggetta a logoramento a causa delle onde. Come mostrato nell'impianto pilota di Alto Rabagão, le condizioni specifiche del serbatoio della diga (onde molto frequenti) potrebbero portare ad un invecchiamento precoce.

L'ancoraggio nei serbatoi delle dighe risulta essere difficile a causa della profondità dell'acqua. Quest'ultima di solito impedisce una valutazione completa e precisa della topografia della superficie del terreno e delle condizioni geotecniche sul fondo del serbatoio.

Le linee di ormeggio devono essere adattate alle condizioni locali e soprattutto alle variazioni spesso elevate del livello dell'acqua nei serbatoi. Possono essere necessari dimensionamenti specifici per garantire la tensione nei cavi e per evitare che l'isola FV vada alla deriva.

In alcuni casi, il dimensionamento degli impianti FPV deve considerare anche un possibile abbassamento con contatto con il fondo del serbatoio; in questo caso la topografia irregolare e la residua presenza di alberi o di oggetti immersi potrebbero danneggiare i moduli FPV. Inoltre, la potenziale presenza di ordigni inesplosi (UXO) può essere un problema aggiuntivo in alcuni serbatoi.

Le grandi isole FPV sono progettate in base ai vari scenari di carico che dovranno sopportare (con riferimento a intensità e direzione), tenendo conto delle incertezze associate alla geometria delle linee di ormeggio (variabilità causata da variazioni del livello dell'acqua e imprecisione nelle localizzazioni degli ancoraggi); integrare le varie scale che interagiscono (isola-modulo-connettori) e considerare fatica ed usura è impegnativo.

Ciò ha un impatto sulla sicurezza delle dighe: gli impianti FPV convenzionali sui bacini d'acqua sono generalmente progettati per carichi del vento con 50 o 100 anni di tempo di ritorno e per una vita utile di 25 anni. Considerando questi numeri ed il fatto che, come detto sopra, le procedure di progettazione faticano a tenere conto di tutti gli scenari di carico, la probabilità di collasso di un'isola FPV-DR, progettata come un'isola FPV classica, potrebbe superare 10^{-2} per anno. In alcuni casi, questo può avere un impatto sulla sicurezza della diga.

2.3 L'incidente di Yamakura

L'incidente di Yamakura ha riguardato la distruzione di un impianto FPV installato sul serbatoio della Diga di Yamakura in Giappone. L'incidente, nel settembre 2019, fu causato dal passaggio del tifone No. 15.

L'impianto FPV di Yamakura occupava il 30% della superficie di 2.3 km² del serbatoio omonimo. La potenza installata era pari a 13.7 MWp e l'impianto era stato progettato per una velocità del vento pari a 41.5 m/s. Il tifone ha provocato la rottura delle linee di ormeggio dell'isola FPV, che, andando alla deriva, si è distrutta prendendo fuoco. Una revisione approfondita delle cause del guasto è stata effettuata da un Gruppo di Lavoro Tecnico organizzato dal Ministero dell'Economia, del Commercio e dell'Industria (METI) del Giappone.

Sono state considerate diverse possibili cause di cedimento delle linee di ormeggio: velocità del vento oltre il valore di progetto; una reale forza del vento maggiore di quella stimata nel progetto; forza aggiuntiva imprevista delle onde; deterioramento degli ancoraggi e dei perni di collegamento a causa di carichi ripetuti; insufficiente resistenza della fondazione degli ancoraggi; e, infine, inaspettata non uniforme risultante delle forze agenti sugli ancoraggi e sui perni di connessione a causa della specifica forma dell'isola.

È stato dimostrato che le prime cinque ipotesi possono essere ignorate. La rottura è scaturita da un'imprevista ripartizione delle forze di ormeggio, determinata dalla forma dell'isola e dall'orientamento delle varie linee di ormeggio. La *Figura 3* mostra l'isola FPV, i suoi 420 ancoraggi e 828 linee di ormeggio e la direzione del vento durante l'evento del tifone.

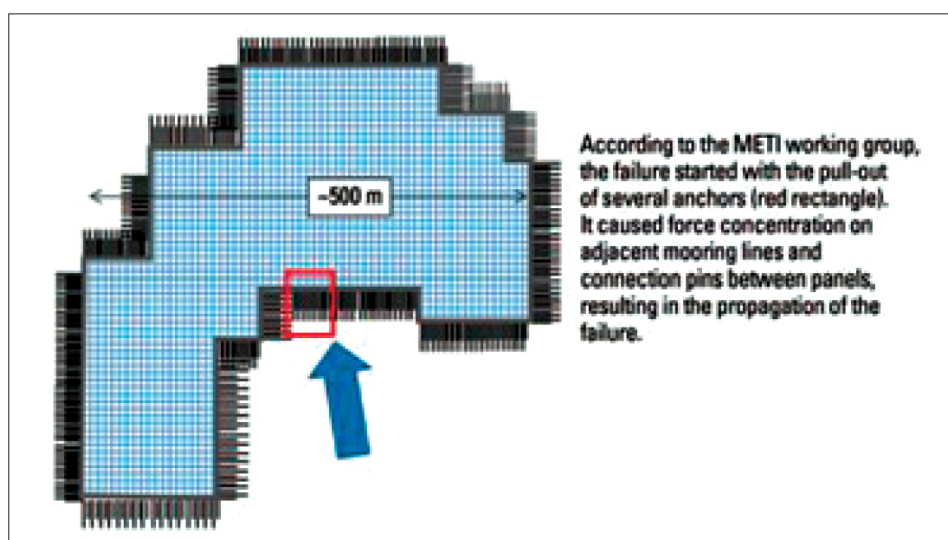


Figura 3 - Schema semplificato della configurazione dell'isola FPV di Yakamura.

Secondo il gruppo di lavoro del METI, l'incidente è iniziato con la rottura di alcuni ancoraggi nella zona evidenziata con il rettangolo rosso. Ciò ha causato la concentrazione della forza sulle linee di ormeggio adiacenti e sui perni di collegamento tra i pannelli, con conseguente propagazione della rottura. Vale la pena ricordare che, anche se la velocità del vento di progetto e la forza del vento di progetto non sono state superate, i risultati del gruppo del METI hanno mostrato che esse sono state effettivamente raggiunte.

3. PROBLEMI DI SICUREZZA DELLA DIGA

3.1 Problemi correlati alla sicurezza della diga

La principale minaccia è rappresentata da una possibile occlusione di uno sfioratore da parte di un'isola FPV alla deriva che, muovendosi verso di esso, potrebbe comprometterne la capacità di scarico.

Due altre conseguenze del cedimento degli ancoraggi di un impianto FPV, e conseguente deriva delle isole FPV libere, sono: carichi aggiuntivi sulle strutture (ad esempio su torri di presa/paratoie/diga) principalmente indotti dall'azione del vento (trascinamento) esercitata su isole alla deriva che urtino queste strutture; e, incendio in prossimità di strutture di sicurezza della diga nel caso una isola FPV collassata prendesse fuoco.

Ulteriori problemi di sicurezza possono essere provocati nelle dighe con paramenti impermeabilizzati a monte, in quanto la tenuta potrebbe essere danneggiata da un'isola FPV alla deriva. Questo è il caso, ad esempio, delle dighe con geomembrana a vista.

C'è già esperienza relativamente a serbatoi artificiali per problemi molto simili. In molti serbatoi sono installate barriere per raccogliere detriti galleggianti. L'accumulo di questi detriti può, a volte, tradursi in grandi "isole" galleggianti, molto simili alle isole FPV.

Nei climi freddi, le superfici dei serbatoi (e talvolta anche le superfici dei fiumi) si congelano durante l'inverno, il che si traduce, anche in questo caso, in grandi isole galleggianti.

Entrambi questi fenomeni possono causare minacce simili a quelle precedentemente illustrate.

In effetti barriere di sicurezza possono essere sviluppate sulla base dell'esperienza maturata nel fronteggiare le isole galleggianti composte da ghiaccio e detriti.

Una questione chiave è che la sicurezza deve essere garantita per tutta la vita utile della diga e non solo per la vita utile degli impianti FPV. Ci sono rischi specifici durante l'installazione del FPV prima che gli ancoraggi, le linee di ormeggio e il collegamento siano stati completati. Ci sono anche rischi specifici durante l'esercizio del FPV, considerando che il convenzionale design dell'impianto FPV non copre la resistenza ai carichi (venti, inondazioni) con una probabilità così bassa come quella richiesta dalla sicurezza della diga. Inoltre, vi sono rischi do-

po la fine della vita utile tipica di 25 anni del FPV, quando la resistenza di progetto delle linee di ormeggio e delle connessioni risulta ridotta dalla corrosione o dalla fatica.

3.2 Carichi di progetto

Il documento “Recommended Practice for Design, Development and Operation of Floating Solar Photovoltaic Systems” del DNVGL, pubblicato nel marzo 2021 (DNV, 2021) fornisce un interessante insieme di criteri di progettazione per gli impianti FPV, nonostante esso non affronti le specificità degli impianti FPV sui serbatoi delle dighe.

Sebbene sia importante valutare i carichi dovuti alla corrente, soprattutto se l'FPV si trova in prossimità di uno sfioratore, il fattore di carico principale è solitamente il vento, con due azioni principali: carichi diretti (trascinamento e sollevamento) sulle isole FPV e formazione delle onde.

A causa dell'unicità della posizione di ciascun bacino, le velocità del vento sul serbatoio possono differire in maniera sostanziale (in ampiezza e direzione) dalle velocità misurate nelle stazioni meteorologiche vicine. Per grandi progetti, allo scopo di ricavare solidi diagrammi di rose dei venti locali, sono necessarie simulazioni dedicate del vento che tengano conto della topografia intorno ai bacini artificiali e/o della registrazione del vento con uno o più anemometri. Per progetti più piccoli, possono essere utilizzate velocità del vento ricavate dalla normativa che includono correzioni in base alla direzione, altitudine, esposizione e così via.

Non c'è un'opinione generale condivisa su quale velocità del vento debba essere considerata per la progettazione:

- quale frequenza considerare (1:100 anni, 1:1000 anni o anche 1:10000 anni);
- quale durata del vento considerare (raffiche istantanee, vento medio di durata 10 minuti, vento medio di durata 1 ora).

Nel seguito si riportano le risposte preliminari a questi quesiti.

Nel caso di una grande diga, in cui il collasso di un'isola FPV rappresenterebbe una minaccia diretta alla sicurezza dello sbarramento, la probabilità di incidente di un impianto FPV deve essere molto bassa, ad esempio 1:10000 all'anno o anche meno. Nel caso di presenza di barriere di sicurezza o se il collasso dell'isola FPV non è una minaccia diretta, vale a dire se una valutazione del rischio mostra che il collasso dell'isola FPV non comporta direttamente il crollo della diga, si potrebbero considerare probabilità di collasso più elevate. D'altra parte, la valutazione della sicurezza strutturale delle isole FPV-DR in condizioni di vento estremo è complessa e garantire una probabilità di collasso di appena 10^{-4} all'anno durante l'intera vita di servizio sembra al momento fuori portata. Pertanto, potrebbe essere più appropriato progettare per la probabilità convenzionale 1:100, che viene solitamente considerata nella progettazione di impianti FPV, e prevedere barriere di sicurezza aggiuntive tra FPV-DR e diga, in modo da scindere i requisiti di sicurezza dell'impianto FPV e della diga.

Per una data probabilità esiste una relazione tra la velocità del vento e la durata, durante la quale tale velocità viene superata; questa è una classica relazione intensità-durata-frequenza. La scelta della durata dell'intensità del vento da considerare dipenderà dal meccanismo di collasso che deve essere considerato.

Quando si calcolano le forze del vento sui moduli FPV, si dovrebbe considerare la velocità di raffica, ovvero le velocità di picco. Per calcolare le forze del vento sulle linee di ormeggio, una velocità di raffica di durata molto breve potrebbe non essere rilevante e pertanto andrebbe considerata una velocità media di 10 minuti. Quando si calcola l'altezza delle onde, è necessario considerare un vento stabilito durante un intervallo di tempo sufficientemente lungo da generare onde importanti: più lungo è il fetch, maggiore è la durata necessaria per raggiungere le altezze massime delle onde.

Una volta stabiliti i diagrammi intensità-durata-frequenza della rosa dei venti, possono essere calcolati i parametri d'onda “free-field” (senza isola FPV) come l'altezza e la lunghezza d'onda. Per progetti di grandi e medie dimensioni, si consiglia di eseguire una simulazione numerica che consideri la forma e la batimetria del serbatoio. In effetti, la distribuzione dell'altezza delle onde è tutt'altro che uniforme in un serbatoio. Per progetti di grandi dimensioni, si consiglia inoltre di effettuare misurazioni locali nel luogo del progetto proposto per calibrare i modelli di simulazione.

3.3 Progettazione per le azioni del vento e delle onde

Il calcolo dei carichi del vento e delle onde sulle strutture ed il calcolo delle sollecitazioni indotte da questi carichi è complesso. Si consiglia una procedura di progettazione step-by-step:

- si stabilisce un diagramma della rosa dei venti con frequenza-intensità-durata con un modello del vento globale (“free-field”);
- si calcolano i parametri delle onde per varie condizioni di vento di una data frequenza con un modello d'onda globale (“free-field”);
- si utilizza un modello FPV a scala d'isola per calcolare le forze del vento complessive; questo dipenderà dal pannello (coefficiente di trascinamento e sollevamento). Successivamente verranno calcolati gli ancoraggi e le

linee di ormeggio. L'isola dovrà essere stabile per determinate velocità del vento (in genere si considera una velocità del vento di 10 minuti). I calcoli devono tenere conto delle incertezze nella geometria delle linee di ormeggio e quindi la distribuzione del carico tra le varie linee dovrà essere diversa dal modello teorico. Dovrebbe essere inoltre considerata l'eccitazione dinamica vicino alle frequenze naturali della struttura delle isole;

- può essere utilizzato un modello in scala dell'isola FPV per calcolare l'interazione della risposta delle onde tra i moduli e l'effetto di attenuazione delle onde da parte delle isole; questo modello è anche dipendente dal pannello.
- la progettazione strutturale dei vari connettori di pannello può infine essere eseguita in base alle forze del vento e ai parametri delle onde. La struttura deve resistere a velocità del vento di raffica e ad onde in varie direzioni. Ciò include la verifica della fatica e la previsione di usura e corrosione.

Questa procedura step-by-step non tiene pienamente conto dell'accoppiamento tra le diverse isole FPV, ma coglie gli aspetti principali.

3.4 Commenti aggiuntivi

I detriti galleggianti potrebbero rappresentare un ulteriore aumento dei carichi aggiuntivi, nel caso questi si accumulassero lungo le isole FPV.

A volte devono essere considerati anche i carichi sismici. Finora sono state identificate tre conseguenze delle azioni sismiche come potenziali minacce per i FPV: frane indotte sui margini del bacino che potrebbero avere un impatto sugli ancoraggi dei FPV; caduta di rocce da pendii vicini e che possono colpire i pannelli FPV; le onde nel serbatoio indotte dal sisma.

Si dovrà tenere conto, talvolta, dell'accumulo di sedimenti. Ciò potrebbe modificare la batimetria locale nel sito in cui sono stati installati i pannelli, con un potenziale impatto sull'impianto FPV e sulle linee di ormeggio a basso livello del serbatoio.

4. SOLUZIONI TECNICHE PER FPV-DR

Gli impianti FPV per grandi bacini richiedono un appropriato dimensionamento. I moduli FPV dovrebbero essere modificati per mitigare i carichi o per resistere a carichi più elevati. Deve essere migliorata l'affidabilità delle linee di ormeggio e di ancoraggio e deve essere incluso nella procedura di progettazione l'impatto sulla sicurezza della diga.

Si stanno sviluppando diverse soluzioni tecniche per strutture FPV su serbatoi, come ad esempio:

- geometria del modulo che mitiga i carichi del vento (coefficienti di sollevamento e trascinamento inferiori);
- attenuatori d'onda;
- moduli FPV in grado di fronteggiare onde più alte;
- sistemi di monitoraggio volti a rilevare l'invecchiamento strutturale o condizioni strutturali impreviste.

La sicurezza degli ormeggi e delle linee di ancoraggio può essere migliorata:

- prevedendo la ridondanza delle linee di ormeggio, in quanto il cedimento di una o più linee non deve comportare il collasso dell'intera isola;
- progettando più isole FPV indipendenti con una geometria semplice, piuttosto che un'unica isola complessa in cui la distribuzione del carico sugli ancoraggi è più difficile da valutare;
- ideando un sistema di monitoraggio in grado di rilevare gli effetti dell'invecchiamento strutturale (fatica, corrosione) o di condizioni strutturali anomale, e aiutare a programmare la manutenzione predittiva prima che si verifichi un incidente;
- aumentando i fattori di sicurezza utilizzati per la progettazione del sistema di ancoraggio per tenere conto della fatica e delle inaspettate distribuzioni dei carichi (sebbene non sia semplice valutare un opportuno fattore di sicurezza).

La sicurezza strutturale di un'isola FPV di solito non corrisponde agli standard di sicurezza per le dighe. In molti casi, una possibilità potrebbe essere quella di tollerare un collasso dell'impianto FPV (con una probabilità di circa 1:100 all'anno o meno) e assicurarsi che non si traduca in un collasso della diga (quindi avere una probabilità di collasso della diga molto inferiore alla probabilità di collasso dell'FPV). Una serie di condizioni o opzioni di progettazione potrebbero fornire le "barriere di sicurezza" desiderate.

La probabilità di collasso di un'isola FPV dipende molto dalla bontà del suo dimensionamento e costruzione. Sarà probabilmente nell'intervallo da 1:10 fino a meno di 1:1000 per anno, quest'ultimo nel caso di un design basato sulle pratiche raccomandate (DNV, 2021) che considerano la Categoria di Conseguenza, includendo la ridondanza delle linee di ormeggio.

Un dispositivo anti-deriva (barriera 1) può essere rappresentato da una barriera galleggiante o qualsiasi struttura simile che impedisca una completa deriva.

Nella scelta del posizionamento delle isole FPV (barriera 2) si deve prendere in considerazione un luogo in cui un collasso non comporti una deriva dell'isola verso lo sfioratore (ad esempio perché la direzione del vento spinge i pannelli FPV in altra direzione).

In alcuni casi, lo sfioratore della diga (barriera 3) potrebbe essere abbastanza grande da lasciar passare i moduli FPV o da tollerare un blocco parziale: i moduli alla deriva continuerebbero a galleggiare consentendo all'acqua di fluire al di sotto. Questo è l'approccio classico per le dighe in climi freddi che devono gestire gli eventi di rottura del ghiaccio.

La barriera 4 riguarda la "sensibilità della diga": alcuni tipi di dighe (ad esempio, la maggior parte delle dighe ad arco) possono sopportare un aumento del livello dell'acqua al di sopra del M.W.L. senza mettere in pericolo la diga stessa.

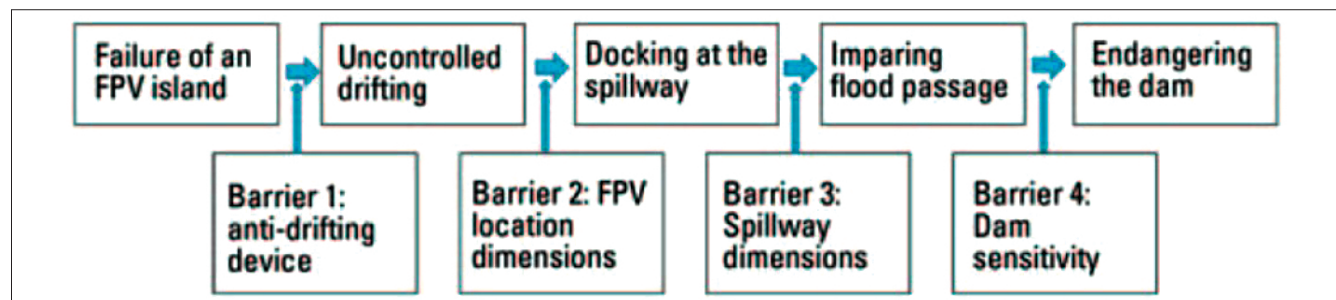


Figura 4 - Ipotesi di eventi conseguenti al collasso di un'isola FPV, con relative pratiche preventive.

Due punti importanti aiutano a controllare le probabilità di collasso:

- il monitoraggio delle strutture FPV è essenziale, sia per rilevare comportamenti anomali come guasti alle linee di ormeggio o invecchiamento generale, che per mantenere la probabilità di collasso del FPV così bassa come progettato;
- i progetti FPV che comprendono diverse piccole isole di geometria semplice e regolare, piuttosto che un'unica grande isola di geometria complessa, sono più agevoli da progettare (con impatti positivi sulla probabilità di collasso del FPV) ed un eventuale rottura è più facile da gestire.

5. OPPORTUNITÀ PER L'IBRIDIZZAZIONE

Ibridizzazione significa combinare produzione idroelettrica e solare nello stesso punto di connessione alla rete, mentre con centrali elettriche virtuali si fa riferimento a una combinazione di diversi impianti di generazione che forniscono energia a diversi punti di connessione della rete.

L'ibridizzazione fornisce un valore su tre scale temporali. Ad una scala minuta l'idroelettrico potrebbe attenuare gli effetti delle nuvole sull'energia solare (fornendo un "servizio di livellamento"). Su scala giornaliera l'idroelettrico potrebbe immagazzinare una quota della produzione solare giornaliera ("servizio di stoccaggio"). A scala stagionale il solare potrebbe far risparmiare acqua durante la stagione secca ("servizio di risparmio idrico").

Per fornire tali servizi, l'ibridizzazione richiede: una centrale idroelettrica ed un serbatoio con una certa flessibilità operativa, un impianto solare con potenza di picco compatibile con l'impianto idroelettrico ed infine un sistema di gestione dell'energia per ottenere l'ibridizzazione.

L'ibridizzazione potrebbe alla fine produrre: elettricità rinnovabile al 100%, completamente dispacciabile in rete, ed una maggiore disponibilità di acqua per le stagioni secche. D'altra parte, è probabile che l'ibridizzazione ri-

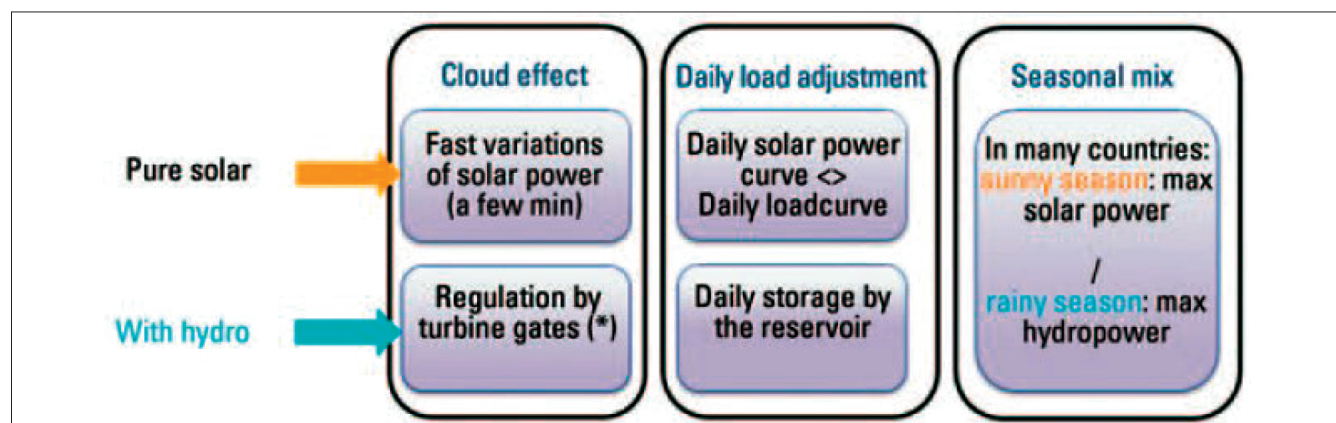


Figura 5 - Le tre scale temporali per le quali l'ibridizzazione può comportare un valore aggiunto.

chieda regolazioni più frequenti della generazione idroelettrica con potenziali aumenti dell'usura e della fatica delle apparecchiature idroelettriche.

Esistono diverse combinazioni possibili di solare ed idroelettrico con caratteristiche sia positive che negative:

1. FPV-DR: FPV su un bacino artificiale

Nessuna ibridizzazione della produzione di energia elettrica.

2. ShSH: solare-idroelettrico leggermente ibridizzato

Potenza di picco solare fino al 15/50% dell'idroelettrico.

+: Basso impatto sull'idroelettrico => funzionamento semplice.

-: Viene sviluppata solo una frazione del potenziale.

3. HhSH: solare-idroelettrico altamente ibridizzato

Potenza di picco solare fino al 30/100% dell'idroelettrico.

+: elevata penetrazione del solare

-: esercizio più complesso (comprese previsioni del tempo e relativo adattamento); l'impatto a valle sul fiume potrebbe richiedere misure di mitigazione.

4. FSH: solare-idroelettrico totale

Compreso un impianto di pompaggio idroelettrico dedicato.

+: penetrazione del solare molto elevata.

-: Alto CAPEX e maggior costo per kWh.

Sono stati proposti diversi progetti di ibridizzazione, ma la maggior parte di essi attende ancora l'attuazione.

Il principale ostacolo all'implementazione è il fatto che il ricavo medio per unità di energia generata (LCOE) è leggermente superiore a quello dei progetti fotovoltaici puri e che i servizi aggiuntivi forniti dall'ibridizzazione (dispacciabilità, servizi di rete e così via) di solito non hanno un valore nei contratti di acquisto di energia (PPA). Un altro ostacolo è la governance: due operatori per un "singolo" solare-idroelettrico non sono facili da adottare. Ci sarà una sovrapposizione contrattuale tra i due PPA.

Infine, l'ibridizzazione richiederà probabilmente modifiche dell'esercizio del serbatoio idroelettrico. In molti casi, la gestione dell'acqua può essere migliorata grazie all'ibridizzazione (risparmiando acqua nella stagione secca), ma in alcuni casi potrebbe rappresentare una seria limitazione.

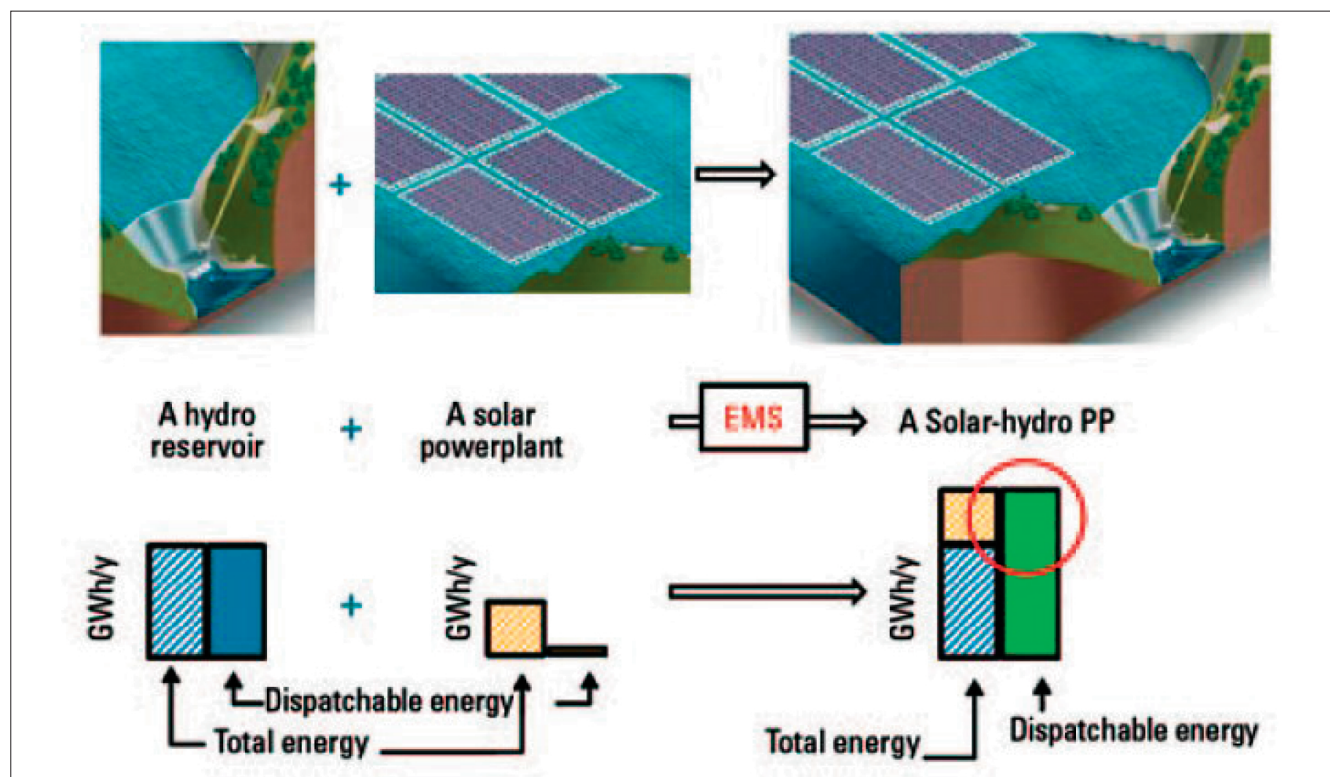


Figura 6 - Componenti chiave per l'ibridizzazione.

6. CONCLUSIONI⁽¹⁾

Dopo oltre 10 anni di applicazioni di rilevanza crescente, che hanno costituito una utile esperienza anche in termini di lezioni apprese, la tecnologia del solare fotovoltaico galleggiante (FPV) è in rapido aumento andando ad interessare anche i serbatoi delle grandi dighe.

Ciò comporta, oltre alla conseguenza di dovere affrontare contesti più gravosi per le accresciute grandezze fisiche in gioco (profondità, variazioni di livello, dimensioni delle onde), un passaggio di livello nell'approccio delle problematiche relative alla sicurezza dal semplice impianto al complesso diga più impianto, con riflessi diretti sui gradi di rischio considerati accettabili.

Ne deriva pertanto la necessità di introdurre criteri di dimensionamento e sovrabbondanze di linee difensive a protezione dell'integrità del complesso delle opere ed in particolare degli organi di scarico e degli sbarramenti, ispirandosi alle soluzioni tecniche maturate negli ultimi anni, anche se permangono tuttora margini di incertezza da approfondire su cui lavorare.

Un'opportunità offerta da questo tipo di impianto associato all'idroelettrico, in particolare se attrezzato anche con il pompaggio, è l'ibridizzazione dei due sistemi che consente la massima efficienza nella produzione e spacciamento di energia rinnovabile.

Risponde a queste caratteristiche l'impianto fotovoltaico galleggiante recentemente entrato in funzione sul bacino idroelettrico della Diga di Alqueva, nel sud del Portogallo, costituito da 12000 pannelli con la capacità di generare 7.5 GWh all'anno.

Per quanto riguarda l'Italia si segnala il nuovo impianto fotovoltaico flottante sul bacino di Dampone, nel comune di Sella Giudicarie (Trento). Il progetto, promosso dal Gruppo Dolomiti Energia, è il primo in Italia ad esser realizzato sulle acque di un serbatoio idroelettrico ed ha una potenza di picco di 98.2 kWp ed una produzione stimata di 114 MWh all'anno.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

DNV, 2021. *Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems, Recommended practice*, Report DNVGL-RP-0584.

LEE N. et al., 2020. *Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential*, Renewable Energy, Vol. 162.

WORLD BANK GROUP, 2019a. *Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners*. World Bank Group, ESMAP and SERIS, Washington, DC, USA.

WORLD BANK GROUP, 2019b. *Where Sun Meets Water (Vol. 2): Floating Solar Market Report*. World Bank Group, ESMAP and SERIS, Washington, DC, USA.



Bacino Dampone. Sella Giudicarie (TN).

⁽¹⁾ Le conclusioni sono a cura dell'Ing. Ezio Baldovin.



Impianto fotovoltaico flottante da 98,2 kWp realizzato presso l'invaso idroelettrico di "Bacino Dampone" nel Comune di Sella Giudicarie (TN) di Hydro Dolomiti Energia del Gruppo Dolomiti Energia di Trento.



Impianto da 1 MWp realizzato a Ferrera Erbognone (PV) per conto della Inerti Rivolta s.r.l. (Società del Gruppo Gavio). L'impianto è entrato recentemente in esercizio ed è a servizio della cava per i propri consumi.



ASSOCIAZIONE IDROTECNICA ITALIANA

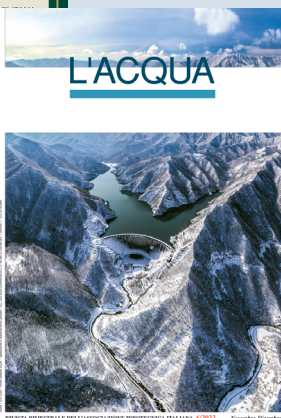
Via di Santa Teresa, 23 - 00198 Roma - Tel. 06.8845064 - segreteria@idrotecnicaitaliana.it - www.idrotecnicaitaliana.it

L'Associazione Idrotecnica Italiana (All) promuove e diffonde la cultura dell'Ingegneria dell'Acqua nel Paese dal 1923. Luogo di incontro tra comunità scientifica, istituzioni, industria e professione, anima dibattiti multidisciplinari e tematici sulla gestione e la salvaguardia della risorsa idrica, sulla sostenibilità ambientale, sulla resilienza delle infrastrutture idrauliche e sul drenaggio urbano, sui rischi provocati dall'acqua e su delicate questioni etiche, economiche, giuridiche e politiche.

Fra i Soci le principali associazioni nazionali del mondo della progettazione, costruzione e gestione di acquedotti e fognature, dighe ed impianti che operano con riferimento agli istituti di cultura, alle università e alle industrie.

Presso la sede sono conservati documenti, alcuni ormai storici, che testimoniano la gloriosa tradizione italiana e il contributo dell'Associazione nella ricerca teorica e sperimentale nell'ingegneria idraulica e marittima e nell'idrologia applicata, che hanno reso possibile dotare il Paese di importanti reti idriche e fognarie, dighe di ritenuta, impianti idroelettrici, di trattamento e depurazione delle acque, porti, opere di bonifica, irrigazione, sistemazione di fiumi e laghi, e difesa delle coste.

L'Associazione è presente con una Sede Centrale a Roma e con dodici Sezioni Territoriali per promuovere azioni di rilevanza nazionale e per rispondere ad istanze di carattere locale. Organizza attività di divulgazione tecnico-scientifica ed eventi pubblici di comunicazione (Giornate di studio, Convegni, Gruppi di Lavoro), avvalendosi di esperti di primo piano; predispone attività di formazione e di aggiornamento con riconoscimento di crediti formativi professionali per gli ingegneri e visite tecniche ad impianti e opere di ingegneria.



L'All ha una centenaria tradizione editoriale che ha origine dalla pubblicazione della sua prima Rivista *Le Acque pubbliche d'Italia* e che si è progressivamente estesa alla trattazione dei più moderni aspetti delle discipline idrauliche. Pubblica la Rivista bimestrale *L'ACQUA*, principale periodico culturale e tecnico-scientifico del settore.

acqua@idrotecnicaitaliana.it

Tel. 328.1205467

**NOTIZIARIO A.I.I. ASSOCIAZIONE IDROTECNICA ITALIANA**

Via di Santa Teresa, 23 - 00198 Roma - Tel. 06.8845064 - E-mail: segreteria@idrotecnicaitaliana.it

Presidente

Armando Brath

Vice Presidenti

Beatrice Majone

Andrea Mangano

Segretario generale

Roberto Zocchi

Consiglieri

Salvatore Alecci, Tonino Bernabè, Vincenzo Bixio, Francesco Bosco, Ilaria Butera, Alberto Campisano, Angelica Catalano, Giancarlo Chiaia, Vincenzo Chieppa, Vito Antonio Copertino, Giovanni de Marinis, Renato Drusiani, Francesco Federico, Carlo Ferranti, Maurizio Ferla, Mario Fossati, Giuseppe Frega, Gabriele Freni, Massimo Gargano, Maurizio Giugni, Mauro Grassi, Massimo Iovino, Ruggiero Jappelli, Claudio Lopez, Giorgio Martino, Anna Maria Martuccelli, Mario Rosario Mazzola, Carlo Messina, Nicola Montaldo, Michele Mossa, Francesco Napolitano, Matteo Nicolini, Patrizia Piro, Giovanni Perillo, Giovanni Ruggeri, Ornella Segnalini, Aurelia Sole, Maria Tellini, Anna Varriale, Marcello Zimbone.

Soci sostenitori**PLATINUM****GOLD****SILVER**