



COMUNE DI ALTOPASCIO
PROVINCIA DI LUCCA
REGIONE TOSCANA

IMPIANTO AGRIVOLTAICO "RNE13"

Proponente

RNE13 S.R.L.

Viale San michele del Carso, 22
20144 Milano (MI)
C.F. 12728030961

Progettazione

**SOCIETA' DI PROGETTAZIONE
GSB CONSULTING SRL**

Via Passo Rolle, 9 – 20134 Milano (MI)
P.IVA 11882750968



Preparato
Irina Giorgi

Verificato
Gianandrea Ing. Bertinazzo

Approvato
Vasco Ing. Piccoli

PROGETTAZIONE DEFINITIVA

Titolo elaborato

**RNE13
LAVAGGIO MODULI**

Elaborato N.

R17

Data emissione
12/12/24

Nome file
LAVAGGIO MODULI

N. Progetto
RNE13

Pagina
COVER

00

12/12/24

PRIMA EMISSIONE

REV.

DATA

DESCRIZIONE

IL PRESENTE DOCUMENTO NON POTRA' ESSERE COPIATO, RIPRODOTTO O ALTRIMENTI PUBBLICATO, IN TUTTO O IN PARTE, SENZA IL CONSENSO SCRITTO DI RNE13 S.R.L... OGNI UTILIZZO NON AUTORIZZATO SARA' PERSEGUITO A NORMA DI LEGGE.
THIS DOCUMENT CAN NOT BE COPIED, REPRODUCED OR PUBLISHED, EITHER IN PART OR IN ITS ENTIRETY, WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF RNE13 S.R.L. UNAUTHORIZED USE WILL BE PROSECUTED BY LAW.

Sommario

1	Introduzione	4
2	Breve descrizione dell'impianto agri-FV in oggetto	5
3	Problematica del "soiling" negli impianti FV	8
3.1	Cause	8
3.2	Possibili conseguenze.....	8
3.3	Tecniche di pulizia	10
4	Pulizia dei moduli per l'impianto FV in oggetto	12
4.1	Moduli FV	12
4.2	Sistema di lavaggio previsto per l'impianto FV in oggetto.....	12
4.3	Approvvigionamento idrico.....	13
4.3.1	Stima consumi idrici e approvvigionamento (fase di cantiere)	13
4.3.2	Stima consumi idrici (fase di esercizio impianto agri-FV)	13

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

1 Introduzione

La presente relazione costituisce parte integrante della documentazione progettuale relativa alla realizzazione dell'impianto agri-voltaico "RNE13" e ha lo scopo di affrontare la tematica del lavaggio dei moduli fotovoltaici.

Dopo un sintetico inquadramento della presente iniziativa progettuale, verrà descritta la problematica della deposizione di sporcizia sui moduli fotovoltaici (comunemente denominata "*soiling*"), le sue principali cause e conseguenze, le soluzioni disponibili sul mercato per mitigarla, ed infine la tecnica adottata per il presente progetto.

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2 Breve descrizione dell’impianto agri-FV in oggetto

L’impianto agrovoltaiico e relative opere di connessione alla rete saranno realizzate nel territorio del Comune di Altopascio, provincia di Lucca, e Porcari, provincia di Lucca ed è identificato dalle seguenti coordinate geografiche relative alla posizione baricentrica dell’impianto FV:

- 43.815085°
- 10.644768°

In Figura 1 è riportata la posizione del sito interessato su immagine satellitare, inquadrato prima nel territorio delle Toscana, poi più specificatamente nel territorio comunale di Altopascio e Porcari.



Figura 1: Inquadramento dell’impianto su immagine satellitare

La potenza nominale complessiva dell’impianto agrovoltaiico, determinata dalla somma delle potenze nominali dei moduli FV, è pari a 19'972,68 kWp, mentre la potenza in immissione in rete è determinata dalla potenza indicata sul preventivo di connessione, ed è pari a 17'250,00 kW.

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

Il progetto definitivo prevede la realizzazione di un impianto agrovoltaico a terra in configurazione lotto di impianti su strutture ad inseguimento solare mono-assiale per un'estensione complessiva di circa 23,8 Ha.

I moduli fotovoltaici, realizzati in silicio mono-cristallino ad elevata efficienza, saranno collegati elettricamente in serie a formare stringhe da 26 moduli, e posizionati su strutture ad inseguimento solare mono-assiale, in configurazione a doppia fila (configurazione 2-P). I moduli saranno opportunamente innalzati dal livello del terreno e le strutture di sostegno distanziate (pitch pari a 8,5m).

L'utilizzo di tracker consente la rotazione dei moduli FV attorno ad un unico asse orizzontale avente orientazione Nord-Sud, al fine di massimizzare la radiazione solare captata dai moduli stessi e conseguentemente la produzione energetica del generatore FV.

Per l'impianto FV in oggetto si prevede l'utilizzo di inverter centralizzati, posizionati direttamente in campo, a ciascuno dei quali saranno collegate fino ad un massimo di 13 cassette di stringa (o "string box"). A sua volta, ogni cassetta di stringa può ricevere in input un massimo di 17 stringhe di moduli fotovoltaici.

All'interno dei confini dell'impianto FV è prevista l'installazione di sei cabine di trasformazione (due per ogni lotto di impianto) realizzate tramite soluzione containerizzata, contenenti fondamentalmente l'inverter centralizzato, il trasformatore MT/BT e i quadri elettrici MT e BT.

L'energia generata dall'impianto agrovoltaico, composto da tre impianti di generazione distinti dal punto di vista elettrico (configurazione "lotto d'impianti" connessi in media tensione), viene raccolta tramite una rete di elettrodotti interrati in Media Tensione eserciti a 15 kV che confluiscono presso le tre cabine di consegna situate nel comune di Porcari al Foglio 8 p.lla 273, in posizione accessibile dalla viabilità pubblica, presso le quali è ubicato il punto di consegna dell'energia generata alla rete di distribuzione.

Tre elettrodotti interrati in Media Tensione a 15 kV trasporteranno quindi l'energia generata presso la cabina primaria nel comune di Porcari (LU).

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione



Figura 2: Inquadramento dell’impianto FV e relative opere di connessione su ortofoto

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

3 Problematica del “soiling” negli impianti FV

L’accumulo di sporcizia sui moduli fotovoltaici (fenomeno comunemente denominato “soiling”) può comportare riduzioni anche consistenti dell’output energetico di un impianto FV nell’arco della sua vita utile.

L’entità di tali perdite è dipendente da molti fattori, che verranno analizzati nel seguito della relazione, ma che in linea generale può raggiungere percentuali variabili tra 1% e 10-15% (nei casi più gravi) della produzione teoricamente ottenibile¹.

3.1 Cause

Le cause del “soiling” possono essere molteplici, variabili prevalentemente in funzione della località di installazione dell’impianto agrovoltaiico; di seguito si elencano le principali:

- Polvere: trasportata dal vento o depositata dalla pioggia; può essere sia di origine naturale (ad esempio in caso di impianti FV installati in zone particolarmente aride) oppure antropica (in caso di impianti installati in zone urbanizzate o adiacenti ad aree di cantiere); nel caso di impianti FV di grande taglia tali polveri possono essere inoltre sollevate dal transito dei mezzi di servizio;
- Deposito di detriti (es. foglie, piume, altro);
- Deiezioni di uccelli;
- Salsedine: in caso di impianti FV installati a ridotte distanze dal mare (<10 km) il deposito di particolato di origine salmastra potrebbe comportare, oltre all’effetto *soiling*, anche fenomeni di corrosione sulle parti metalliche (cornice moduli FV, strutture di sostegno, ecc.) con potenziali gravi conseguenze.

Ovviamente il principale fattore che influenza la severità del fenomeno è la località di installazione dell’impianto agrovoltaiico. Frequentemente gli impianti fotovoltaici vengono installati in zone caratterizzate da un’elevata insolazione e molto aride, ovvero caratterizzate dalla presenza di rilevanti quantità di polveri e dalla scarsità di precipitazioni.

Al contrario, l’installazione in zone caratterizzate da maggior umidità può beneficiare della minor quantità di polvere/sabbia, ma al contrario l’umidità può agevolare il fenomeno di “cementazione” dei depositi di sporcizia ostacolando le operazioni di pulizia e/o riducendone l’efficacia.

3.2 Possibili conseguenze

Le principali conseguenze derivanti dalla deposizione di sporcizia sui moduli fotovoltaici possono essere sintetizzate come segue:

- il deposito di polveri e/o altri materiali sul vetro frontale dei moduli FV (e posteriore in caso di moduli bifacciali) ha l’effetto di un vero e proprio filtro sulla radiazione solare incidente, riducendo l’intensità della radiazione che riesce effettivamente a raggiungere le celle FV e che può quindi essere convertita in energia elettrica;
- lo sporcamento non omogeneo delle celle FV che compongono un modulo, o analogamente dei moduli FV che compongono una stringa, comporta l’aumentare delle perdite di mismatch (o disaccoppiamento) in quanto celle/moduli FV sporchi sono caratterizzati da un punto ottimale di lavoro, ovvero da una coppia valori di tensione e corrente, differenti rispetto a celle/moduli puliti. Dato che il punto di lavoro, imposto dall’inverter, è il medesimo per tutti i moduli FV collegati

¹ “The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants” – Pavan et al. - Solar Energy 85 (2011) 1128–1136

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

elettricamente in serie, è evidente che alcuni moduli saranno obbligati a lavorare in un punto di funzionamento non ottimale, con conseguenti perdite energetiche più elevate;

- in caso di sporcamento non omogeneo delle celle FV che compongono un modulo, potrebbero inoltre insorgere fenomeni di surriscaldamento localizzato (cosiddetti “hot-spot”). Una cella FV ombreggiata/sporca risulta infatti caratterizzata da una corrente di lavoro inferiore rispetto alle celle FV “pulite” collegate elettricamente in serie. Se tale differenza di corrente diventa eccessiva, si verifica l’inversione della polarità della tensione della cella “sporca”, che si comporterebbe a tutti come un carico elettrico, assorbendo la corrente elettrica generata dalle celle FV pulite e dissipando tale energia sotto forma di calore. Ciò può provocare il surriscaldamento localizzato della cella FV fino a raggiungere temperature di svariate centinaia di gradi e causarne il degrado irreversibile o, in casi estremi, essere causa di incendio. Per prevenire tale fenomeno, in ogni modulo fotovoltaico sono installati i diodi di by-pass, ovvero componenti elettronici in grado di escludere dal funzionamento la porzione di moduli FV affetta da sporcizia (o ombreggiamento) e prevenire il verificarsi di questo fenomeno potenzialmente pericoloso, seppur a scapito di una minor produzione energetica;
- l’azione meccanica esercitata da polveri/particolato sul vetro frontale dei moduli FV, nonché eventuali operazioni di pulizia particolarmente aggressive, possono comportare l’abrasione superficiale del vetro stesso, con perdita delle proprietà ottiche (trasparenza e proprietà anti-riflettenti) e conseguente minor generazione energetica.



Ovviamente l’entità e la severità delle sovra-menzionate problematiche, è anche dipendente dalle condizioni installative dei moduli FV stessi, quale ad esempio l’angolo di inclinazione dei moduli FV. Se i moduli sono molto inclinati, ciò può favorire l’accumulo di sporcizia nella porzione inferiore dello stesso, in corrispondenza della cornice (➔ sporcamento non omogeneo). Di contro, una maggiore inclinazione agevola la naturale azione pulente esercitata dalle precipitazioni atmosferiche.

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

3.3 Tecniche di pulizia

La problematica del *soiling* è già stata affrontata dagli operatori del settore nonché approfonditamente studiata in ambito accademico, al fine di ottimizzare le tecniche con le quali mitigarla.

Esistono differenti tecniche di pulizia di moduli fotovoltaici disponibili sul mercato, ciascuna di esse caratterizzata da pregi e difetti.

La cadenza con cui effettuare queste operazioni solitamente è di 1 – 2 volte all'anno, ma può variare in funzione della località di installazione e alle caratteristiche dell'impianto FV.

Nelle zone più aride, la pulizia che prevede utilizzo di acqua potrebbe essere non praticabile, per difficoltà nell'approvvigionamento della risorsa (e del suo costo), che potrebbe inoltre indurre le autorità locali a proibirne l'uso a tale scopo.

Le tecniche di pulizia senza acqua (dry-cleaning) sono generalmente meno efficaci, in quanto l'acqua può agevolare la dissoluzione di eventuale particolato o altri composti chimici depositati sulla superficie e facilitarne in seguito la rimozione. In assenza di acqua, le polveri devono essere asportate tramite azione meccanica, ovvero tramite spazzole o aria compressa.

In caso di azione meccanica, uno dei principali rischi è quello di danneggiare il vetro frontale dei moduli e danneggiare il rivestimento anti-riflesso di cui sono dotati, compromettendo irreparabilmente le proprietà ottiche del vetro stesso e conseguentemente le prestazioni energetiche del modulo FV.

Anche utilizzando spazzole "anti-graffio", le particelle stesse di sabbia possono infatti effettuare un'azione abrasiva sufficiente ad arrecare dei danni. Alcune particolari tipologie di particolato possono inoltre risultare particolarmente "appiccicose" e aderenti al vetro, richiedendo di conseguenza una maggiore pressione per consentire la loro rimozione. Tale maggiore pressione può eventualmente causare la flessione del modulo FV con conseguente formazione di micro-fratture nelle celle FV, cosa che può causare l'insorgere di molteplici fenomeni di degrado e decadimento premature delle prestazioni dei moduli FV.

Alla luce delle osservazioni riportate è comprensibile come la pulizia tramite acqua, ove praticabile, sia sempre preferibile alle tecniche "a secco".

Si riporta di seguito un elenco delle principali tecniche per la pulizia dei moduli fotovoltaici in impianti di grande taglia:

- il sistema più semplice è ovviamente la pulizia manuale dei moduli fotovoltaici, tramite spazzole con manico telescopico eventualmente collegate ad una fonte idrica, in grado di raggiungere anche i moduli installati in posizione più elevata; tale tecnica richiede un numero "elevato" di operatori non qualificati ed è tendenzialmente caratterizzata da un maggior rischio di danneggiamento dei moduli FV;
- il sistema di gran lunga più diffuso ed utilizzato prevede l'installazione di spazzole rotanti anti-graffio su automezzi (trattore e/o furgone) in grado di circolare tra le strutture di sostegno dei moduli FV. Questo sistema può prevedere l'utilizzo di acqua oppure può essere effettuato in modalità "dry cleaning". Le spazzole sono installate solitamente su un braccio meccanico in grado di adattarsi automaticamente a distanza e inclinazione dei moduli fotovoltaici ed effettuare efficacemente la pulizia della superficie. Per consentire tale tipologia di pulizia è necessaria una distanza minima tra i filari di moduli FV, tipicamente variabile tra 2 e 3 metri a seconda della tipologia di automezzo previsto. Gli automezzi sono tipicamente dotati di fari, il che consente di effettuare queste operazioni anche in orario notturno, minimizzando le perdite per ombreggiamento sui moduli FV

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

derivanti dal transito dell'automezzo e minimizzare eventuali rischi per la sicurezza, in quanto i moduli FV (non essendo irraggiati dal sole) non sono in tensione;



- i cosiddetti sistemi “semi-automatizzati” prevedono l’impiego di dispositivi robotici che, solitamente utilizzando la cornice metallica dei moduli fotovoltaici come “binario”, sono in grado di muoversi automaticamente lungo la stringa ed effettuare la pulizia dei moduli. Tali dispositivi devono però essere manualmente posizionati all’inizio di ogni stringa di moduli FV e, una volta completata una stringa, devono essere manualmente spostati sulla successiva; sono necessari almeno due operatori per ciascun dispositivo, al fine di effettuare le operazioni di spostamento. Uno dei vantaggi di questi di questo metodo è che i dispositivi possono essere stoccati al chiuso nei periodi di non utilizzo, prolungandone potenzialmente la vita utile;



- sistemi “automatizzati”: si tratta di sistemi robotici completamente automatizzati. Viene in questo caso installato un dispositivo su ciascun filare di moduli FV che è in grado, solitamente tramite binari dedicati, di spostarsi lungo la sua struttura effettuando la pulizia dei moduli FV. Sono sistemi che non richiedono l’impiego di alcun operatore. Questa tipologia di sistemi ha, ad oggi, riscontrato un successo e una diffusione molto limitata in quanto i costi di installazione e manutenzione di tali dispositivi sono frequentemente tali da non rendere conveniente il loro utilizzo.

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4 Pulizia dei moduli per l'impianto FV in oggetto

4.1 Moduli FV

I moduli fotovoltaici selezionati per il dimensionamento dell'impianto e per la redazione del presente progetto sono realizzati dal produttore Longi, modello LR7-72HGD-620M, e presentano una potenza nominale a STC² pari a 620 Wp.

Ciascun modulo è composto da 144 mezze-celle realizzate in silicio mono-cristallino ad elevata efficienza, vetro frontale temprato ad elevata trasparenza e dotato di rivestimento antiriflesso, backsheet posteriore polimerico trasparente e cornice in alluminio, per una dimensione complessiva pari a 2'382 x 1'134 x 30 mm ed un peso pari a 33,5 kg.

4.2 Sistema di lavaggio previsto per l'impianto FV in oggetto

Per l'impianto agrovoltaiico oggetto della presente iniziativa progettuale è previsto l'impiego di sistemi dotati di apposite spazzole rotanti anti-graffio, che potranno eventualmente operare con l'ausilio di un getto di acqua demineralizzata, in maniera tale da sfruttare la combinazione dell'azione meccanica delle spazzole con l'azione pulente dell'acqua.

Tale scelta risulta infatti il miglior compromesso in termini di efficacia, ovvero tempo necessario a completare la pulizia dell'intero impianto in rapporto al costo dell'operazione, ed affidabilità.

Si prevede di effettuare le operazioni di pulizia con cadenza semestrale. Eventuali interventi di pulizia straordinaria, ad esempio in seguito a particolari eventi meteorologici che possono comportare la deposizione di importanti quantitativi di polvere, verranno effettuati solo in caso di necessità ed attivati in seguito a ispezione visiva dei moduli.

Non è attualmente prevista l'esecuzione periodica della pulizia della superficie posteriore dei moduli fotovoltaici, nonostante si preveda l'impiego di moduli bifacciali, in quanto più riparata e intrinsecamente meno soggetta al fenomeno del soiling. Eventuali interventi straordinari di pulizia di tali superfici verranno attivati in seguito ad ispezione visiva ed effettuati manualmente, tramite spazzole dotate di manico telescopico.

² STC - Standard Test Conditions: irraggiamento solare 1000 W/m², temperatura modulo FV 25°C, Air Mass 1,5

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.3 Approvvigionamento idrico

4.3.1 Stima consumi idrici e approvvigionamento (fase di cantiere)

Il fabbisogno della risorsa idrica nella fase di cantiere è limitato all'attività di umidificazione del terreno al fine di ridurre il sollevamento di polveri. Questa attività è particolarmente necessaria nei mesi più caldi, durante la stagione estiva, motivo per il quale si stima che sarà svolta durante un massimo di 90 giorni (60 giorni lavorativi).

Si ritiene che la suddetta attività possa essere svolta soddisfacentemente mediante l'utilizzo di una autobotte al giorno (capacità media di 15.000 l) durante il periodo indicato di 60 giorni.

Nella seguente tabella viene indicato il fabbisogno stimato della risorsa idrica nella fase di cantiere, il cui approvvigionamento avverrà mediante fornitori locali di acqua non potabile.

Attività	Fabbisogno giornaliero	Fabbisogno Totale
Umidificazione terreno	15 mc	900 mc

L'approvvigionamento sarà garantito tramite autobotti.

4.3.2 Stima consumi idrici (fase di esercizio impianto agri-FV)

Il consumo idrico relativo all'esercizio di un impianto agri-voltaico è fondamentalmente correlato alle operazioni di pulizia dei moduli FV, all'irrigazione delle opere di mitigazione e alla coltivazione delle specie agricole.

In questo capitolo si analizzerà soltanto il consumo idrico relativo alla pulizia dei pannelli. Per i consumi idrici relativi alla coltivazione e alle opere di mitigazione si rimanda agli elaborati dedicati.

Per stimare con precisione i consumi idrici necessari per effettuare le operazioni di pulizia dei moduli fotovoltaici è necessario conoscere il sistema di pulizia (tecnologia/modello/produttore), tuttavia la selezione di tale sistema sarà effettuata dall'operatore di O&M che prenderà in carico le operazioni di manutenzione ordinaria dell'impianto in seguito alla sua realizzazione.

In fase progettuale, risulta tuttavia possibile stimare il consumo idrico a partire da dati reperibili in letteratura scientifica di settore. Sebbene i dati reperibili siano molto eterogenei in quanto fortemente dipendenti dalla tecnologia dei moduli FV e soprattutto dalle condizioni climatiche di installazione dell'impianto, il valore più frequentemente riportato fa riferimento ad un consumo di circa **0,5 litri di acqua per ogni metro quadrato**^{3,4} di superficie da pulire (ovvero la superficie frontale dei moduli fotovoltaici).

La superficie complessiva dei moduli fotovoltaici del presente impianto agrovoltico ammonta a circa 87.016 m² (32'214 moduli FV aventi dimensioni: 2.382m * 1.134m).

È possibile quindi stimare il consumo di acqua per ogni ciclo di pulizia:

³ Jones, R.K.; Baras, A.; Al Saeeri, A.; Al Qahtani, A.; Al Amoudi, A.O.; Al Shaya, Y.; Alodan, M.; Al-Hsaien, S.A. Optimized Cleaning Cost and Schedule Based on Observed Soiling Conditions for Photovoltaic Plants. IEEE J. Photovolt. 2016, 6, 730–738.

⁴ A.Garcia et al. - Study of different cleaning methods for solar reflectors used in CSP plants - Energy Procedia 49 (2014) 80 – 89

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

$$Consumoidrico = 0.5 \frac{l}{m^2} \times 87'016 m^2 \div 1000 \frac{l}{m^3} = 43,51 \frac{m^3}{ciclodipulizia}$$

in considerazione delle condizioni climatiche del sito di installazione, è ragionevole ipotizzare una frequenza semestrale delle operazioni di pulizia.

Il consumo idrico annuale per il presente impianto FV così stimato ammonta quindi a circa 87 m³/anno.

Per quanto concerne l'approvvigionamento idrico si prevede di effettuare l'approvvigionamento di acqua demineralizzata tramite autobotte.

Considerando una capacità di trasporto di 15'000 l per singola autobotte, l'approvvigionamento è garantito dall'impiego di circa 6 autobotti all'anno.

In alternativa, potrà essere considerata la pulizia dei moduli FV in modalità "dry-cleaning", ovvero senza l'impiego di acqua.

00	12-12-2024	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione