UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

Corso di Laurea Triennale in
Ingegneria Elettrica

TESI DI LAUREA

MONITORAGGIO DI CENTRALI SOLARI A PANNELLI FOTOVOLTAICI CON TERMOGRAFIA A RAGGI INFRAROSSI: CONFRONTO TRA IL CONTROLLO REMOTO DA DRONE E DA AEREO

Relatore: Chiar.^{mo} Prof. Ing. Giovanni Tanda

Co-Relatori: Dr. Mauro Migliazzi

Allievo: Lorenzo Lastrico

Anno Accademico:
2021/2022

Sommario

La presente tesi affronta il telerilevamento di guasti a pannelli fotovoltaici di centrali solari, con l'ausilio di termocamere a infrarossi installate su velivoli differenti: drone e aereo.
Ha lo scopo di confrontare le prestazioni delle due modalità di sorvolo e verificare a che condizioni è possibile impiegare l'aereo al posto del drone; si propone, inoltre, di valutare la performance di sensori diversi e di confrontare come gli stessi guasti sono rilevati in sorvoli successivi.

Nel **Capitolo 1** si definiscono gli elementi costitutivi di un impianto solare, i concetti di termografia e di termocamera; si introducono anche le tipologie di guasto esistenti e le tecniche di ispezione moderne. Successivamente, è approfondito lo stato dell'arte della rilevazione con termocamere all'infrarosso.

Nel **Capitolo 2** si introducono gli strumenti e i metodi usati nel condurre le analisi; inoltre sono presentate le tipologie di guasto considerate, approfondendone la natura elettrica e la conseguente riduzione della potenza prodotta. Infine, si indaga il *processing* delle immagini e si presentano gli impianti oggetto di approfondimento.

Nel **Capitolo 3** vengono presentati i risultati delle ispezioni termografiche e, anche con il supporto di tabelle e grafici, si studiano i confronti fra drone e aereo e fra i sensori all'infrarosso scelti. Dopo un approfondimento su alcune significative anomalie, si commenta il raffronto fra ispezioni effettuate con drone a distanza di tempo.

Nel **Capitolo 4** si traggono le conclusioni dell'analisi, che ha dimostrato l'efficacia dell'utilizzo dell'aereo al posto del drone e ha individuato le condizioni opportune per l'impiego di sensori MW al posto dei canonici LW. Dopo il commento conclusivo sul raffronto multitemporale del drone, nel quale si sottolinea un generale peggioramento delle condizioni di salute dell'impianto con il passare del tempo, vengono presentati gli sviluppi futuri in questo ambito.

INDICE

Sommario **1**

1 INTRODUZIONE **3**

1.1 Stato dell'arte **6**

2 CAPITOLO 2 ..... **12**

2.1 Piattaforme e sensori impiegati **12**

2.1.1 Risoluzione delle immagini termiche 13

2.2 Classificazione dei difetti sulla base dei rilievi termografici **14**

2.2.1 Cenni sulla cella fotovoltaica 14

2.2.2 Categorie di anomalie termiche 16

2.2.3 Valutazione della gravità delle anomalie e standardizzazione del risultato 17

2.3 Processing delle immagini termiche **18**

2.4 Case studies: impianti di Bene Vagienna e Farigliano (CN) **21**

3 CAPITOLO 3 ..... **24**

3.1 Analisi dell'impianto BVG01 ..... **24**

3.1.1 Ispezione 1 24

3.1.2 Ispezione 2 29

3.2 Analisi dell'impianto FRL01 ..... **33**

3.2.1 Ispezione 3 34

3.2.2 Ispezione 4 36

3.3 Approfondimento anomalie **38**

3.3.1 Hotspot 39

3.3.2 Multihotspot 40

3.3.3 Diodo 41

3.3.4 Estesa 42

3.3.5 Stringa 43

3.4 Dati di sintesi **43**

3.4.1 Difetti riscontrati sul totale dei pannelli di ogni singolo impianto 44

3.4.2 Tabelle di riepilogo dei difetti in base alle varie tipologie 44

3.4.3 Tabelle di sintesi del confronto fra drone e aereo 45

3.5 Confronto fra sorvoli successivi del drone **49**

3.5.1 BVG01 49

3.5.2 FRL01 52

4 CONCLUSIONI **55**

BIBLIOGRAFIA **56**

Rigraziamenti **58**

1 INTRODUZIONE

L'attuale e crescente sensibilità alle tematiche ambientali ha incentivato lo sviluppo di tecnologie in grado di produrre energia da fonti rinnovabili: oggi si può sfruttare, fra le altre, la luce solare.

Questo è possibile grazie all'effetto fotovoltaico, cioè alla capacità di alcuni materiali semiconduttori di generare elettricità se colpiti da radiazione luminosa; il silicio, elemento molto diffuso in natura, è il materiale di partenza per la costruzione della cella fotovoltaica. Questa è l'unità elementare di ciascun impianto solare, come si vede in Figura 1, ed è un dispositivo in grado di produrre circa 1.5 W in corrente continua. Essendo questa potenza normalmente insufficiente per gli usi comuni, più celle sono collegate elettricamente e incapsulate in una struttura a formare il modulo, componente base commercialmente disponibile. Più moduli formano il pannello; assemblandoli in serie si ottengono le stringhe, che, articolate in parallelo, danno vita all'impianto solare vero e proprio.

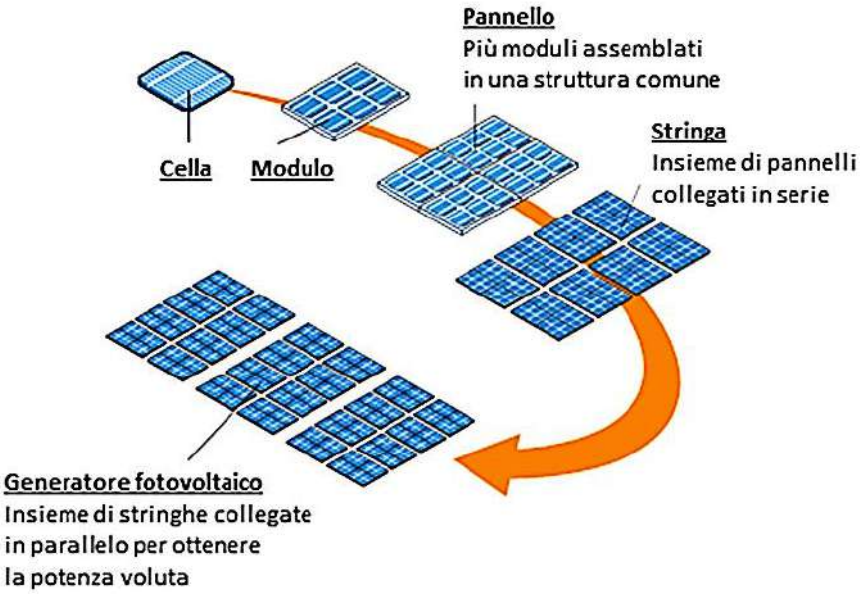


Figura 1 Elementi costitutivi di un impianto solare.

La Figura 2 mostra che a valle dei moduli fotovoltaici è posto l'inverter, che trasforma la corrente continua generata dalle celle in corrente alternata, immessa in rete; i dispositivi collocati fra la centrale solare e l'utenza finale sono detti "*balance of system*" o "BOS" [1].

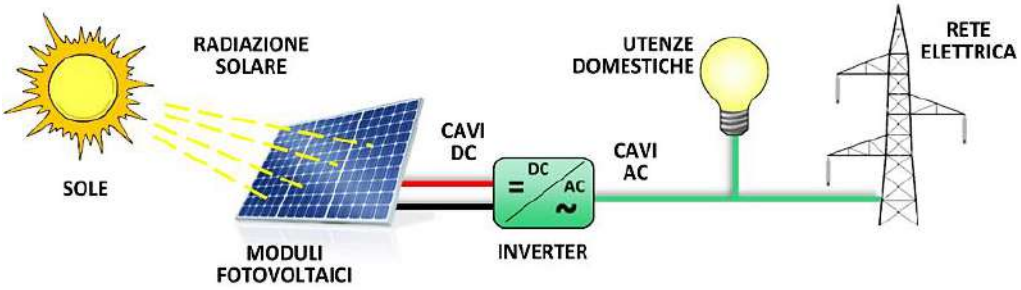


Figura 2 Produzione di energia con moduli fotovoltaici.

I pannelli possono essere orientati verso il Sole su strutture fisse o in grado di seguirne il movimento allo scopo di incrementare l'esposizione (impianto a inseguimento).
Le centrali solari in Italia sono aumentate notevolmente negli ultimi anni: al 31/12/2021 sono 1'016'083 (+8.6% rispetto al 2020 e +2819% rispetto al 2008). Inoltre, la potenza installata complessiva si attesta a 22'594 MW, ovvero il 4.4% in più rispetto all'anno precedente e il 4578% in più rispetto al 2008 [2].
In particolare, la Figura 3 mostra che la provincia di Cuneo, dove si trovano entrambi gli impianti oggetto dell'approfondimento di questa tesi, è la prima dell'Italia settentrionale e la terza a livello nazionale in termini di energia prodotta [2].

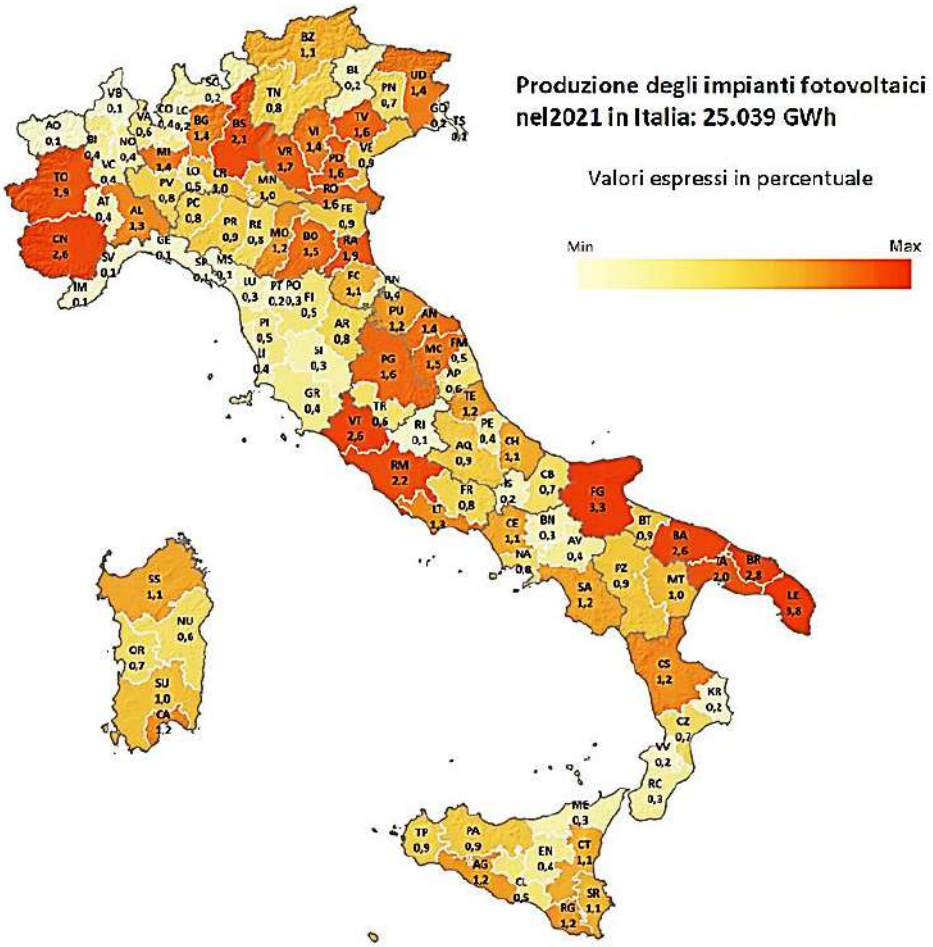


Figura 3 Province italiane e produzione di energia fotovoltaica.

Al tempo stesso, il peso sempre maggiore del fotovoltaico impone di identificare con particolare attenzione i guasti cui gli impianti sono soggetti, perché influenzano in modo determinante l'efficienza e l'affidabilità della sezione coinvolta.
In effetti, inducendo un comportamento anomalo del modulo in questione, i malfunzionamenti portano a stress termico-meccanici, rischi per la sicurezza e distribuzioni anormali di temperatura superficiale [3]. Infatti, nonostante le celle assorbano buona parte della radiazione solare incidente, una consistente porzione non viene convertita in elettricità, ma in calore: il conseguente incremento di temperatura della cella determina un calo di efficienza (stimato in una riduzione dello 0.28-0.52% per 1 K) e quindi di potenza

prodotta in output; questo fenomeno è ovviamente accentuato in corrispondenza delle anomalie termiche indotte dai guasti. Peraltro la vita dei pannelli si dimezza a ogni aumento di 10 K della temperatura operativa [4], [5].

I principali tipi di disfunzione si manifestano durante le fasi di produzione, trasporto, installazione e funzionamento sul campo; sono mostrati in Figura 4. Possono coinvolgere un pannello in singoli punti (*single o multiple hotspot*), porzioni (*diode*), o nella sua interezza (*extended*); può risultare difettosa anche un'intera stringa.

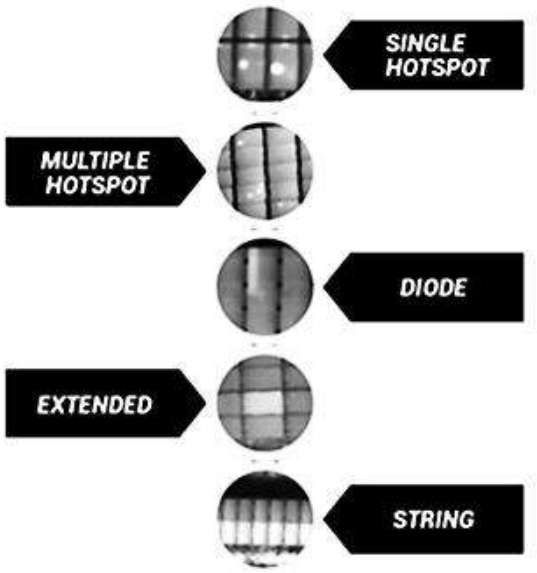


Figura 4 Tipologie di guasto.

Occorrono, quindi, strumenti e metodi diagnostici che consentano di individuare rapidamente i guasti e distinguerne facilmente la tipologia, così da ridurre l'impatto del malfunzionamento e programmare al meglio la manutenzione.

Le tecniche sviluppate negli ultimi anni sono molteplici; quella convenzionale prevede di ricercare caratteristiche V-I anomale, che evidenziano la presenza di un guasto senza indagarne la causa e la posizione. Sebbene questo procedimento sia affidabile, richiede una serie di misure elettriche aggiuntive sul campo, che comportano l'impiego di manodopera specializzata e tempi lunghi, incompatibili con il monitoraggio di impianti fotovoltaici di grande taglia [3], [6].

Le tecniche di elettroluminescenza (EL) permettono invece di localizzare con precisione celle rotte, porzioni inattive di moduli, stringhe difettose. Alla base del funzionamento, sta la ricombinazione radiativa dei portatori di carica eccitati, che causa l'emissione di luce; poiché l'intensità luminosa è direttamente proporzionale alla tensione, le zone elettricamente inattive appaiono come regioni scure. L'EL, tuttavia, si scontra con molti limiti pratici: le ispezioni vanno condotte di notte (in condizioni opposte a quelle di normale funzionamento dell'impianto fotovoltaico) o interrompendo l'alimentazione, consentono diagnosi qualitative e non quantitative, il set-up è costoso e complesso. Conseguentemente, l'EL è impiegata in impianti di piccola taglia o per esigenze specifiche [3], [6].

Altre modalità di monitoraggio, meno utilizzate, sono vincolate alla struttura degli impianti fotovoltaici e sono soddisfacenti solo su piccola scala: per esempio, è possibile effettuare il tracking del punto di lavoro associato alla massima erogazione di potenza [6].
Una particolarmente apprezzata modalità per il rilevamento dei guasti è la termografia aerea all'infrarosso, nota anche come "*Aerial Infrared Termography*" (aIRT); rispetto agli altri metodi, consente di ispezionare vaste aree in tempi più brevi e con costi inferiori.
Si dotano *Unmanned Aerial Vehicles* ("UAVs", droni) di termocamere agli infrarossi, cioè dispositivi in grado di rilevare l'energia termica irradiata dal target; quest'ultimo emette sotto forma di onde, la cui lunghezza dipende dalla temperatura superficiale e rientra proprio nell'IR. Una volta focalizzato l'oggetto di interesse, l'energia captata in un determinato intervallo di lunghezze d'onda, caratteristiche del sensore, è tradotta dalla termocamera in immagini termiche, da analizzare con l'ausilio di appositi software; imponendo i valori di parametri significativi (si ricordano, fra gli altri, temperatura ambientale, umidità dell'aria ed emissività) è possibile conoscere la temperatura del corpo di interesse. Non è richiesto alcun contatto diretto fra esso e il sensore e questo consente di mantenere inalterate le caratteristiche del target, rendendo la misura non invasiva. Va però riconosciuto che l'aIRT impiega costose termocamere e richiede tecnici esperti, per valutare i parametri di influenza e stabilire una opportuna altezza di volo in funzione della risoluzione desiderata [6].
Relativamente alla diagnostica in impianti fotovoltaici, quindi, l'aIRT permette di individuare i guasti con facilità, dato che hanno una temperatura maggiore rispetto a quanto li circonda e quindi emettono a diversa frequenza [7].
Fino ad oggi, l'aIRT è stata condotta utilizzando droni e, prevalentemente, termocamere nel range 8-14 µm; tuttavia, grazie al successo riportato e ai vantaggi che comporta, stanno nascendo nuove prospettive, oggetto di questa tesi. Da una parte, sarà vagliata la possibilità di impiegare termocamere più economiche, funzionanti in una differente forbice di lunghezze d'onda (fra i 3 e i 5 µm); dall'altra, si intende valutare l'efficacia dello sfruttamento di aerei al posto dei droni. Se venisse confermata, sarebbe possibile effettuare sorvoli di aree ancora più vaste e in tempi sempre più limitati, senza personale sul posto e con meno restrizioni o necessità di permessi speciali.
Per esplorare entrambi gli scenari, vengono adottati come riferimento i sorvoli effettuati con droni e termocamere dal range canonico.

1.1 Stato dell'arte

In questa sottosezione, vengono esposte le conoscenze attualmente presenti in letteratura sull'infrarosso e sulla termografia all'infrarosso.
La peculiarità dell'aIRT risiede nell'impiego combinato di un velivolo telecomandato (solitamente un drone) e di una termocamera; il funzionamento di quest'ultima si basa sull'irraggiamento. È un fenomeno fisico di trasmissione del calore, in accordo a cui le superfici di due corpi a diversa temperatura interagiscono tramite onde elettromagnetiche

(EM) . Si tratta di perturbazioni di natura contemporaneamente elettrica e magnetica, che trasportano energia da un punto all'altro sotto forma di quanti o fotoni.
Si consideri un corpo, sulla cui superficie incide un'onda EM di lunghezza λ e la cui energia per unità di tempo, superficie e lunghezza d'onda vale E_λ .

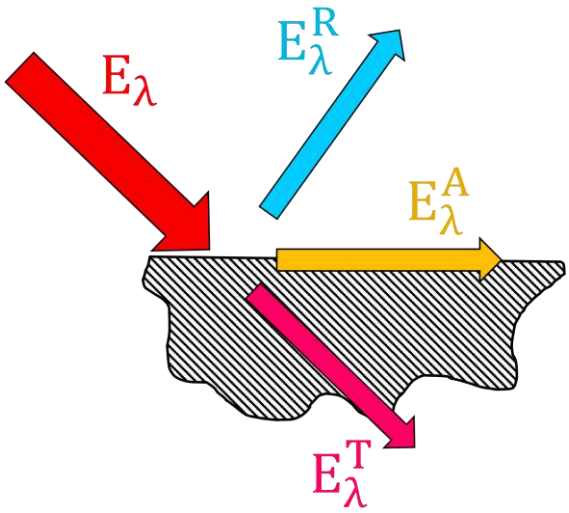


Figura 5 Onda EM incidente su corpo.

Come mostrato in Figura 5, per mantenere il bilancio di energia costante, l'oggetto riflette, assorbe e trasmette E_λ; vale quindi la relazione:

$$E_\lambda = E_\lambda^R + E_\lambda^A + E_\lambda^T \qquad (1)$$

Dividendo ambo i membri per E_λ, si ottiene l'equazione:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \qquad (2)$$

In cui $\rho_\lambda, \alpha_\lambda, \tau_\lambda$ sono rispettivamente i coefficienti di riflessione ("riflessività"), assorbimento ("apsorptività") e trasmissione ("trasmissività") del materiale, alla lunghezza d'onda λ; sono ovviamente privi di dimensioni e il loro valore varia tra 0 e 1. Esprimono le caratteristiche della superficie del corpo quando su di essa incide energia radiante (proveniente da altri corpi).
Quando i parametri assumono valori particolari, il corpo viene classificato in modo specifico.
Nel caso in cui $\tau_\lambda = 0$, è detto "opaco"; se è contemporaneamente nullo anche ρ_λ, la superficie assorbe tutta la radiazione incidente. In particolare, si definisce "corpo nero" quello che non trasmette e non riflette per ogni λ e che, quindi, è anche un assorbitore perfetto ($\alpha_\lambda = 1$ per qualunque lunghezza d'onda).
È possibile dimostrare che il corpo nero emette, a una certa temperatura e frequenza, la massima energia radiante. In effetti la potenza termica raggiante $E_{n\lambda}$ (detta anche "potere emissivo") proposta dal corpo nero è stata calcolata da Planck nel 1901; risulta essere una complessa funzione della temperatura assoluta e della lunghezza d'onda:

$$E_{n\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \tag{3}$$

Dove c è la velocità della luce nel vuoto $= 3.08 \times 10^8$ m/s, h è la costante di Planck $= 6.67 \times 10^{-34}$ Js, λ è la lunghezza d'onda espressa in m, k è la costante dei gas di Boltzmann $= 1.38 \times 10^{-23}$J/K, T è la temperatura considerata in K; la potenza termica raggiante risulta quindi espressa in $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 m}}$ [6][8].

Per un corpo non nero, la potenza emessa E_λ (a parità di T e λ) è inferiore a $E_{n\lambda}$; è possibile dunque introdurre un coefficiente di emissione ("emissività") ε_λ, definito come la potenza emessa dalla generica superficie rapportata a quella irradiata dal corpo nero alla stessa T e λ:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{n\lambda}} \tag{4}$$

Il coefficiente di emissione descrive il comportamento della superficie del corpo in fase di emissione e su base monocromatica (cioè a una fissata lunghezza d'onda) è sempre uguale ad α_λ (legge di Kirchhoff).

Tutti gli oggetti quindi, in accordo alla propria emissività e temperatura assoluta $T > 0$ K, irradiano energia termica sotto forma di onde EM; le temperature superficiali della maggior parte dei corpi terrestri, tipicamente comprese fra 0 e centinaia di K, fanno sì che l'emissione sia caratterizzata prevalentemente da λ tipiche dell'infrarosso, collocate fra 0.7 e 100 µm. Si tratta quindi di perturbazioni invisibili all'occhio umano, che percepiamo come calore. L'emissione dei corpi è disomogenea rispetto alla lunghezza d'onda e presenta un picco la cui λ decresce all'aumentare della temperatura; parimenti, più calda è la superficie e più intensa è la radiazione EM irradiata.

I pannelli delle centrali solari non fanno eccezione ed è per questo che le termocamere impiegate nella diagnostica sono sensibili a intervalli di lunghezze d'onda IR.

Uno degli aspetti più impegnativi della termografia aerea all'infrarosso risiede allora nel fissare opportunamente l'emissività dei moduli inquadrati; quest'ultima è strettamente vincolata alla struttura dei pannelli e, in particolare, al materiale che li ricopre.

Esistono due metodi principali per la determinazione della ε delle celle fotovoltaiche. Il primo, basato sulla Legge di Planck, consiste nell'usare uno spettrometro per comparare l'intensità della radiazione spettrale del campione con quella di un corpo nero. Il secondo, invece, è indiretto: si analizza la riflettanza spettrale e si determina la apsortività, che, in accordo alla legge di Kirchhoff, coincide proprio con l'emissività [9].

Si ipotizzi di schematizzare la cella fotovoltaica a silicio cristallino (c-Si) come uno strato di alluminio con sovrapposto uno di Si drogato p, spesso 200 µm. Al fine di evitare il surriscaldamento della cella, questa deve essere idealmente sormontata da un materiale trasparente alla radiazione solare ed emettitore perfetto nell'infrarosso ($\varepsilon = 0$ per $\lambda < 4$ µm, $\varepsilon = 1$ per $\lambda \geq 4$ µm); è possibile simularlo con uno strato di silice (SiO_2) confrontando l'efficacia di uno strato uniforme spesso 5 mm e di una costruzione più articolata: uno strato di 100 µm al di sotto di una struttura con 4 piramidi a base quadrata alte 20 µm (Figura 6).

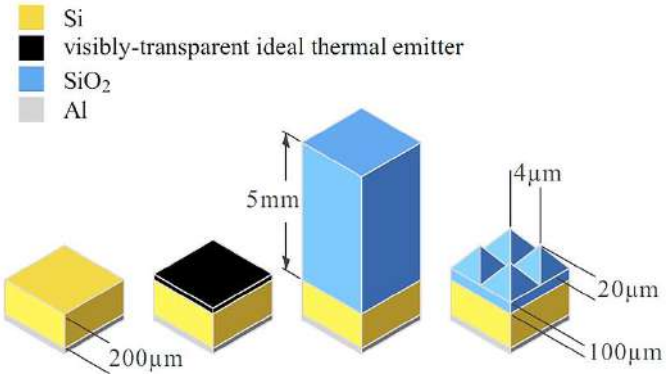


Figura 6 Cella fotovoltaica e strati aggiuntivi per il raffreddamento radiativo [5].

Grazie a simulazioni di natura termica ed elettromagnetica e a un processo iterativo, si giunge all'andamento della temperatura superficiale in funzione dell'irraggiamento, ipotizzando una temperatura ambientale di 300 K; l'evoluzione dell'emissività con la lunghezza d'onda permette di comprendere meglio tale sviluppo (Figura 7) [5].

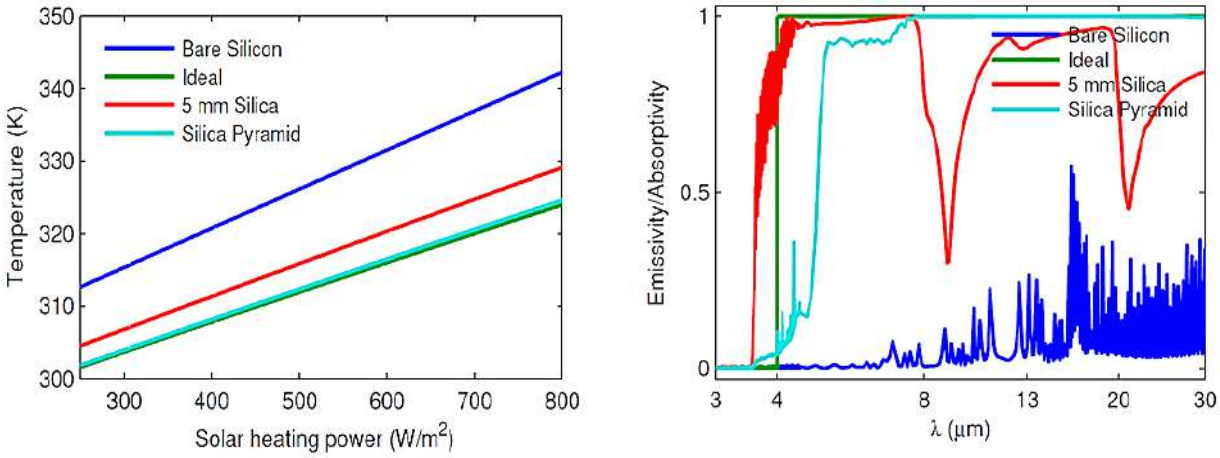


Figura 7 Andamento di temperatura vs irraggiamento e dell'emissività vs lunghezza d'onda [5]

Si osserva che l'adozione della struttura piramidale non solo garantisce un minore riscaldamento della superficie della cella rispetto allo strato uniforme di silice, ma presenta anche un'emissività priva di bruschi scostamenti. Questo fattore è determinante, perché consente alle termocamere a infrarossi di effettuare letture a ε costante.

Queste considerazioni necessitano di essere parzialmente riformulate: nella pratica, infatti, le celle fotovoltaiche non sono sormontate da silice puro, ma da vetro, contenente SiO_2 in percentuali variabili fra il 70 e l'80%; tra l'altro hanno possibilità di raffreddarsi anche tramite fenomeni convettivi, naturali o forzati [4].

Studi recenti hanno reso possibile la creazione di un modello dell'emissività di una cella fotovoltaica c-Si, al variare di λ nel range 0.35-16 μm; il modello è esteso alla valutazione dell'ε di un pannello solare, considerato come un insieme di celle al di sotto di una copertura di vetro soda-lime (a basso contenuto di ferro).

Anzitutto, osservazioni al microscopio hanno consentito di verificare che una cella c-Si, pur senza l'aggiunta della sopracitata struttura piramidale di silice, presenta naturalmente asperità casuali riconducibili a piramidi.

L'approccio adottato consente di tener conto di tutte le interazioni fotoniche con le strutture superficiali e dei vari strati assorbitori ed emettitori; si calcola l'emissività in modo indiretto, tramite la legge di Kirchhoff. Le misurazioni sono state condotte a temperatura ambiente; dai test è infatti emerso che a giocare un ruolo cruciale nel fissare il valore di ε sono gli strati di Si altamente dopati, la cui emissività varia in modo trascurabile con la temperatura.
I vari elementi costitutivi la c-Si sono riportati in Figura 8, che consente anche di apprezzare i singoli contributi all'emissività complessiva del manufatto (sia per la singola cella, che per il pannello ricoperto di vetro soda-lime). La base centrale è realizzata in silicio debolmente drogato p, contornata da sottili e fortemente drogati film di Si; completano la cella uno strato di alluminio, riflettore, e uno di nitruro di silicio, antiriflesso (ARC) [4].

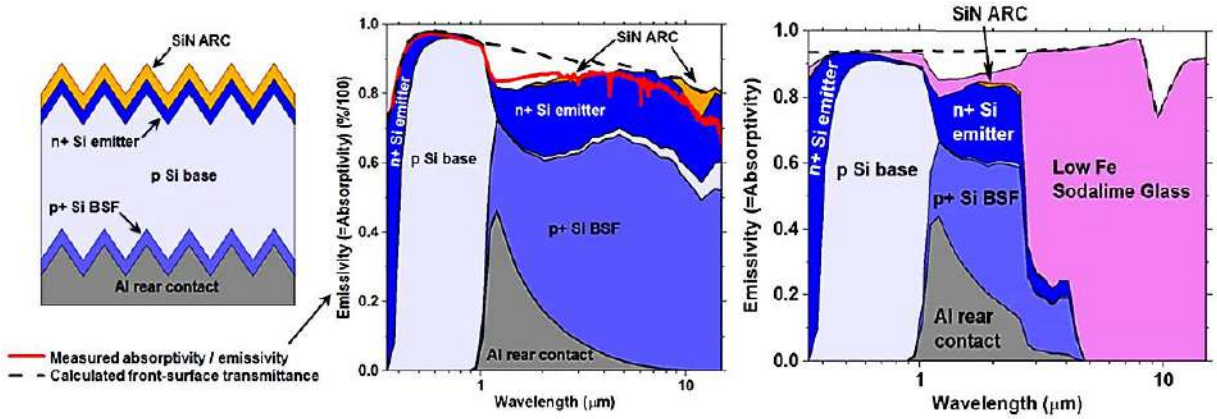


Figura 8 Elementi costitutivi della c-Si e influenza sull'emissività [4]

Il vetro (spesso ~ 3 mm) che ricopre le celle ha dunque un peso di primaria importanza sul valore dell'emissività, specialmente al di sopra di $\lambda \cong 4$ μm. Non deve quindi stupire che quello utilizzato nell'ambito fotovoltaico abbia caratteristiche distinte rispetto ad altri in commercio; in particolare l'elevata trasmissività è dovuta al basso contenuto di ferro.
I vetri soda-lime a basso ferro ("SLG") più diffusi sono Solite™, Diamant® e Pilkington; misurandone il coefficiente di riflessione e considerandoli opachi nell'IR ($\tau = 0$), è stato possibile ricavare l'emissività usando la (2) [9].
La normativa evidenzia la dipendenza dell'emissività da 3 diversi parametri: materiale, superficie (inclusi gli effetti di sporcizia e depositi) e angolo di osservazione, cioè fra la superficie dei pannelli e l'IRT; idealmente vale 90° e in ogni caso deve superare i 30°.
Di conseguenza, le varie componenti del pannello sono caratterizzate da valori di ε specifici.
Le parti in metallo inossidabile o in alluminio lucido e alcuni elementi del BOS hanno emissività molto bassa, collocabile fra 0.1 e 0.3, che rende difficili misurazioni accurate di temperatura. Hanno invece ε compresa fra 0.4 e 0.7 le cornici dei pannelli, in alluminio ossidato, e le staffe di montaggio; al tempo stesso, il coefficiente di emissione vale 0.9 per i materiali ceramici e gli isolanti sintetici. Per quanto riguarda il vetro, l'emissività è generalmente elevata e pari a circa 0.85; può crescere fino a 0.9 se texturizzato o sporco. Considerando però il vetro a ridotto contenuto di ferro, si osserva un calo della ε al crescere

dell'angolo di osservazione: per esempio, se quest'ultimo vale 45° l'emissività si attesta a 0.8, mentre se scende fino a 30°, ε potrebbe valere anche meno di 0.8 [10].
La scelta di ε, sulla base della struttura della cella, non è sufficiente a effettuare misurazioni esatte: bisogna accertarsi che tutto sia predisposto a letture corrette. Possono avere un impatto negativo le condizioni ambientali (vento, irraggiamento, umidità), malfunzionamenti della camera e sua errata calibrazione, angolo di incidenza, altezza di volo troppo ridotta (comporta distorsioni geometriche), riflessi. Questi ultimi generalmente causano un calo di risoluzione e di precisione, ma, nel caso dei pannelli fotovoltaici, l'elevata emissività consente di renderli trascurabili [6].
La presenza di così numerosi e ipoteticamente contemporanei elementi di disturbo a una corretta misurazione si traduce in alcune condizioni irrinunciabili per lo sfruttamento dell'aIRT.
Prima di tutto, il sensore montato sull'UAV dovrebbe essere sempre ortogonale ai moduli. In secondo luogo, l'altezza di volo deve superare i 5 m, così che la termocamera non rilevi l'ombra del drone proiettato sui pannelli. Il cielo deve essere sereno e l'aria secca; è opportuno che la velocità del vento non ecceda i 28 km/h, in modo da non generare turbolenze, e che i sorvoli siano condotti nelle ore centrali del giorno: da una parte, questo implica che i pannelli stanno lavorando a pieno ritmo e le anomalie termiche sono più evidenti, dato che è maggiore la potenza trasformata in calore. Dall'altra, la normativa di riferimento impone un irraggiamento minimo di 600 W/m^2 al livello dei pannelli. Sempre in accordo a questo documento, la temperatura dell'aria può variare fra -10 °C e +40 °C. Infine, la rotta del drone deve essere studiata e documentata [7], [10].
Nel rispetto di queste condizioni, è possibile introdurre alcuni elementi che rendono la termografia all'infrarosso ancora migliore.
In primo luogo, si può affiancare al sensore IR una camera RGB. Le immagini da essa prodotte devono essere analizzate, con dispendio di tempo e manodopera, ma il suo utilizzo consente di verificare quali porzioni di impianto sono ombreggiate da vegetazione, escrementi di uccello, sporcizia o altri elementi che determinano temperature localmente diverse dalla operativa, pur non essendo guasti di natura elettrica o elettronica. In questo modo, si evita il conteggio erroneo di anomalie termiche e si velocizza il processo rispetto all'ispezione sul sito da parte di un operatore [7].
Inoltre, le analisi condotte dopo il volo sono risultate più efficaci: se effettuate in tempo reale, richiedono il doppio del personale e sono imprecise. Bisogna infatti analizzare le anomalie individuate direttamente sul campo, tramite uno schermo soggetto a bagliori, riflessi della luce solare e sporcizia. Tra l'altro i sorvoli durano molto più a lungo, perché ogni guasto richiede l'interruzione del sorvolo per riesaminare l'immagine termica più da vicino all'ipotetico guasto in modo da focalizzarlo meglio [7].

2 CAPITOLO 2

In questo capitolo vengono approfonditi gli strumenti e i metodi usati nelle analisi condotte; inoltre, si evidenziano le tipologie di guasto prese in considerazione, approfondendo la natura elettrica e le loro ripercussioni in termini di potenza perduta. Successivamente, si indaga il *processing* delle immagini e si introducono gli impianti oggetto di approfondimento.

2.1 Piattaforme e sensori impiegati

Le piattaforme aeree usate sono 2: un drone, con termocamera e fotocamera visiva incorporate, e un aereo, appositamente dotato di analoghi strumenti.
Più precisamente, le termocamere adottate per l'esecuzione dei sorvoli desiderati sono 3.
Il drone ha sempre volato equipaggiato da una termocamera DJI sensibile al range 8-14 µm, che ricade nell'intervallo canonico di lunghezze d'onda ("long wavelength" o "LW"); il sensore IR è stato affiancato da una camera RGB. Ciascun sorvolo eseguito in questa modalità è stato assunto come riferimento per il confronto con aereo.
Quest'ultimo è stato adoperato, a seconda dei casi, con 2 distinti dispositivi FLIR; uno funzionante in una forbice di λ simile a quella del drone (7.5-12.5 µm, "LW"), l'altro invece associato a un intervallo di lunghezze d'onda inferiori: 3-5 µm ("medium wavelength", "MW").
Le informazioni salienti sono riportate in Tabella 1, mentre la Figura 9 e la Figura 10 forniscono un supporto visivo [11]–[14].

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Piattaforma usata	Drone: DJI Mavic 2 Enterprise Advanced	Aereo: Tecnam P2006T	Aereo: Tecnam P2006T
Termocamera IR	DJI M2EA	FLIR A8581 SLS	FLIR A8581
Tipo di sensore dell'IRT	Microbolometro VOx non raffreddato	Strained Layer Superlattice (SLS) con raffreddamento Sterling lineare	Antimoniuro di indio (InSb) con raffreddamento Sterling lineare
Range spettrale IRT	LW (8-14 µm)	LW (7.5-12.5 µm)	MW (3-5 µm)
Sensibilità IRT	50 mK	Meno di 40 mK	Meno di 30 mK
Pixel dell'IRT	640 x 512	1280 x 1024	1280 x 1024
Frame rate dell'IRT	30 FPS	Fino a 60 Hz	Fino a 60 Hz
RGB camera (Pixels)	DJI M2EA (8000 x 6000)	9504 x 6336	9504 x 6336

Tabella 1 Caratteristiche salienti dei sensori utilizzati durante i sorvoli.

Figura 9 Il drone Mavic 2 Enterprise Advanced usato durante i sorvoli.

Figura 10 L'aereo P2006T e la termocamera FLIR A8581 usata durante i sorvoli.

2.1.1 Risoluzione delle immagini termiche

Le immagini termiche prodotte dalle termocamere devono essere analizzate con opportuni software (approfonditi in [2.3]) che permettono di ricavare la temperatura di interesse imponendo i valori di alcuni parametri significativi. Fra questi figura l'altezza di volo, che ha ripercussioni fondamentali sulla risoluzione dei fotogrammi: si tratta dell'informazione che quantifica i centimetri al suolo corrispondenti a ciascun pixel. Affinché il confronto fra drone e aereo sia valido, serve che le immagini siano caratterizzate da una risoluzione simile, nota più precisamente come "*ground sampling distance*" (o "GSD").
Il parametro non è influenzato solo dalla distanza fra IRT e target (altezza di volo H, in m), ma anche da larghezza del sensore ("SW", in mm), lunghezza focale ("F", in mm) e lunghezza della foto ("ImW", in pixel); le grandezze sono rappresentate in Figura 11 [15].
Vale infatti la seguente relazione:

$$GSD = \frac{SW \times H}{F \times ImW} \tag{5}$$

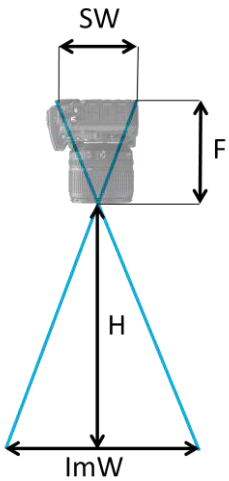


Figura 11 Grandezze di riferimento per il calcolo del GSD.

A partire dalle specifiche degli strumenti e impiegando questo metodo, è stato possibile ricavare $GSD = 7.07$ cm/pixel per la termocamera DJI e $GSD = 7.66$ cm/pixel per le due FLIR.
In alternativa si può calcolare il GSD moltiplicando l'altezza di volo per *l'instantenous field of view* (abbreviato "IFOV"), cioè la proiezione angolare di un solo pixel del sensore nell'immagine IR [10].
In accordo alla normativa, è raccomandato l'uso di una termocamera all'infrarosso di risoluzione minima 320×240 pixel, affiancata da fotocamera RGB di risoluzione molto maggiore [10].
Le ispezioni oggetto di questa tesi si sono avvalse di strumenti dalla risoluzione di gran lunga migliore rispetto alle prescrizioni minime, come evidenziato in [2.1].

2.2 Classificazione dei difetti sulla base dei rilievi termografici

2.2.1 Cenni sulla cella fotovoltaica

L'unità elementare degli impianti solari è la cella fotovoltaica; la sua natura e i collegamenti con cui più entità fondamentali danno vita a pannelli e stringhe permettono di capire quali sono i principali guasti e le relative cause.
La cella è costituita da uno strato di silicio, materiale semiconduttore con 4 elettroni esterni, opportunamente drogato con impurità che ne modificano radicalmente le caratteristiche elettriche: si aggiungono atomi di boro (3 elettroni di valenza, drogaggio P) e di fosforo (5 elettroni di valenza, drogaggio N). Di conseguenza nella regione P abbondano le lacune, che ricoprono il ruolo di cariche positive fittizie, mentre nella N gli elettroni.
In corrispondenza della zona di confine fra i due strati, la giunzione P-N, gli e^- diffondono dalla zona N e si ammassano nella P; le lacune si spostano in modo duale e producono accumulo di carica positiva nella regione N. Fra le due porzioni di materiale drogato, nasce quindi un campo elettrico: non appena è abbastanza forte da contrastare l'ulteriore diffusione di portatori di carica, si giunge all'equilibrio termico stabile.
Illuminando la giunzione, in entrambe le regioni si generano coppie elettrone-lacuna. Il campo elettrico separa gli elettroni in eccesso (generati dall'assorbimento della luce) dalle rispettive lacune: i primi sono spinti da $\vec{E}$ verso la zona N, mentre le seconde verso la zona P. I portatori liberi di carica non tornano più indietro, perché, agendo come un diodo, il campo impedisce loro di invertire la marcia. Collegando la giunzione a un conduttore, si genera un flusso di elettroni che procede dallo strato N (a potenziale maggiore) a quello P (a potenziale minore); fino a quando la cella resta esposta alla luce, fluisce con regolarità corrente continua [16].
La caratteristica della cella fotovoltaica e la curva della potenza prodotta sono riportate in Figura 12. Il collegamento in serie delle celle comporta la somma delle tensioni a vuoto delle singole celle, mentre quello in parallelo determina la somma delle correnti di cortocircuito.

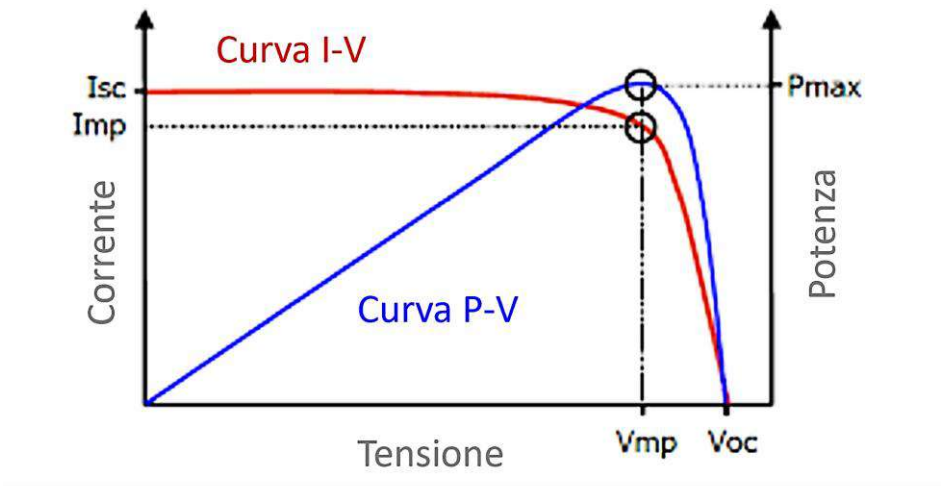


Figura 12 Caratteristica della cella e curva della potenza.

All'interno dei pannelli, più celle fotovoltaiche sono connesse in serie a formare una substringa; il malfunzionamento o l'ombreggiamento di una o più di esse limita la corrente prodotta dalle altre, quindi gruppi di celle vengono collegati in parallelo a diodi di *bypass*. Questi ultimi sono componenti fondamentali, che consentono alla corrente circolante nel modulo di aggirare le celle in ombra o danneggiate: in questo modo, si riduce la corrente circolante nella cella buia (o guasta) e si limita l'assorbimento di potenza, prevenendo riscaldamenti localizzati (*hotspot*).

È comunemente presente un diodo di *bypass* ogni 20 celle, come mostrato in Figura 13.

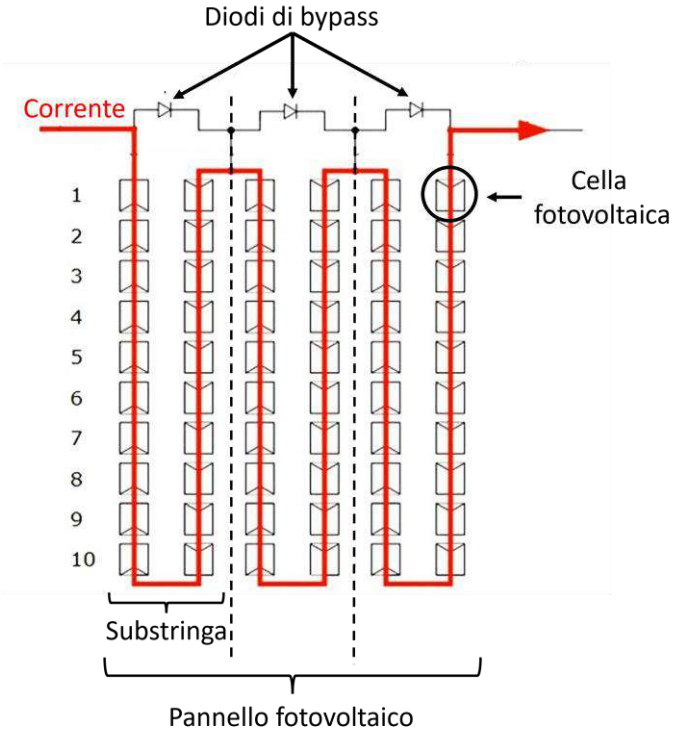


Figura 13 Articolazione delle celle in un pannello, posizionamento dei diodi di *bypass*.

2.2.2 Categorie di anomalie termiche

Le anomalie termiche individuate sono state distinte in 5 categorie, sulla base del loro aspetto; vengono riportate in base all'area del modulo afflitta dal malfunzionamento, dal guasto apparentemente più ristretto (ma non necessariamente meno grave) a quello più esteso. Sono visibili in Figura 14 [7], [10], [17].

1. ***Hotspot* termici**

   Si tratta di anomalie puntuali, le cui alte temperature sono generalmente dovute a celle fotovoltaiche difettose; le cause vanno ricercate in delaminazione del vetro protettivo, stress meccanico, corrosione. È comunque richiesta un'ispezione visiva, così da appurare l'assenza di ombre o sporcizia a cui siano riconducibili le temperature anormali.

   Nell'ambito del funzionamento regolare, la cella fotovoltaica genera tensione positiva ai capi dell'anodo e la corrente fluisce dal catodo verso l'anodo (come in un diodo polarizzato inversamente).

   La fotocorrente generata, invece, si riduce quando una cella è parzialmente all'ombra; al tempo stesso, è collegata in serie ad altre celle fotovoltaiche, che producono corrente e tensione contropolarizzanti quella ombreggiata. Quest'ultima si oppone quindi al passaggio di corrente, con la propria resistenza che genera una tensione di polarità opposta a quella delle altre celle.

   In definitiva, una cella fotovoltaica oscurata assorbe potenza, invece di produrla.

   Gli *hotspot* possono determinare la fusione delle saldature, incendi e la rottura non solo della cella, ma anche dell'incapsulamento in vetro e del diodo di *bypass*. Se quest'ultimo si guasta, o si comporta come circuito aperto (impedendo la richiusura delle correnti in caso di ombreggiature o fratture) o come cortocircuito (bypassando le celle anche in condizioni normali e riducendo la potenza erogata dal pannello).

2. ***Hotspot* termici multipli ("*multihotspot*")**

   Sono classificate come tali anomalie puntuali ripetute sullo stesso pannello; le cause vengono ricondotte a sporcizia, rottura del vetro, modulo coinvolto in cortocircuito (se realizzato in silicio cristallino).

   Le analisi condotte hanno messo in luce *multihotspot* costituiti da un numero variabile di anomalie puntiformi, da due a cinque.

3. **Diodi**

   Coincidono con la disconnessione di una sottostringa di celle, che, non prendendo parte alla produzione di potenza, riducono notevolmente l'output energetico del pannello coinvolto. La corrente prodotta nelle altre sottostringhe fluisce nel diodo di *bypass*, con il rischio di surriscaldarlo e romperlo. Inoltre le celle disconnesse sono comunque irraggiate, ma impossibilitate a produrre corrente; si scaldano quindi in modo uniforme.

   La disconnessione delle substringhe accade, di solito, a causa degli stress termico-meccanici cui il modulo è sottoposto durante il trasporto e l'installazione.

4. **Estesa**
   Consiste nell'omogeneo riscaldamento dell'intera superficie di un modulo; la principale responsabile di questa anomalia è la rottura del vetro, che causa rischio di incendio o shock elettrico. In alternativa, potrebbero concorrere difetti di fabbrica o fusibili bruciati.
   Le estese riguardano abitualmente impianti in funzione da qualche anno o che hanno subito condizioni meteorologiche estreme.
5. **Stringa**
   Tutti i pannelli componenti la stringa guasta sono omogeneamente più caldi del normale e non producono potenza: i moduli coinvolti sono in circuito aperto, perché scollegati o mal assemblati.
   La stringa causa le più alte porzioni di potenza perduta, perché coinvolge molti moduli in contemporanea ed è anche piuttosto frequente.
   Vanno controllati lo stato dell'inverter, i fusibili, il cablaggio.

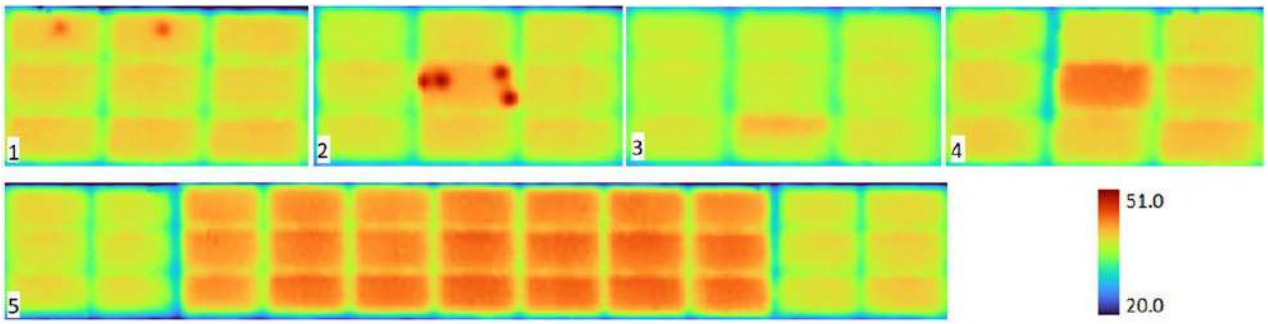


Figura 14 I 5 tipi di guasto introdotti, visibili dalle immagini termiche; la scala è in °C.

2.2.3 Valutazione della gravità delle anomalie e standardizzazione del risultato

La severità delle anomalie individuate è stabilita dalla differenza fra due grandezze significative.
Prima di tutto occorre determinare la temperatura operativa del pannello ("T_{op}"), associata al funzionamento normale; nella trattazione è stata calcolata come media della temperatura dei pixel racchiusi da un poligono (di solito un rettangolo) inscritto in un pannello sano.
In secondo luogo, deve essere valutata la temperatura massima del guasto ("T_{max}"); per gli *hotspot* si identifica come l'effettivo valore massimo dell'anomalia, mentre negli altri casi coincide con la media della temperatura dei pixel racchiusi da una sagoma circoscritta alle anomalie termiche.
Tanto maggiore è $\Delta T = T_{max} - T_{op}$, più grave è il guasto individuato.
La normativa vigente propone una tecnica di normalizzazione del valore di ΔT: si basa sul valore di irraggiamento misurato durante l'ispezione (G_1), il relativo scarto fra temperatura massima e operativa (ΔT_1) e l'irraggiamento standard ($G_2 = 1000$ W/m^2).

$$\Delta T_2 = \left(\frac{G_2}{G_1}\right)^x \times \Delta T_1 \qquad (5)$$

L'esponente x può essere valutato sulla base dell'estensione del guasto (puntuale o diffuso) e del carico dell'impianto fotovoltaico [10]; verrà assunto unitario.
In aggiunta al calcolo dello scarto fra la temperatura operativa e la massima, è bene introdurre un modello per valutare l'impatto delle anomalie termiche sulla potenza prodotta: sebbene ΔT elevati comportino il rischio di incendio o fusione di parti del pannello, anche la natura del guasto deve essere considerata, così da avere un quadro completo delle conseguenze dei malfunzionamenti.
Tuttavia, la valutazione quantitativa delle perdite è estremamente complessa: il modello dipende infatti dall'impianto considerato, oltre che dalla distribuzione e gravità dei difetti; richiede peraltro di tenere in considerazione non solo i risultati forniti dall'aIRT, ma anche da ispezioni visive sul campo e misure elettriche ad hoc, come il monitoraggio delle curve V-I. Conseguentemente, i risultati proposti dal modello sono da considerarsi come una stima indicativa delle effettive perdite [18], [19]
Per quanto riguarda gli *hotspot*, singoli o multipli, le perdite in ogni pannello valgono almeno il 20% della potenza prodotta, ma dipendono dal ΔT, numero di anomalie per modulo e loro posizione sullo stesso (con conseguente coinvolgimento di una, due o tutte e tre le sottostringhe).
Come prevedibile, è possibile stimare una riduzione di $\frac{1}{3}$ della potenza prodotta dal modulo per ogni guasto di tipo diodo che lo coinvolge; analogamente, l'estesa determina un calo di $\frac{1}{n}\%$ della potenza dell'intera stringa (dove con n è inteso il numero di pannelli in ogni stringa).
In particolare, se una stringa ospita più moduli difettosi, l'impatto dei guasti è additivo.
Infine, ovviamente, le stringhe difettose sono inattive e le perdite ammontano al 100% della potenza prodotta in condizioni di normale funzionamento [19].

2.3 Processing delle immagini termiche

Durante i sorvoli effettuati, le termocamere installate su drone e aereo hanno scattato centinaia di fotografie termiche; analizzandole con opportuni software, è possibile ricavare le informazioni di interesse: tipo di anomalia, temperatura operativa e massima.
Prima di tutto però, è necessario prepararsi alla raccolta dei dati; in questo senso, uno dei passaggi fondamentali è la creazione di un ortomosaico. Si tratta di una fotografia ottenuta combinando opportunamente i vari fotogrammi a disposizione, approfittando della parziale sovrapposizione (verticale e orizzontale) di ciascuno con gli adiacenti; come il nome suggerisce, l'ortofoto è una proiezione ortografica e non propone un punto di vista privilegiato: a differenza di quanto si verifica nella vista prospettica, caratteristica del nostro occhio e delle singole fotografie, è come se tutte le parti verticali sparissero e ogni elemento fosse visto dalla propria sommità (Figura 15) [20].

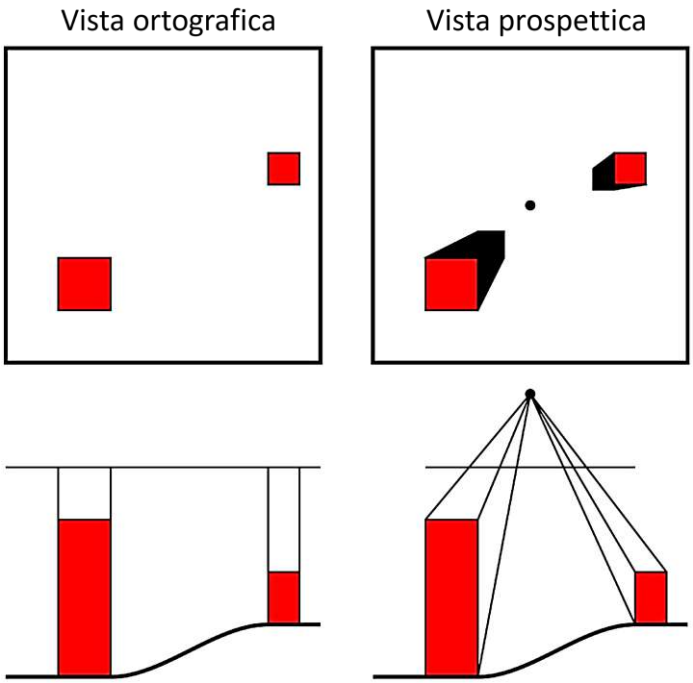


Figura 15 Confronto fra vista ortografica e prospettica [20]**.**

Software appositi consentono di creare l'ortofoto a partire dai singoli scatti, i tasselli elementari del mosaico, per dar vita alla visione di insieme e rettificata dell'impianto. Così facendo, spariscono gli errori dovuti alla posizione del punto di ripresa, all'inclinazione e all'effetto distorcente del sensore IR, ai dislivelli dell'area sorvolata.

Tuttavia, visto che i passaggi illustrati rischiano di deteriorare l'informazione o perderla parzialmente, la ricerca delle anomalie e la loro valutazione deve necessariamente essere compiuta a partire dai fotogrammi reali.

A questo punto, l'ortomosaico creato deve essere sovrapposto allo *shapefile* dell'impianto ispezionato, ovvero un file vettoriale che ricalca la forma della centrale solare e la sua suddivisione in stringhe e pannelli; il preposto software, QGIS [21], permette di scegliere determinati punti sull'ortofoto e indicarne la corrispondente posizione sullo *shapefile*. In base alle indicazioni fornite dall'utente, è in grado di adattare la fotografia rettificata alle forme e all'orientamento del vettoriale, sovrapponendo i due elementi.

Grazie a QGIS, è ora possibile identificare ogni pannello con un codice numerico, che ne riporta la stringa di appartenenza e la posizione nella stessa; le informazioni ricavate dalle successive analisi e letture termografiche (tipo di anomalia, T_{max}, T_{op}, ΔT) arricchiscono progressivamente lo *shapefile*, che al termine dell'operazione raccoglie quindi i dati fondamentali dell'ispezione. Un passaggio chiave nell'ambito della termografia all'infrarosso è ovviamente la ricerca di queste informazioni, da compiersi con apposite applicazioni messe a disposizione di produttori delle termocamere impiegate: si tratta di *DJI Thermal Analysis Tool 3* per i sorvoli con il drone e di *FLIR Research Studio* per le ispezioni con aereo [22], [23].

In entrambi i casi viene richiesto di assegnare valori ai parametri che influenzano i valori delle rilevazioni, che possono essere ricapitolati come segue [10].

1. **Temperatura riflessa**. È indicativa dell'energia che l'ambiente circostante emana verso il pannello e, più precisamente, di quella parte riflessa dal target stesso verso il sensore IR. In alcuni casi è impropriamente assunta pari alla temperatura ambientale, ma nella trattazione è stata fissata a -30.0 °C: il cielo sereno presente durante tutti i sorvoli consente infatti di assumerla vicina a quella della volta celeste.
2. **Emissività**. Si riferisce all'energia irradiata dal corpo oggetto di indagine rispetto a uno nero, a parità di temperatura superficiale e di lunghezza d'onda [1.1]. In tutti i casi, basandosi sulle considerazioni normative e sulla letteratura disponibile, si è imposto $\varepsilon = 0.85$.
3. **Umidità**. È la quantità di acqua o di vapore acqueo contenuta nell'atmosfera; il suo valore è stato ricavato dai dati meteo storici e varia di sorvolo in sorvolo.
4. **Altezza di volo**. Esprime la distanza fra la termocamera all'infrarosso e i pannelli solari sottostanti; il drone ha volato a circa 53 m di altezza, mentre l'aereo ha compiuto le ispezioni a circa 300 m di altezza.

Il software prodotto da FLIR è più sofisticato di quello proposto da DJI e permette di gestire anche le seguenti grandezze.

1. Temperatura ambientale. Indica il valore della temperatura nell'aria circostante gli impianti fotovoltaici oggetto dell'approfondimento; come l'umidità, è nota grazie a rilevazioni effettuate nei giorni dei sorvoli di interesse.
2. Trasmissività dell'aria. Denota la tendenza del mezzo posto fra IRT e pannello a farsi attraversare dall'energia solare; FLIR Research Studio gli assegna un valore calcolato in automatico sulla base degli altri parametri. Tuttavia, come dettagliato in seguito, il sorvolo con aereo e sensore MW ha richiesto $\tau = 1$.

Si osserva che i dati meteorologici raccolti contemplano anche la misura dell'irraggiamento solare su un piano a 30°; pur non impattando in modo diretto sulla lettura delle temperature, serve come verifica che il valore ecceda i 600 W/m^2 minimi prescritti e per il calcolo del ΔT standardizzato [1.1], [2.2.3].

Sia per le analisi termiche da drone che per quelle da aereo, per ogni guasto deve essere individuata la temperatura operativa; nella trattazione è stata valutata come la media aritmetica dei pixel racchiusi da una figura geometrica, solitamente un rettangolo: questo è stato posizionato su una porzione sana del pannello nel caso di *hotspot* singoli e multipli e diodi, oppure sovrapposto a un pannello correttamente funzionante, adiacente a quelli difettosi, relativamente a estese e stringhe.

Per quanto riguarda la determinazione della temperatura massima il procedimento è analogo, ma coinvolge, ovviamente, le porzioni surriscaldate o i pannelli non operativi. Fa eccezione il caso degli *hotspot*: si assume come T_{max} la temperatura effettivamente più alta fra tutte quelle racchiuse dalla sagoma circoscritta all'anomalia.

2.4 Case studies: impianti di Bene Vagienna e Farigliano (CN)

I dati oggetto di questa tesi sono stati raccolti in occasione del monitoraggio di due distinti impianti fotovoltaici, localizzati in provincia di Cuneo a circa 6 km di distanza l'uno dall'altro. Si osserva che, dal punto di vista costruttivo, sono identici: le celle sono quadrate e misurano 15×15 cm^2, mentre i pannelli sono realizzati in silicio policristallino e misurano 1.5×0.7 m^2. Ciascuno è costituito da 3 sottostringhe, ciascuna con il proprio diodo di *bypass*. Inoltre, ogni stringa è articolata in 3 file di 7 pannelli ciascuna.
Le altre informazioni salienti dei due impianti e del contesto ambientale dei sorvoli sono riportate in Tabella 2 e in Tabella 3; la Figura 16 e la Figura 17 mostrano affiancati un ortomosaico di sorvolo LW con drone e l'immagine satellitare degli impianti [24]–[28].

IMPIANTO BVG01		
Località: Bene Vagienna (CN)	Coordinate GPS: 44°30'21.4"N 7°50'48.3"E	
Potenza nominale: ~1 MW	Numero di pannelli nell'impianto: 4347	
ISPEZIONE 1		
Data: 05/04/2022	Sensori utilizzati: LW per entrambe le piattaforme	Condizioni del cielo: sereno
Emissività impostata: 0.85	Temperatura riflessa: -30.0°C	
	Drone	Aereo
Durata di volo	13:07 – 13:24	13:11 - 13:25
Altezza di volo	53 m	304 m
Temperatura ambientale	8.0°C	8.0°C
Umidità ambientale	44%	44%
Irraggiamento	1067.2 W/m^2	1069.2 W/m^2
Vento	6.4 km/h	6.4 km/h
ISPEZIONE 2		
Data: 13/05/2022	Sensori utilizzati: LW per il drone, MW per l'aereo	Condizioni del cielo: sereno
Emissività impostata: 0.85	Temperatura riflessa: -30.0°C	
	Drone	Aereo
Durata di volo	14:37 - 14:53	14:09 - 14:15
Altezza di volo	53 m	307 m
Temperatura ambientale	22.0°C	21.8°C
Umidità ambientale	63%	63%
Irraggiamento	983.3 W/m^2	1033.8 W/m^2
Vento	8.1 km/h	8.1 km/h

Tabella 2 Riepilogo dell'impianto BVG01 e dei relativi sorvoli.

Figura 16 Ortomosaico e immagine satellitare di BVG01.

IMPIANTO FRL01		
Località: Farigliano (CN)	Coordinate GPS: 44°31'39.7"N 7°55'01.7"E	
Potenza nominale: 997 kW	Numero di pannelli nell'impianto: 4158	
ISPEZIONE 3		
Data: 05/04/2022	Sensori utilizzati: LW per entrambe le piattaforme	Condizioni del cielo: sereno
Emissività impostata: 0.85	Temperatura riflessa: -30.0°C	
	Drone	Aereo
Durata di volo	13:58 - 14:13	14:03 - 14:16
Altezza di volo	53 m	301 m
Temperatura ambientale	9.2°C	9.2°C
Umidità ambientale	40.5%	40.5%
Irraggiamento	1063.9 W/m^2	1061.6 W/m^2
Vento	8.1 km/h	8.1 km/h
ISPEZIONE 4		
Data: 13/05/2022	Sensori utilizzati: LW per il drone, MW per l'aereo	Condizioni del cielo: sereno
Emissività impostata: 0.85	Temperatura riflessa: -30.0°C	
	Drone	Aereo
Durata di volo	13:45 - 14:02	13:57 - 14:06
Altezza di volo	53 m	299 m
Temperatura ambientale	21.0°C	21.2°C

Umidità ambientale	64.2%	63.0%
Irraggiamento	1034.9 W/m^2	1032.6 W/m^2
Vento	8.1 km/h	8.1 km/h

Tabella 3 Riepilogo dell'impianto FRL01 e dei relativi sorvoli.

Figura 17 Ortomosaico e immagine satellitare di FRL01.

3 CAPITOLO 3

In questo capitolo vengono illustrati i risultati dell'analisi termografica condotta per raggiungere gli obbiettivi della tesi: il confronto fra la performance del drone e dell'aereo, la valutazione delle prestazioni di un sensore MW e il raffronto multitemporale fra le rilevazioni del drone.

Prima di effettuare le misure occorrenti, è necessaria una opportuna catalogazione dei guasti. Oltre che in base al tipo, con riferimento all'aspetto esteriore [2.2.2], le anomalie termiche possono essere suddivise in quattro ulteriori categorie, sulla base dell'entità del ΔT. La classificazione prevede:

- $0 < \Delta T < 2K$. Anomalia trascurabile, dato che l'impatto di scarti termici così contenuti è irrilevante; peraltro queste letture potrebbero essere causate dall'incertezza sperimentale.
- $2K < \Delta T < 7K$. Anomalia lieve, di severità contenuta.
- $7K < \Delta T < 10K$. Anomalia intermedia, di gravità normale.
- $\Delta T > 10K$. Anomalia severa, di seria entità.

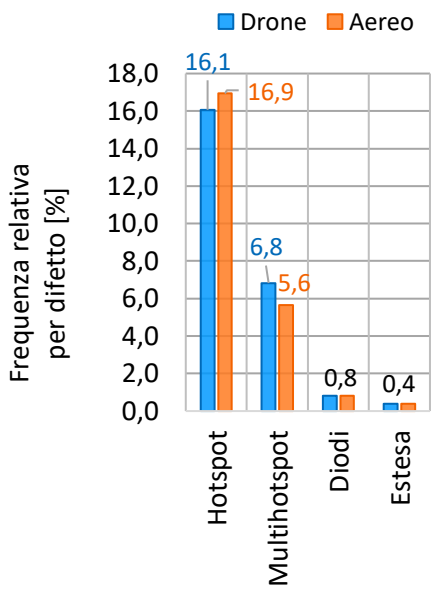
Inoltre, per tener traccia della posizione del guasto e in accordo a quanto riportato in [2.3], ogni pannello è distinto da due numeri: uno identificativo della stringa di appartenenza, uno della posizione del pannello nella stessa.

I seguenti paragrafi, per mezzo di tabelle e grafici, illustrano i risultati dei quattro sorvoli compiuti, approfondendo le tematiche alla base del progetto: il confronto fra piattaforme aeree e fra sensori IR funzionanti in diversi intervalli di lunghezza d'onda.

3.1 Analisi dell'impianto BVG01

3.1.1 Ispezione 1

CONTEGGIO ANOMALIE		
Anomalia	Drone	Aereo
	Hotspot	
H. trascurabili	11	10
H. lievi	25	27
H. intermedi	1	5
H. severi	3	0
Totale	40	42
	Multihotspot	
M. trascurabili	2	0
M. lievi	8	7
M. intermedi	2	1
M. severi	5	6
Totale	17	14
Diodo	2	2



Estesa	1	1	Le stringhe concorrono per la restante percentuale: 75.9% per il drone, 76.3% per l'aereo
Stringa	189 (9 stringhe)	189 (9 stringhe)	
Totale pannelli con anomalie	$\frac{249}{4347} = \mathbf{5.73\%}$	$\frac{248}{4347} = \mathbf{5.71\%}$	

ANOMALIE RILEVATE ESCLUSIVAMENTE DAL DRONE O DALL'AEREO				
Hotspot				
Tipologia di *hotspot*	Drone		Aereo	
Hotspot trascurabili	2		1	
	Stringa	Modulo	Stringa	Modulo
	49	9	31	5
	55	10		
Hotspot lievi	3		3	
	Stringa	Modulo	Stringa	Modulo
	98	3	54	3
	107	8	177	6
	177	4	206	16
Totale	**5**		**4**	
Multihotspot				
Tipologia di *multihotspot*	Drone		Aereo	
Multihotspot trascurabili	1		0	
	Stringa	Modulo		
	1	7		
Multihotspot lievi	0		1	
			Stringa	Modulo
			206	12
Totale	**1**		**1**	

ANOMALIE RILEVATE COME DI NATURA DIVERSA: 3			
Stringa	Modulo	Drone	Aereo
26	4	*Multihotspot trascurabile*	*Hotspot lieve*
120	3	*Multihotspot lieve*	*Hotspot lieve*
201	7	*Multihotspot lieve*	*Hotspot intermedio*
PRESTAZIONE DELL'AEREO RISPETTO AL DRONE			
Anomalie identiche per tipologia e posizione: 240 su 249 (96.4%)			

Tabella 4 Sorvolo 1: riepilogo e confronto.

Dalla Tabella 4 emerge la sostanziale identità fra le rilevazioni del drone, assunte come riferimento, e quelle dell'aereo. Le due piattaforme individuano in modo univoco diodi, estese e stringhe; alcune differenze possono invece essere riscontrate in merito a hotspot e multihotspot. Tuttavia, è scorretto indicare queste categorie come le più problematiche: lo scostamento fra le performance dei due velivoli deve infatti essere ricondotto alla elevata numerosità di queste anomalie. In ogni caso, determinati guasti sono categorizzati diversamente, mentre altri vengono rilevati solo da una delle due piattaforme.

Quest'ultima evenienza non è particolarmente preoccupante, perché si tratta di casi scarsamente numerosi che perlopiù ricadono nella categoria "lieve".

I seguenti grafici sono divisi per tipo di anomalia e, per ognuna di esse, mostrano due distinte colonne: una azzurra, che rappresenta il ΔT proposto dal drone, e una arancione, associata invece alla differenza di temperatura rilevata dall'aereo. Inoltre, i valori di scarto termico sono raccolti in tabelle riassuntive o figurano in apposite etichette poste nei grafici.

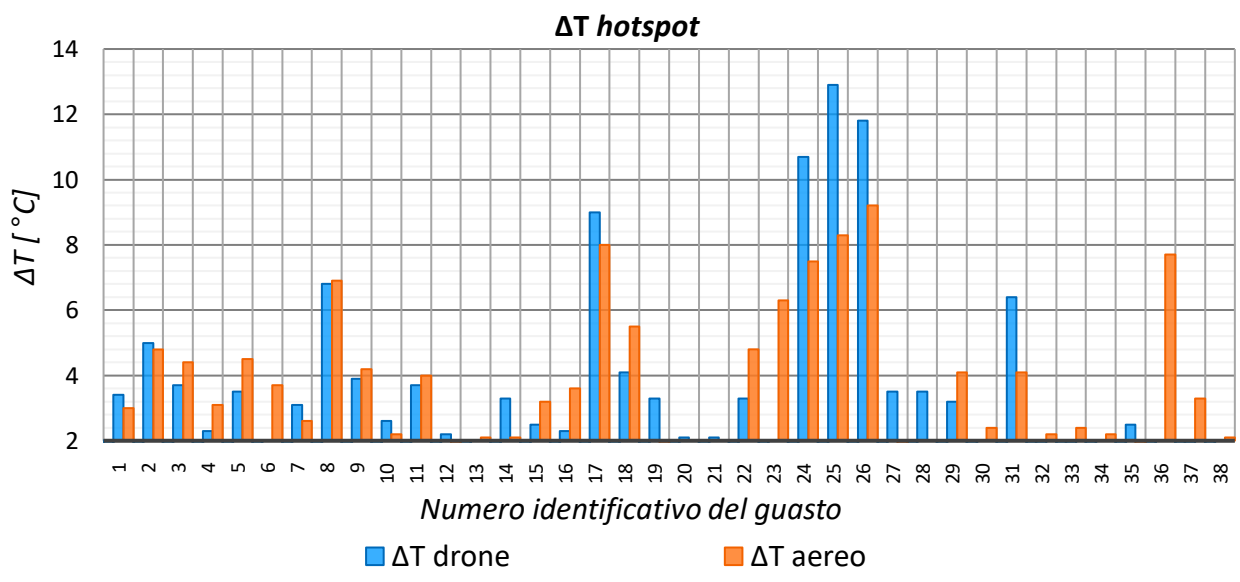


Grafico 1 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di *hotspot*;

segue tabella riassuntiva delle misurazioni.

Numero identificativo del guasto	Stringa;modulo in cui il guasto si trova	ΔT drone [°C]	ΔT aereo [°C]
1	14;21	3.4	3
2	14;7	5	4.8
3	15;7	3.7	4.4
4	17;15	2.3	3.1
5	22;1	3.5	4.5
6	26;4		3.7
7	27;7	3.1	2.6
8	36;17	6.8	6.9
9	43;9	3.9	4.2
10	43;11	2.6	2.2
11	46;4	3.7	4
12	49;13	2.2	
13	54;3		2.1
14	68;2	3.3	2.1
15	70;11	2.5	3.2
16	75;9	2.3	3.6
17	75;17	9	8
18	82;12	4.1	5.5
19	88;10	3.3	
20	98;3	2.1	
21	107;8	2.1	
22	112;9	3.3	4.8
23	120;3		6.3
24	120;4	10.7	7.5
25	153;4	12.9	8.3
26	166;16	11.8	9.2
27	169;2	3.5	
28	177;4	3.5	
29	177;5	3.2	4.1
30	177;6		2.4
31	181;18	6.4	4.1
32	196;12		2.2
33	197;10		2.4
34	197;15	2	2.2
35	200;4	2.5	
36	201;7		7.7
37	202;1		3.3
38	206;16		2.1
Media ΔT drone		5.0 °C	
Media ΔT aereo		5.3 °C	

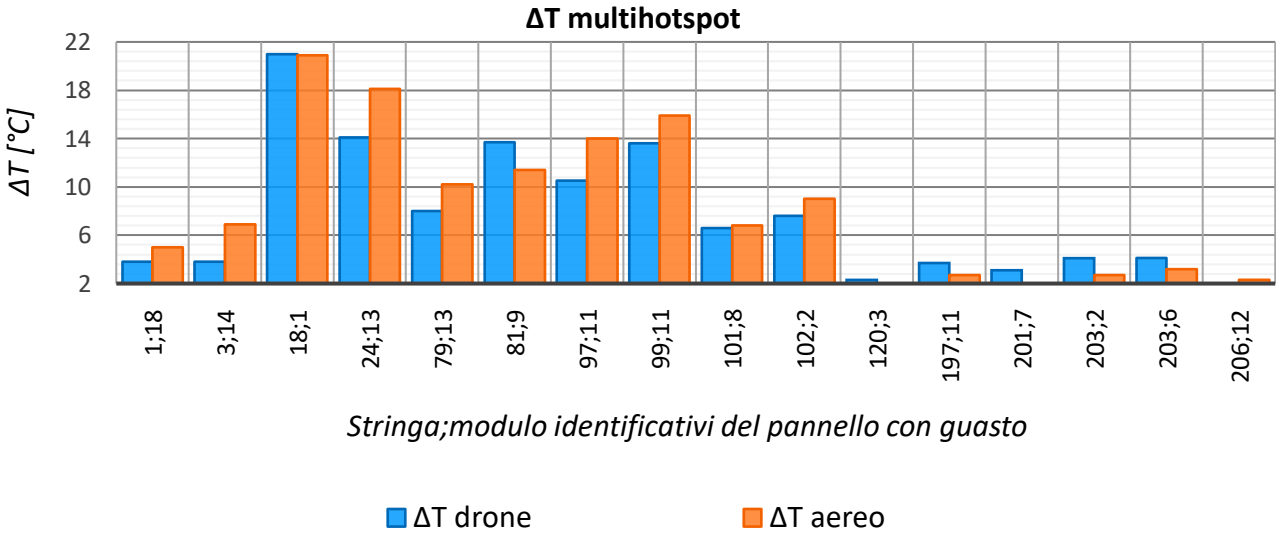


Grafico 2 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di *multihotspot*;

segue tabella riassuntiva delle misurazioni.

Stringa;modulo in cui il guasto si trova	ΔT drone [°C]	ΔT aereo [°C]
1;18	3.8	5
3;14	3.8	6.9
18;1	21	20.9
24;13	14.1	18.1
79;13	8	10.2
81;9	13.7	11.4
97;11	10.5	14
99;11	13.6	15.9
101;8	6.6	6.8
102;2	7.6	9
120;3	2.3	
197;11	3.7	2.7
201;7	3.1	
203;2	4.1	2.7
203;6	4.1	3.2
206;12		2.3
Media ΔT drone	8.2 °C	
Media ΔT aereo	9.2 °C	

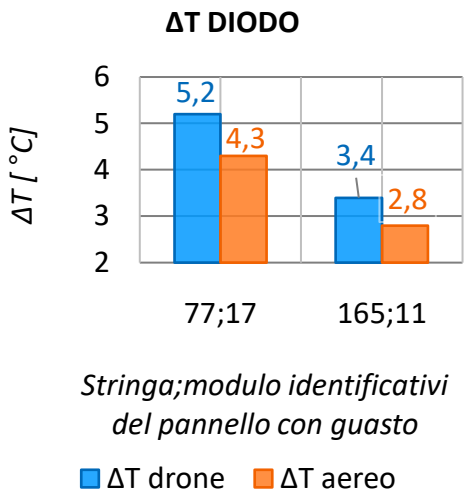


Grafico 3 ΔT misurati da drone e aereo in corrispondenza di diodi.

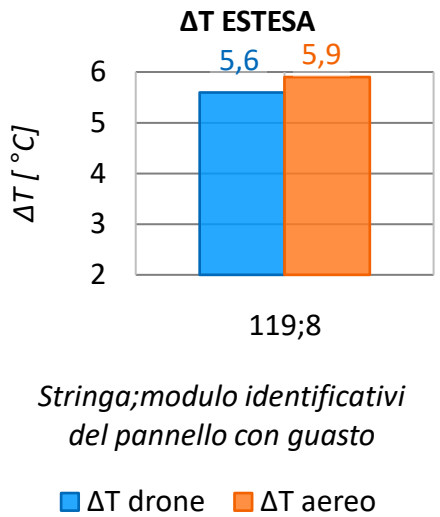


Grafico 4 ΔT misurati da drone e aereo in corrispondenza di estese.

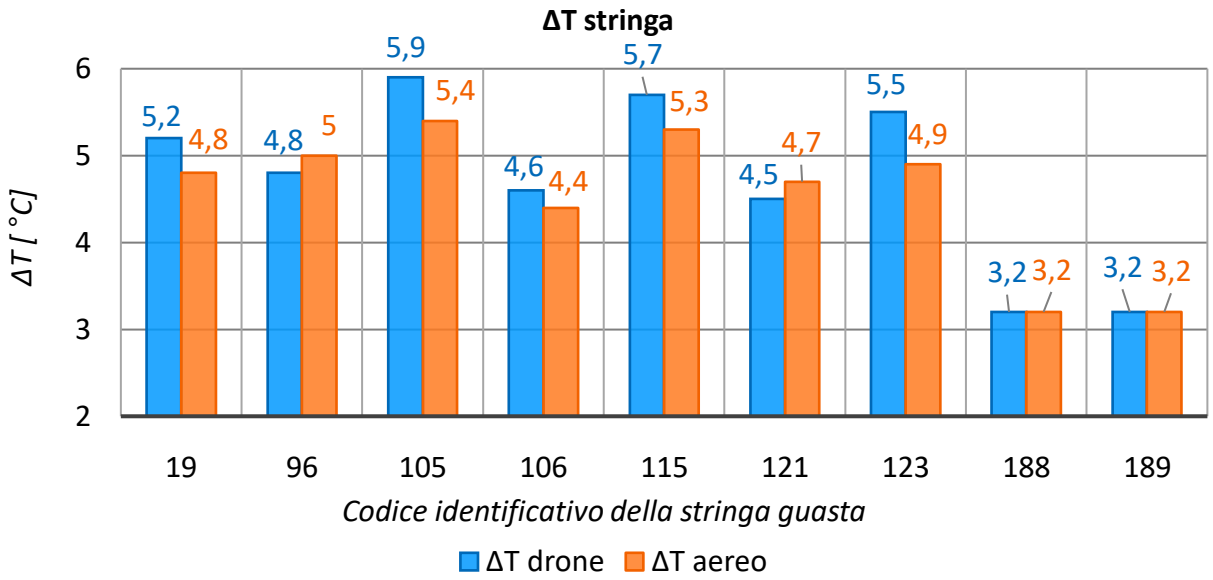


Grafico 5 ΔT misurati da drone e aereo in corrispondenza di stringhe.

Le medie aritmetiche dei ΔT assumono i valori riportati nella seguente tabella.

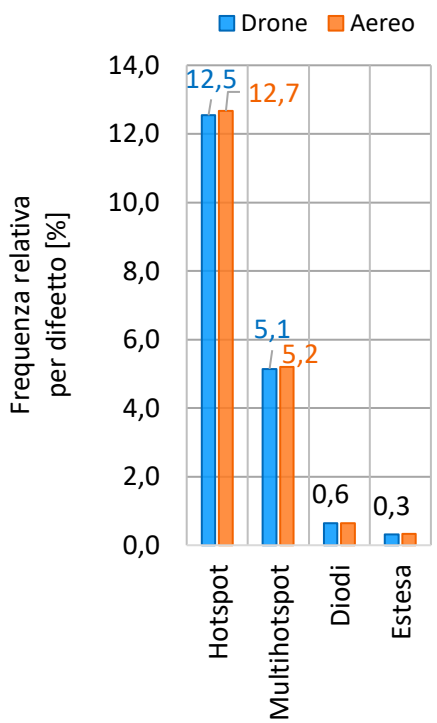
Anomalia	Media ΔT drone [°C]	Media ΔT aereo [°C]
Diodo	3.0	3.6
Stringa	4.7	4.5

Dai grafici emerge la concreta aderenza delle rilevazioni dell'aereo a quelle del drone. Seppur le letture di ΔT non siano perfettamente identiche, in linea di massima esprimono in modo analogo la gravità del guasto in questione.

Le eccezioni più evidenti a questo andamento generale riguardano gli *hotspot* più gravi. Questa tendenza potrebbe essere ricondotta al comportamento intrinseco del software *DJI Thermal Analysis Tool 3*. Infatti, a partire dai fotogrammi reali visibili e termici, compie l'operazione di *sharpening*: prende le immagini RGB (con la propria risoluzione) e le integra con l'informazione di temperatura del fotogramma termico; per passare alla risoluzione di quest'ultimo, effettua un'operazione di interpolazione.
Di conseguenza, le anomalie termiche puntiformi potrebbero risultare enfatizzate e il dato sintetizzato di temperatura apparire parzialmente incrementato rispetto al vero.
Per questo motivo, con particolare attenzione nei confronti degli *hotspot* 24, 25 e 26, si è provato a effettuare letture direttamente dall'immagine termica, previo *sharpening* e interpolazione. Purtroppo però, la discrepanza fra ΔT di drone e aereo non si è assottigliata.
Come ulteriore tentativo, si è provato a impiegare la versione precedente del software DJI, ma senza i risultati sperati.
Al contrario degli *hotspot*, la natura diffusa delle altre quattro categorie di difetto consente di aggirare questo problema, mediando l'informazione su un'area più elevata e quindi su un maggiore numero di pixel. Negli altri casi, dunque, emerge una ancor più spiccata identità fra le rilevazioni dei due velivoli.

3.1.2 Ispezione 2

CONTEGGIO ANOMALIE		
Anomalia	Drone	Aereo
	Hotspot	
H. trascurabili	12	10
H. lievi	19	23
H. intermedi	5	2
H. severi	3	4
Totale	39	39
	Multihotspot	
M. trascurabili	2	0
M. lievi	9	9
M. intermedi	2	2
M. severi	5	5
Totale	16	16
Diodo	2	2
Estesa	1	1
Stringa	252 (12 stringhe)	252 (12 stringhe)
Totale pannelli con anomalie	$\frac{310}{4347} = \mathbf{7.13\%}$	$\frac{310}{4347} = \mathbf{7.13\%}$



Le stringhe concorrono per la restante percentuale: 81.1% per il drone, 81.9% per l'aereo

ANOMALIE RILEVATE ESCLUSIVAMENTE DAL DRONE O DALL'AEREO				
Multihotspot				
Tipologia di *multihotspot*		Drone	Aereo	
Multihotspot lievi		0	1	
			Stringa	Modulo
			203	2
Totale		**0**	**1**	
ANOMALIE RILEVATE COME DI NATURA DIVERSA: 1				
Stringa	Modulo	Drone	Aereo	
132	18	*Multihotspot* standard	*Hotspot* severo	
PRESTAZIONE DELL'AEREO RISPETTO AL DRONE				
Anomalie identiche per tipologia e posizione: 307 su 311 (98.7%)				

Tabella 5 Sorvolo 2: riepilogo e confronto.

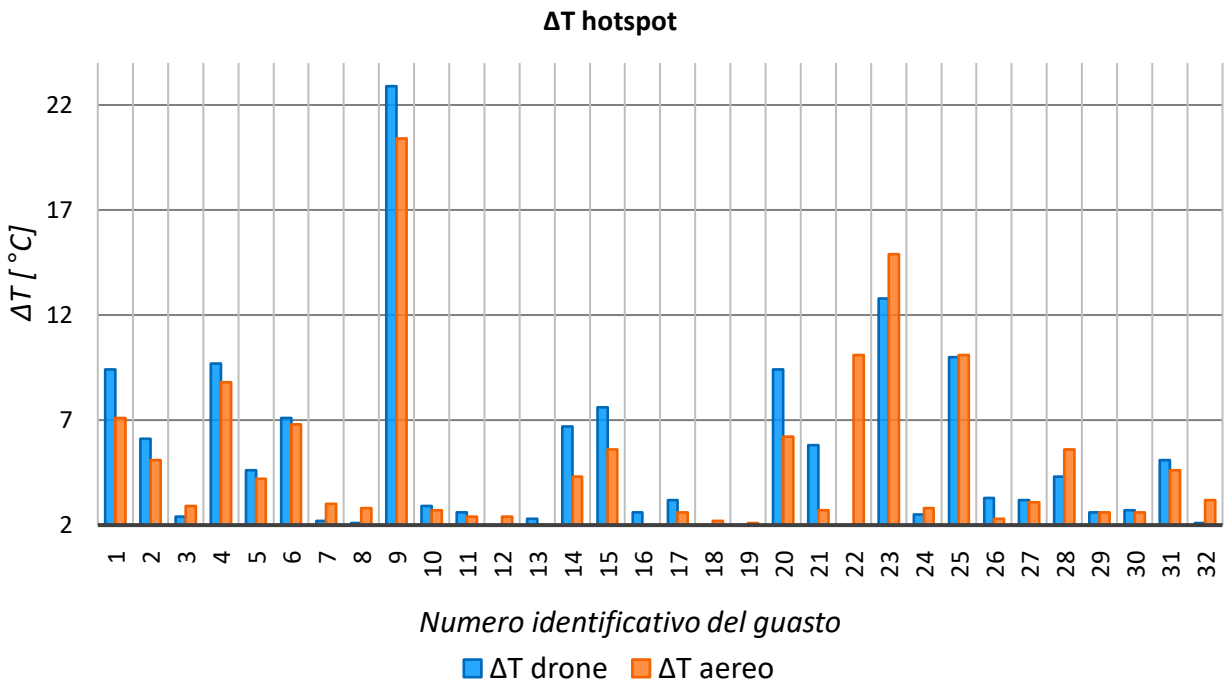


Grafico 6 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di *hotspot*;

segue tabella riassuntiva delle misurazioni.

Numero identificativo del guasto	Stringa;modulo in cui il guasto si trova	ΔT drone [°C]	ΔT aereo [°C]
1	1;7	9.4	7.1
2	14;7	6.1	5.1
3	14;21	2.4	2.9
4	15;7	9.7	8.8
5	17;15	4.6	4.2
6	22;1	7.1	6.8
7	27;7	2.2	3
8	30;6	2.1	2.8
9	31;5	22.9	20.4
10	43;9	2.9	2.7
11	43;11	2.6	2.4
12	46;4		2.4
13	47;3	2.3	1.8
14	70;11	6.7	4.3

15	82;12	7.6	5.6
16	84;1	2.6	
17	88;10	3.2	2.6
18	98;3		2.2
19	107;8		2.1
20	120;3	9.4	6.2
21	120;4	5.8	2.7
22	132;18		10.1
23	153;4	12.8	14.9
24	153;18	2.5	2.8

25	166;16	10	10.1
26	169;2	3.3	2.3
27	177;5	3.2	3.1
28	181;18	4.3	5.6
29	196;12	2.6	2.6
30	197;10	2.7	2.6
31	197;13	5.1	4.6
32	197;15	2.1	3.2
Media ΔT drone		6.1 °C	
Media ΔT aereo		5.7 °C	

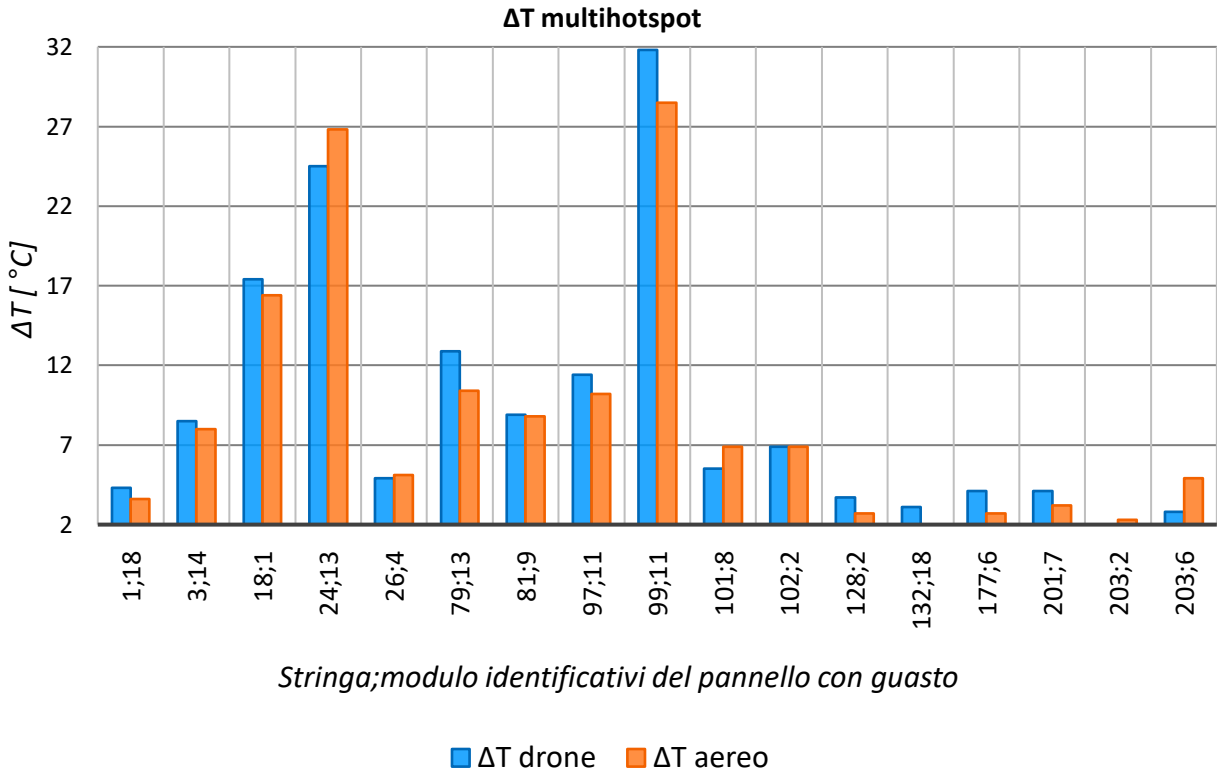


Grafico 7 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di *multihotspot*;

segue tabella riassuntiva delle misurazioni.

Stringa;modulo in cui il guasto si trova	ΔT drone [°C]	ΔT aereo [°C]
1;18	4.3	3.6
3;14	8.5	8
18;1	17.4	16.4
24;13	24.5	26.8
26;4	4.9	5.1
79;13	12.9	10.4
81;9	8.9	8.8
97;11	11.4	10.2
99;11	31.8	28.5
101;8	5.5	6.9

102;2	6.9	6.9
128;2	3.7	2.7
132;18	3.1	
177;6	4.1	2.7
201;7	4.1	3.2
203;2		2.3
203;6	2.8	4.9
Media ΔT drone	9.7 °C	
Media ΔT aereo	9.2 °C	

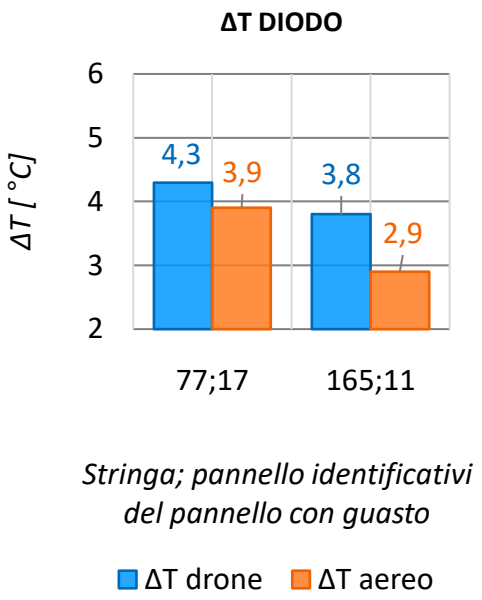


Grafico 8 ΔT misurati da drone e aereo in corrispondenza di diodi.

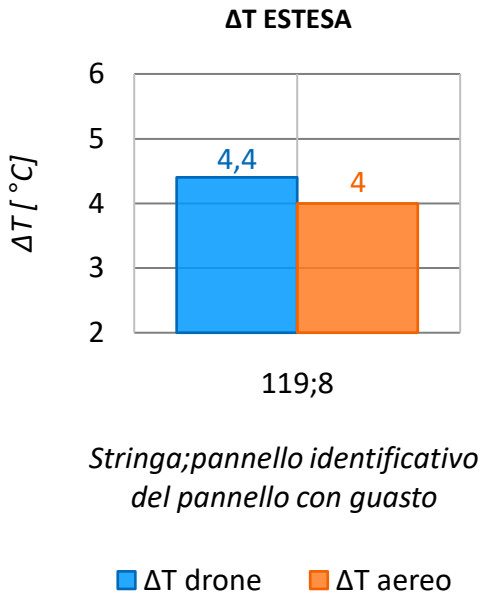


Grafico 9 ΔT misurati da drone e aereo in corrispondenza di estese.

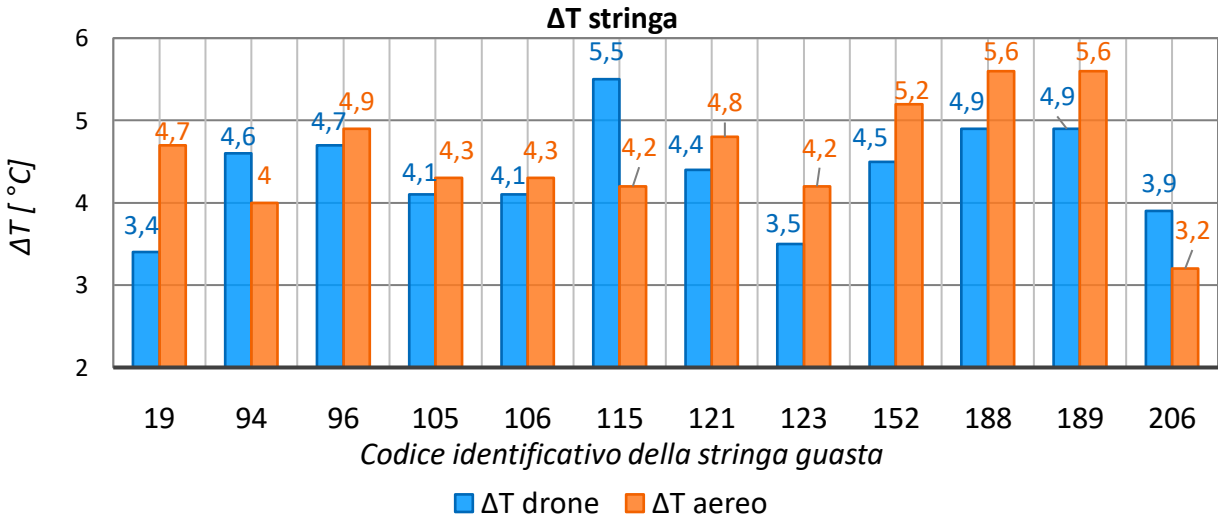


Grafico 10 ΔT misurati da drone e aereo in corrispondenza di stringhe.

Le medie aritmetiche dei ΔT assumono i valori riportati nella seguente tabella.

Anomalia	Media ΔT drone [°C]	Media ΔT aereo [°C]
Diodo	4.1	3.4
Stringa	4.4	4.6

I grafici relativi al secondo sorvolo mostrano un buon comportamento del sensore MW, installato su aereo, rispetto al LW, montato su drone. A questo risultato si è giunti dopo una lunga serie di tentativi, che hanno permesso di individuare la combinazione di parametri in grado di ridurre gli scostamenti fra i ΔT misurati dalle due termocamere.
Senza apportare modifiche alle impostazioni dell'IRT del drone, non si è rilevata particolarmente diversa la più vantaggiosa combinazione delle grandezze per il sensore MW. Mantenendo emissività pari a 0.85 e imponendo le condizioni ambientali effettive, è stato sufficiente imporre trasmissività dell'aria unitaria. Il calcolo automatico proposto dal software FLIR, infatti, accentuava le differenze fra i ΔT proposti dalle due termocamere.
Alla ricerca di un risultato ancora migliore, ma senza i risultati sperati, si è provato ad abbassare l'emissività: in corrispondenza del range di λ legato al sensore *medium-wave*, sarebbero infatti stati plausibili anche valori compresi fra 0.75 e 0.85. Peraltro non è servito variare la temperatura riflessa, né porla identica a quella ambientale.
Infine, non ha apportato benefici alterare l'altezza di volo.

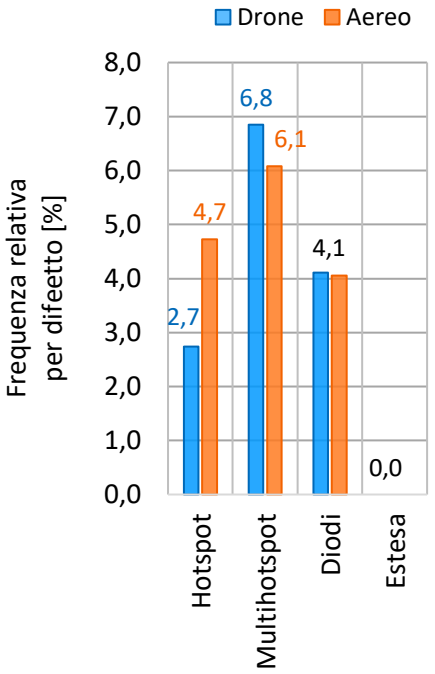
3.2 Analisi dell'impianto FRL01

I sorvoli che hanno coinvolto il secondo impianto non hanno messo in luce andamenti peculiari o in qualche modo differenti rispetto a quanto evidenziato in merito a BVG01. Infatti emerge anche dalle seguenti analisi che il comportamento dell'aereo ben riproduce quello del drone, sia con riferimento al sensore LW che al MW. In questo secondo caso, è bastato nuovamente regolare il valore della trasmissività: proprio come accaduto per il sorvolo 2, non sono emersi vantaggi, ma anzi peggioramenti, con la variazione delle altre grandezze significative.
L'unica nota distintiva fra i due impianti risiede nella diversa distribuzione e numerosità delle anomalie: se in BVG01 abbondavano *hotspot* e *multihotspot*, FRL01 presenta meno guasti puntiformi e un'abbondanza di diodi; cresce inoltre il peso relativo delle stringhe.

3.2.1 Ispezione 3

CONTEGGIO ANOMALIE

Anomalia	Drone	Aereo
	Hotspot	
H. trascurabili	0	1
H. lievi	2	5
H. intermedi	1	0
H. severi	1	1
Totale	4	7
	Multihotspot	
M. trascurabili	1	1
M. lievi	7	6
M. intermedi	1	1
M. severi	1	1
Totale	10	9
Diodo	6	6
Estesa	0	0
Stringa	126 (6 stringhe)	126 (6 stringhe)
Totale pannelli con anomalie	$\frac{146}{4158} = \mathbf{3.51\%}$	$\frac{148}{4158} = \mathbf{3.56\%}$



Le stringhe concorrono per la restante percentuale: 86.4% per il drone, 85.1% per l'aereo

ANOMALIE RILEVATE ESCLUSIVAMENTE DAL DRONE O DALL'AEREO

Hotspot

Tipologia di *hotspot*	Drone	Aereo	
Hotspot trascurabili	0	1	
		Stringa	Modulo
		121	9
Hotspot lievi	0	1	
		Stringa	Modulo
		46	4
Totale	**0**	**2**	

ANOMALIE RILEVATE COME DI NATURA DIVERSA: 1

Stringa	Modulo	Drone	Aereo
102	1	*Multihotspot* intermedio	*Hotspot intermedio*

PRESTAZIONE DELL'AEREO RISPETTO AL DRONE

Anomalie identiche per tipologia e posizione: 145 su 146 (99.3%)

Tabella 6 Sorvolo 3: riepilogo e confronto.

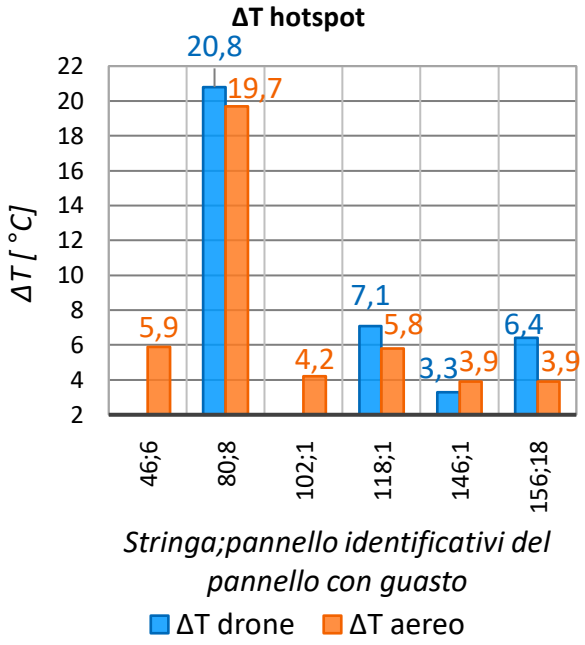


Grafico 11 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di *hotspot.*

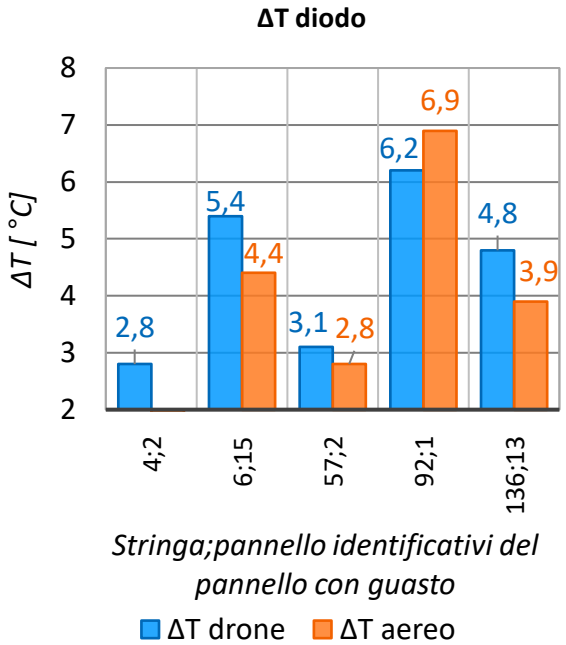


Grafico 12 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di diodi.

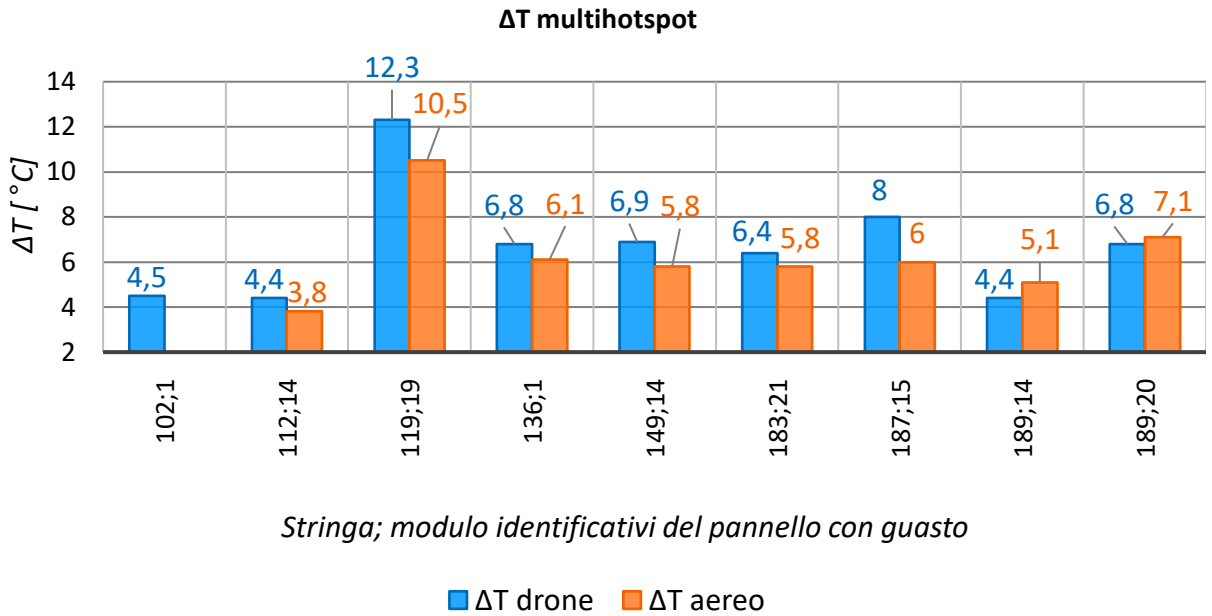


Grafico 13 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di *multihotspot*.

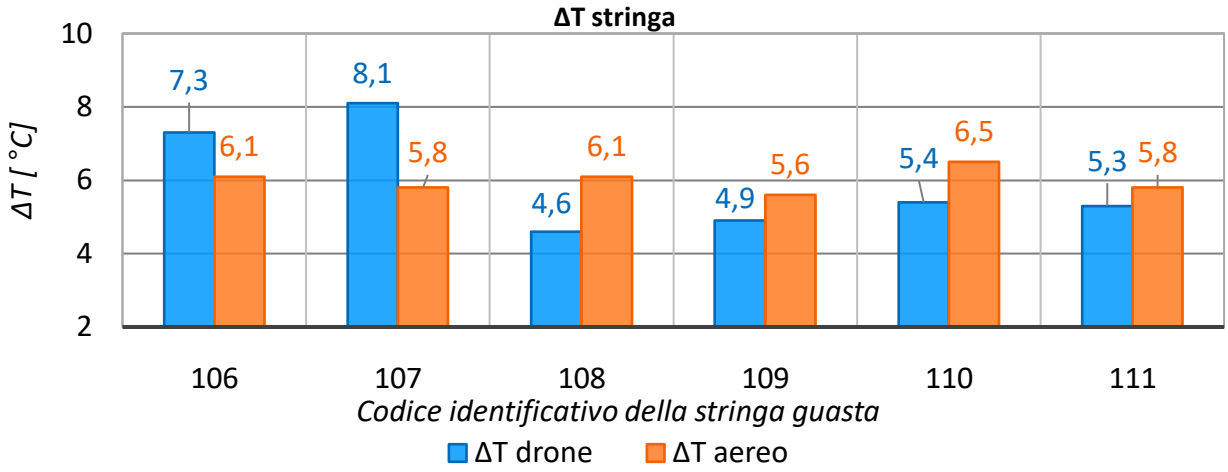


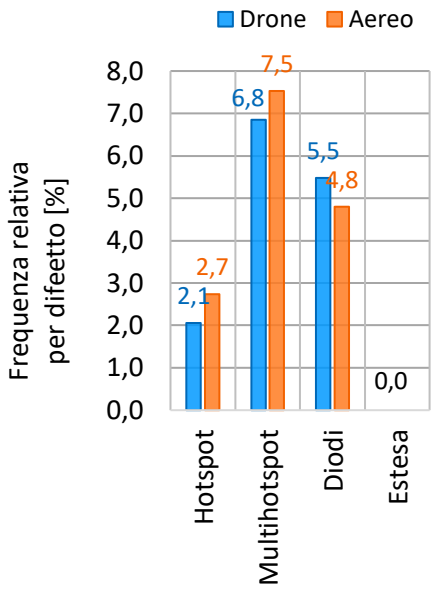
Grafico 14 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di stringe.

Le medie aritmetiche dei ΔT assumono i valori riportati nella seguente tabella.

Anomalia	Media ΔT drone [°C]	Media ΔT aereo [°C]
Hotspot	9.4	7.2
Multihotspot	6.7	5.6
Diodo	4.5	4.5
Stringa	5.9	6.0

3.2.2 Ispezione 4

CONTEGGIO ANOMALIE		
Anomalia	Drone	Aereo
	Hotspot	
H. trascurabili	0	0
H. lievi	1	1
H. intermedi	0	0
H. severi	2	3
Totale	3	4
	Multihotspot	
M. trascurabili	1	1
M. lievi	3	3
M. intermedi	1	2
M. severi	3	3
Totale	10	11
Diodo	8	7
Estesa	0	0
Stringa	126 (6 stringhe)	126 (6 stringhe)
Totale pannelli con anomalie	$\frac{147}{4158} = \mathbf{3.54\%}$	$\frac{144}{4158} = \mathbf{3.56\%}$



Le stringhe concorrono per la restante percentuale: 85.6% per il drone, 85.0% per l'aereo

ANOMALIE RILEVATE COME DI NATURA DIVERSA: 1			
Stringa	Modulo	Drone	Aereo
118	1	Diodo lieve	*Hotspot* severo
PRESTAZIONE DELL'AEREO RISPETTO AL DRONE			
Anomalie identiche per tipologia e posizione: 143 su 147 (97.3%)			

Grafico 15 Sorvolo 4: riepilogo e confronto

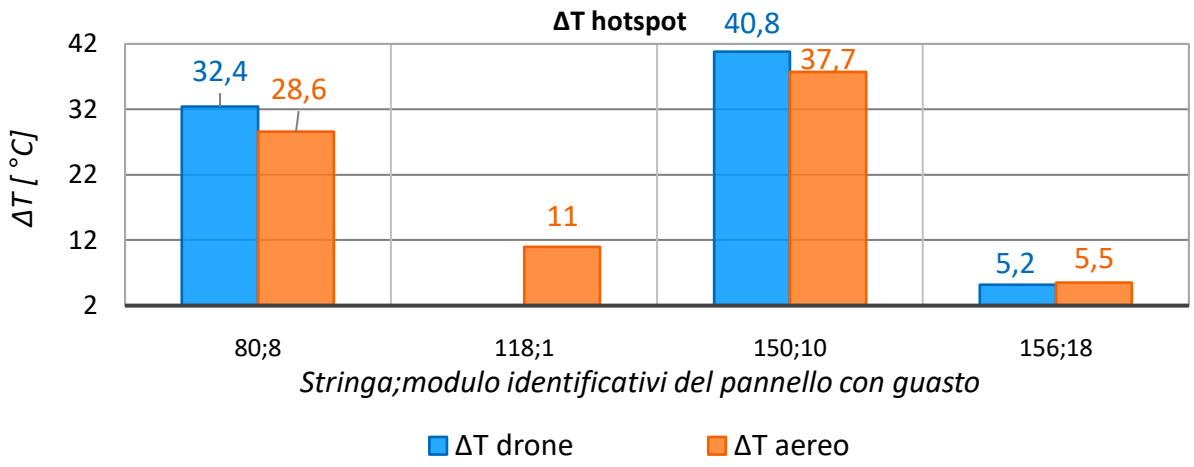


Grafico 16 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di *hotspot.*

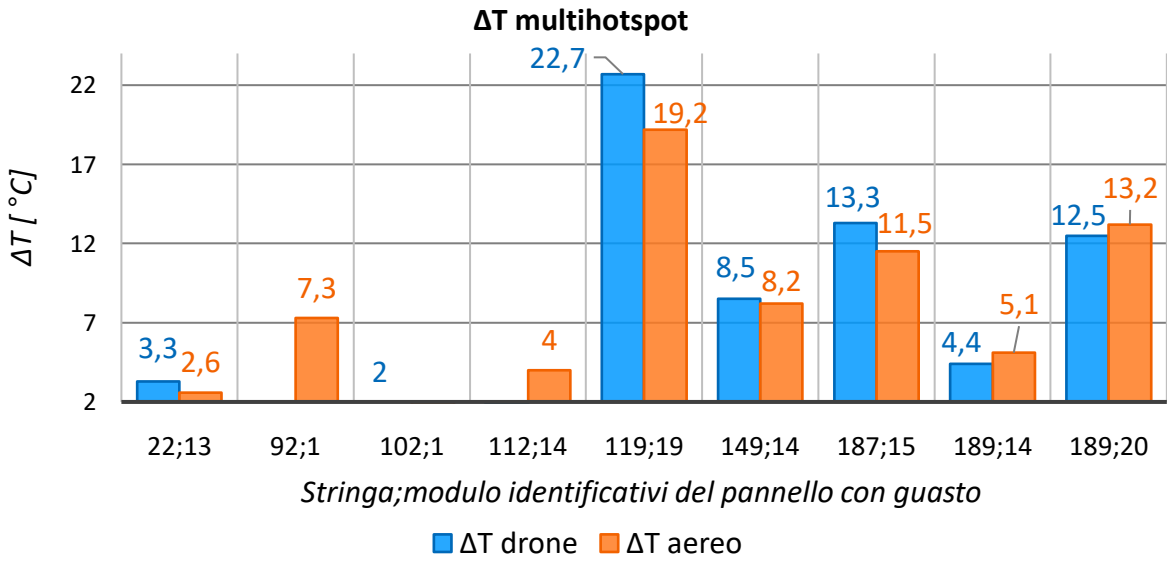


Grafico 17 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di *multihotspot.*

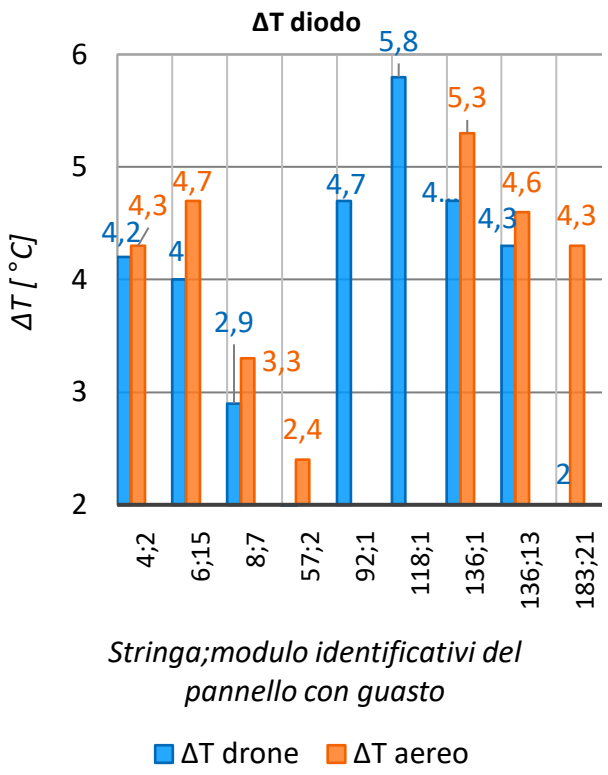


Grafico 18 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di diodi.

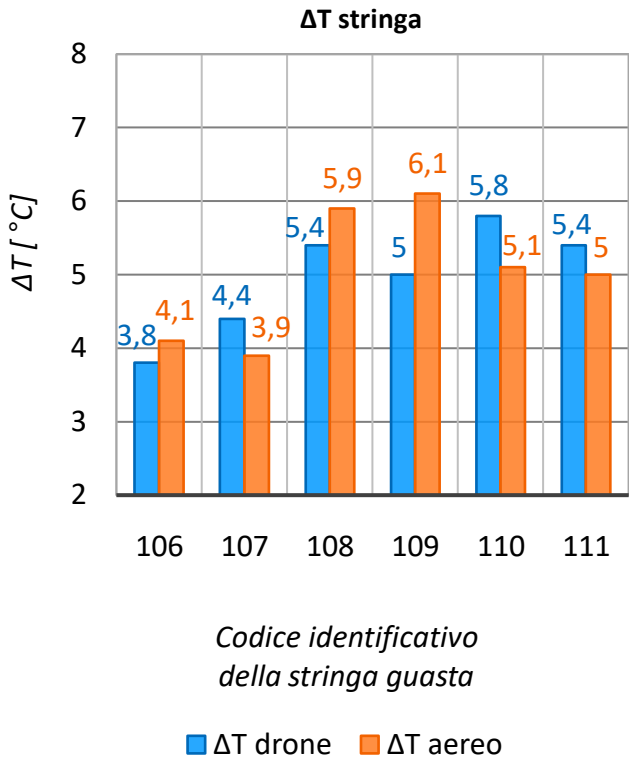


Grafico 19 ΔT rilevati da drone e aereo in corrispondenza di stringhe.

Le medie aritmetiche dei ΔT assumono i valori riportati nella seguente tabella.

Anomalia	Media ΔT drone [°C]	Media ΔT aereo [°C]
Hotspot	26.1	20.7
Multihotspot	9.5	8.9
Diodo	4.1	4.1
Stringa	5.0	5.0

3.3 Approfondimento anomalie

In questa sottosezione si analizzano nel dettaglio cinque distinte anomalie, una per tipo, fra tutte quelle messe in luce dalla termografia all'infrarosso.

Per ciascuna sono riportate tre diverse immagini: quella RGB e due termiche, di cui una legata al sorvolo con drone e una associata invece all'ispezione con aereo; si precisa inoltre che sono stati scelti fra i sorvoli condotti con sensori LW nello stesso giorno.

Entrambi i fotogrammi delle termocamere sono colorati, in modo che a parità di sfumatura corrisponda identità di temperatura; la scala termica di riferimento è affiancata.

I triangoli rossi raffigurati mostrano il punto più caldo racchiuso dalla figura geometrica disegnata; i rettangoli azzurri delimitano invece l'area sana, la cui media è stata assunta come temperatura operativa. Quest'ultima ha un margine di incertezza di circa 1K (a spanne)

tra valor medio e minimo (o massimo); di conseguenza, si rafforza l'ipotesi di poter trascurare le anomalie che propongono $\Delta T < 2$K.
In aggiunta, sono riportati riquadri contenenti i valori dei parametri più significativi e il valore normalizzato di ΔT [2.2.3]. Per il calcolo di quest'ultimo, in accordo alla normativa, si è deciso di adottare $x = 1$ [10]. Le anomalie considerate nella trattazione, infatti, coinvolgono almeno una cella o il vetro che la ricopre e, quindi, giustificano l'assunzione di un esponente unitario.
Con T_{max} si intende il punto più caldo dell'*hotspot* oppure la media dei punti caldi e puntiformi che compongono ciascun *multihotspot*; per quanto riguarda diodi, estese e stringhe, è invece associata alla media dei pixel racchiusi da una figura geometrica circoscritta all'anomalia.
T_{picco} rappresenta, al contrario, il più alto valore di temperatura mostrato dall'anomalia.
Per la scelta dei guasti da approfondire, è stata prediletta la chiarezza dell'immagine e la riconoscibilità del tipo di guasto.

3.3.1 *Hotspot*

È stato scelto quello in posizione 75;17, appartenente all'impianto di Bene Vagienna.
Le immagini termiche sono state scattate nell'ambito del sorvolo 1.
Esteriormente non appaiono danni, né sporcizia: questo rafforza l'uso di tecniche diagnostiche in grado di andare oltre la semplice ispezione visiva.

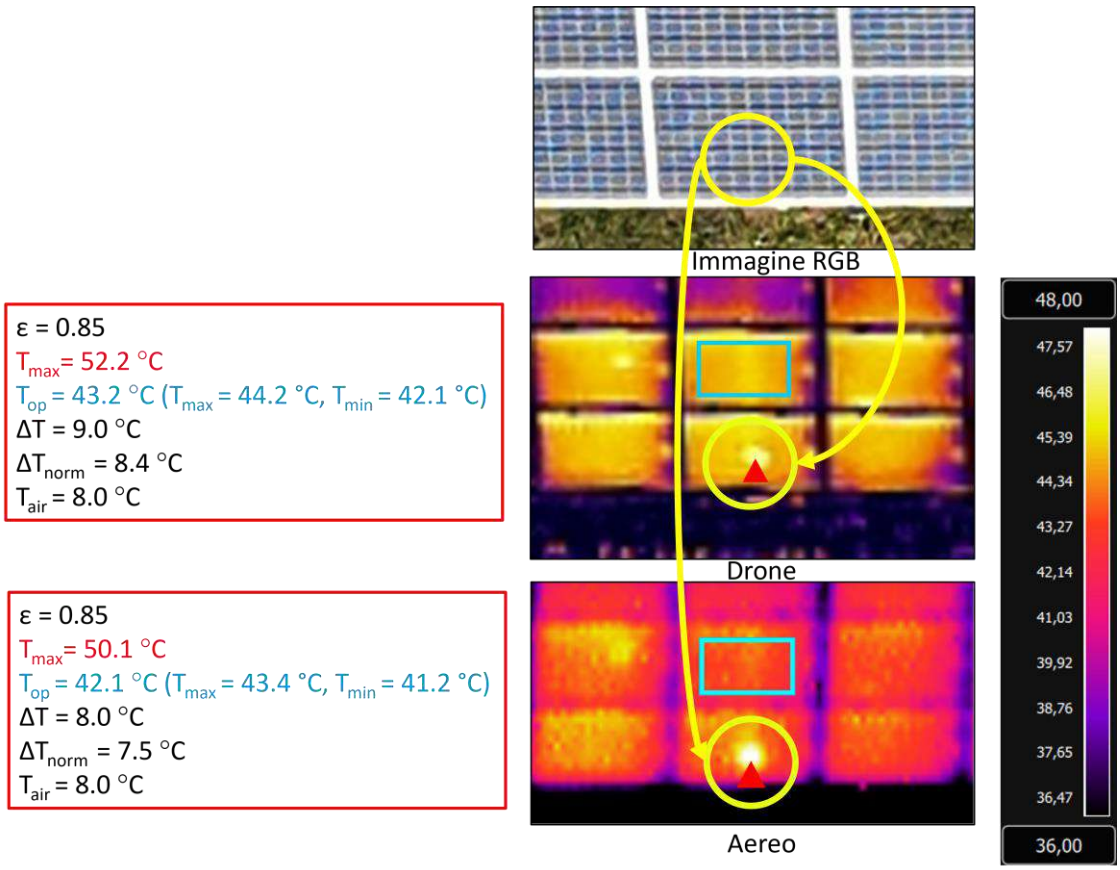


Figura 18 Approfondimento *hotspot*

3.3.2 *Multihotspot*

È stato scelto quello in posizione 102;2, appartenente all'impianto di Bene Vagienna.
Le immagini termiche sono state scattate nell'ambito del sorvolo 1.

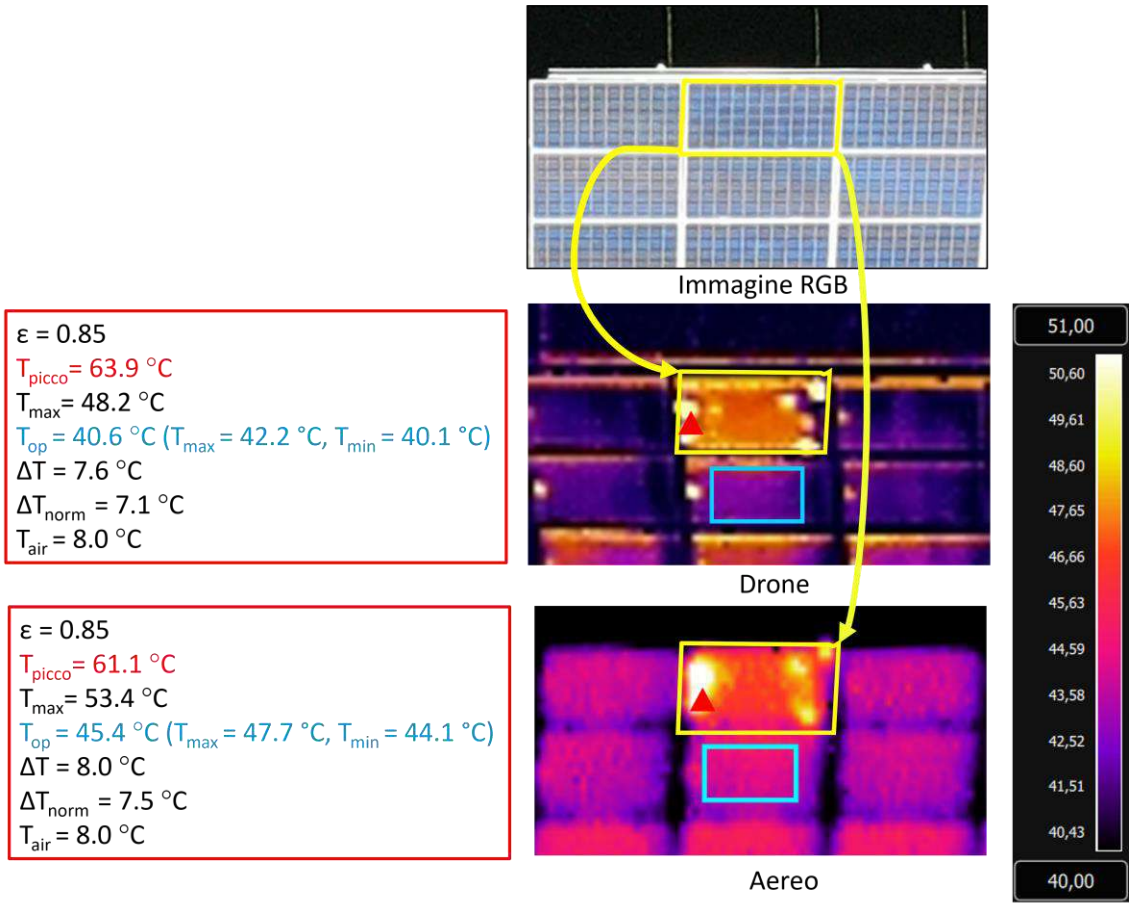


Figura 19 Approfondimento *multihotspot*

Il colore diverso del modulo rispetto agli adiacenti tradisce una probabile delaminazione o rottura del vetro.

3.3.3 Diodo

È stato scelto quello in posizione 6;15, appartenente all'impianto di Farigliano.
Le immagini termiche sono state scattate nell'ambito del sorvolo 3.
Come accade per l'*hotspot,* non si riscontrano problemi a livello visivo.

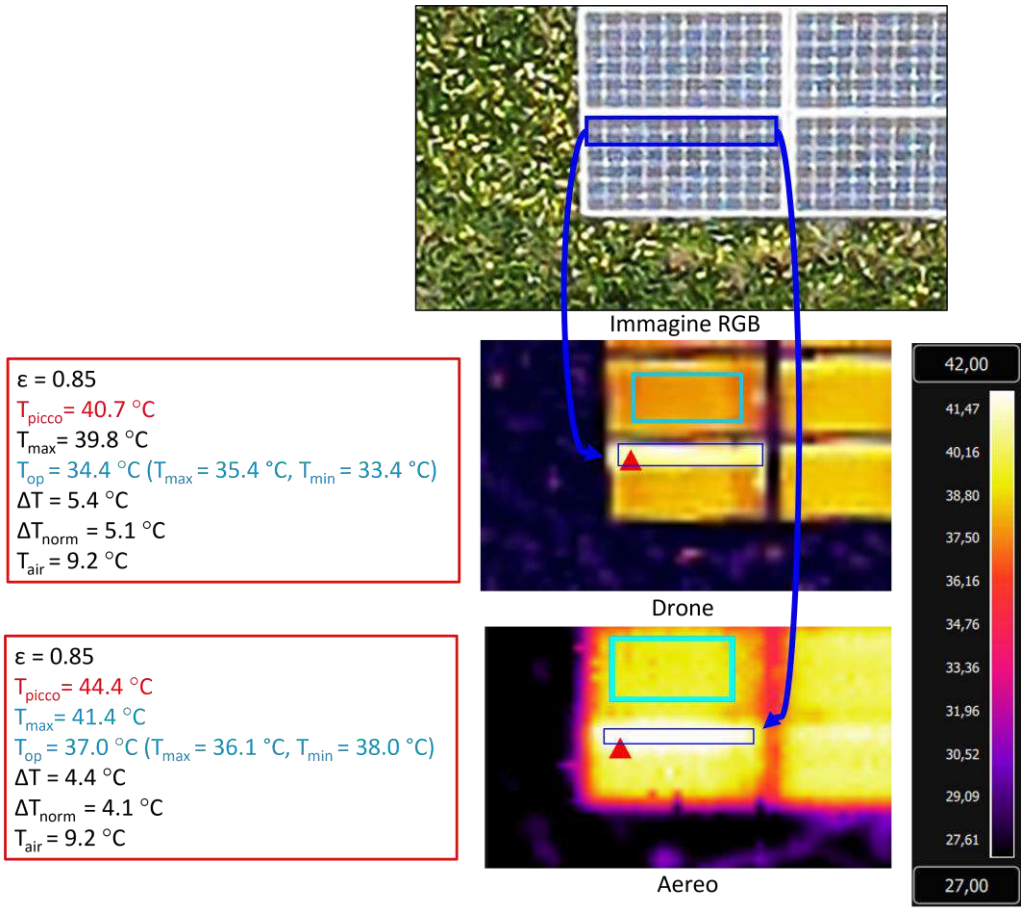


Figura 20 Approfondimento diodo.

3.3.4 Estesa

È stata scelta quella in posizione 119;8, appartenente a BVG01, che è anche l'unica individuata durante tutte le ispezioni.
Le immagini termiche sono state scattate nell'ambito del sorvolo 1.
Il pannello coinvolto è apparentemente sano, anche se l'aIRT dà chiara evidenza del guasto elettrico.

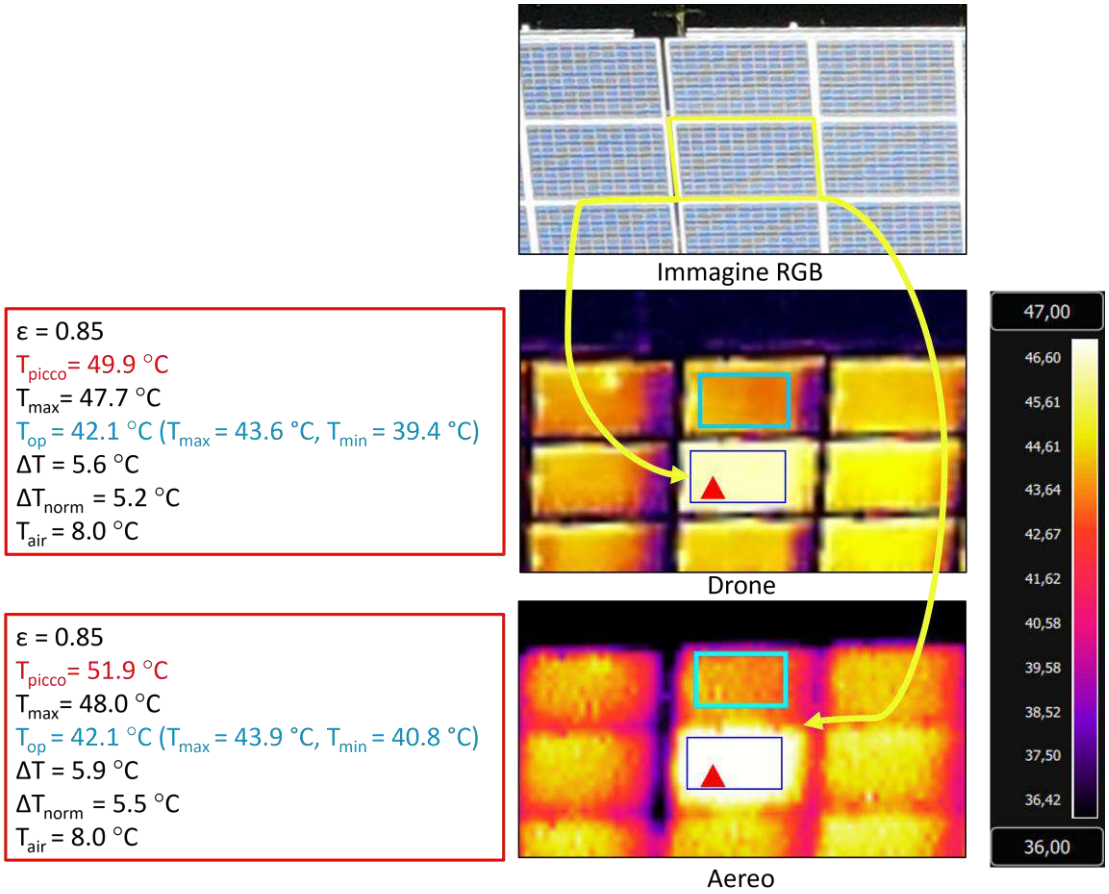


Figura 21 Approfondimento estesa.

3.3.5 Stringa

È stata scelta la 96 dell'impianto di Bene Vagienna.
Le immagini termiche sono state scattate nell'ambito del sorvolo 1.

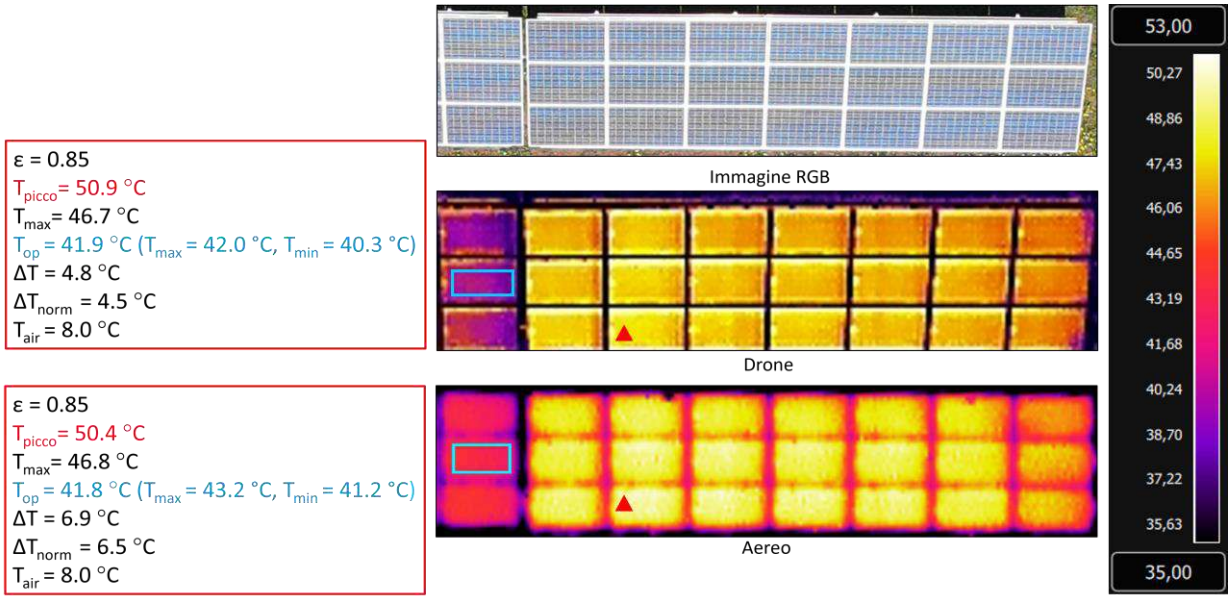


Figura 22 Approfondimento stringa.

3.4 Dati di sintesi

A questo punto si introduce un codice alfanumerico per la nomenclatura sintetica dei guasti, che tenga conto del tipo e, nel caso di *hotspot* e *multihotspot*, della gravità di ognuno. In tutti gli altri casi, infatti, le anomalie sono intermedie.

Lettera identificativa	Guasto corrispondente
A	Hotspot
B	Multihotspot
C	Diodo
D	Estesa
E	Stringa

Numero identificativo	Gravità
1	Lieve
2	Intermedia
3	Severa

Inoltre, gli impianti studiati vengono d'ora in poi etichettati come 1 (BVG01) e 2 (FRL01); invece, i sorvoli effettuati sono adesso distinti sulla base della piattaforma e del sensore impiegato, indipendentemente dall'impianto ispezionato.

Codice identificativo del sorvolo	Piattaforma e sensore (data del sorvolo)
S1	Drone LW (05/04/2022)
S2	Aereo LW (05/04/2022)
S3	Drone LW (13/05/2022)
S4	Aereo MW (13/05/2022)

3.4.1 Difetti riscontrati sul totale dei pannelli di ogni singolo impianto

Nel seguente istogramma sono riportate le percentuali di pannelli fotovoltaici con guasti, sulla base dei sorvoli e degli impianti; le anomalie trascurabili ($\Delta T < 2K$) sono state tralasciate.

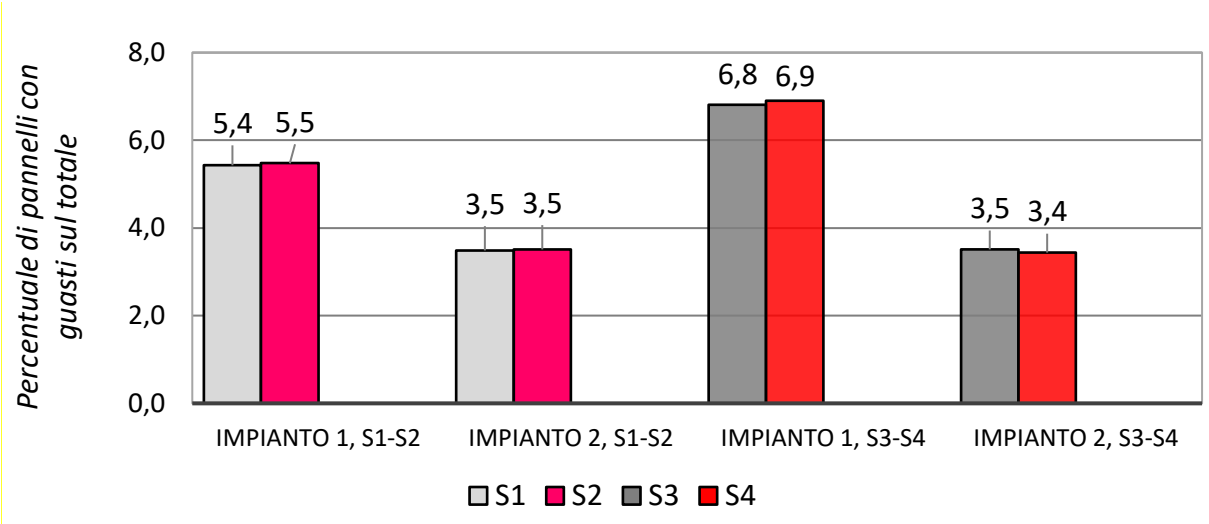


Grafico 20 Percentuale di pannelli con guasti.

3.4.2 Tabelle di riepilogo dei difetti in base alle varie tipologie

La Tabella 7 riporta, sempre ignorando le anomalie trascurabili, il numero dei pannelli difettosi e quello dei guasti rintracciati; i due coincidono per quanto riguarda i difetti A, C e D. Diversamente, per i guasti di tipo B ed E, si sono conteggiate rispettivamente le anomalie puntiformi che si ripetono sullo stesso pannello (dando vita al *multihotspot* propriamente definito) e le stringhe coinvolte.

		Numero di guasti individuati					Numero di pannelli difettosi				
Impianto	Sorvolo	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1	S1	29	60	2	1	9	29	16	2	1	189
	S2	32	55	2	1	9	32	16	2	1	189
2	S1	4	27	6	0	6	4	9	6	0	126
	S2	6	25	6	0	6	6	8	6	0	126
1	S3	27	63	2	1	12	27	17	2	1	252
	S4	29	53	2	1	12	29	14	2	1	252
2	S3	3	29	8	0	6	3	7	8	0	126
	S4	4	29	7	0	6	4	6	7	0	126

Tabella 7 Conteggio di guasti e pannelli difettosi.

La stessa tabella può essere replicata per *hotspot* (A) e *multihotspot* (B) in base alla severità dell'anomalia.

		Numero di guasti individuati						Numero di pannelli difettosi					
Impianto	Sorvolo	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1	A2	A3	B1	B2	B3
1	S1	25	1	3	29	10	21	25	1	3	9	2	5
	S2	27	5	0	26	5	24	27	5	0	9	2	5
2	S1	2	1	1	19	3	5	2	1	1	7	1	1
	S2	5	0	1	16	4	5	5	0	1	6	1	1
1	S3	19	5	3	30	10	23	19	5	3	8	2	5
	S4	23	2	4	25	5	23	23	2	4	7	1	6
2	S3	1	0	2	14	3	12	1	0	2	3	1	3
	S4	1	0	3	12	5	12	1	0	3	3	2	3

Tabella 8 Conteggio di guasti e pannelli difettosi per *hotspot* e *multihotspot*.

3.4.3 Tabelle di sintesi del confronto fra drone e aereo

La Tabella 9 racchiude il confronto fra le piattaforme utilizzate.
Si intendono in comune tutti quei difetti che, oltre a coincidere per tipologia e posizione, mostrano $\Delta T > 2K$ sia per il drone, sia per l'aereo. Se una o più di queste condizioni non si verificano, si assume che il guasto sia percepito esclusivamente da uno dei due velivoli e ricade in un'altra categoria ("anomalia da drone e non da aereo" o viceversa).
Per il conteggio sono state ignorate tutte le anomalie trascurabili.

Impianto	Sorvolo	Anomalie drone (pannelli difettosi)	Anomalie aereo (pannelli difettosi)	Anomalie in comune (numero di pannelli)	Anomalie da drone e non da aereo	Anomalie da aereo e non da drone
1	S1-S2	236	237	227	9	10
2		144	144	142	2	2
1	S3-S4	299	302	297	2	5
2		144	145	141	3	4

Tabella 9 Prestazioni di drone e aereo a confronto.

La stessa tabella può essere ripetuta per le singole categorie di guasto (Tabella 10).

Impianto	Sorvolo	Anomalie drone (pannelli difettosi)	Anomalie aereo (pannelli difettosi)	Anomalie in comune (numero di pannelli)	Anomalie da drone e non da aereo	Anomalie da aereo e non da drone
Hotspot (A)						
1	S1-S2	29	31	22	7	9
2		4	6	4	0	2
1	S3-S4	28	31	27	1	4
2		3	4	3	0	1
Multihotspot (B)						
1	S1-S2	15	14	13	2	1
2		9	8	8	1	0
1	S3-S4	16	16	15	1	1
2		7	8	6	1	2
Diodo (C)						
1	S1-S2	2	2	2	0	0
2		5	4	4	1	0
1	S3-S4	2	2	2	0	0
2		8	7	6	2	1
Estesa (D)						
1	S1-S2	1	1	1	0	0
2		0	0	0	0	0
1	S3-S4	1	1	1	0	0
2		0	0	0	0	0
Stringa (E)						
1	S1-S2	189	189	189	0	0
2		126	126	126	0	0
1	S3-S4	252	252	252	0	0
2		126	126	126	0	0

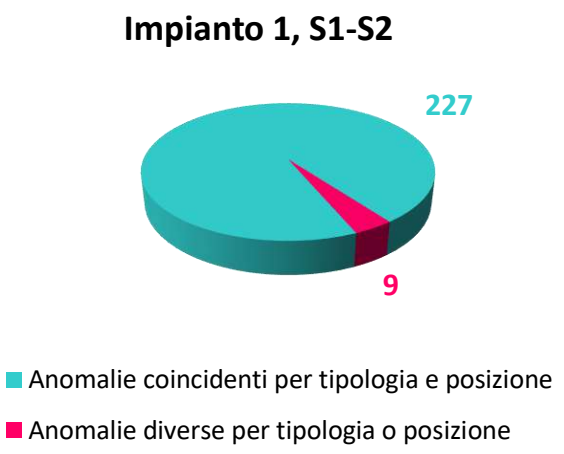
Tabella 10 Prestazioni di drone e aereo a confronto per tipologia di guasto.

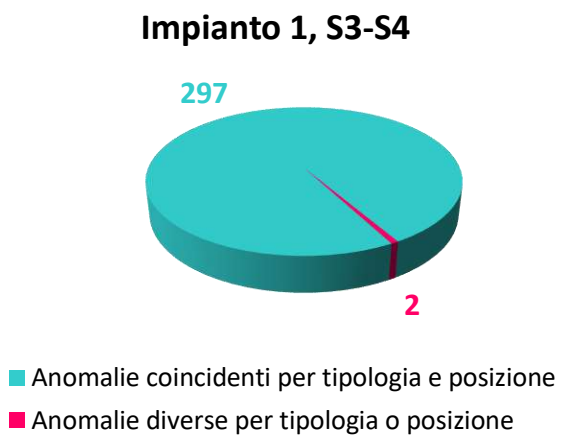
Inoltre, nei casi A e B, può essere riproposta tenendo conto della gravità delle anomalie.

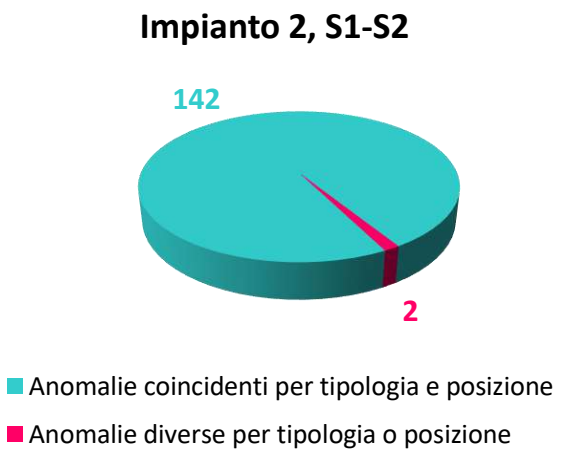
Impianto	Sorvolo	Anomalie drone (pannelli difettosi)	Anomalie aereo (pannelli difettosi)	Anomalie in comune (numero di pannelli)	Anomalie da drone e non da aereo	Anomalie da aereo e non da drone
***Hotspot* lievi** (A1)						
1	S1-S2	25	27	18	7	9
2		2	5	2	0	3
1	S3-S4	19	23	18	1	5
2		1	1	1	0	0
***Hotspot* intermedi** (A2)						
1	S1-S2	1	5	1	0	4
2		1	0	0	1	0
1	S3-S4	5	2	2	3	0
2		0	0	0	0	0
***Hotspot* severi** (A3)						
1	S1-S2	3	0	0	3	0
2		1	1	1	0	0
1	S3-S4	3	4	3	0	1
2		2	3	2	0	1
***Multihotspot* lievi** (B1)						
1	S1-S2	8	7	6	2	1
2		8	6	6	2	0
1	S3-S4	9	9	8	1	1
2		3	3	2	1	1
***Multihotspot* intermedi** (B2)						
1	S1-S2	2	1	1	1	0
2		1	1	0	1	1
1	S3-S4	2	2	2	0	0
2		1	2	1	0	1
***Multihotspot* severi** (B3)						
1	S1-S2	5	6	5	0	1
2		1	1	1	0	0
1	S3-S4	5	5	5	0	0
2		3	3	3	0	0

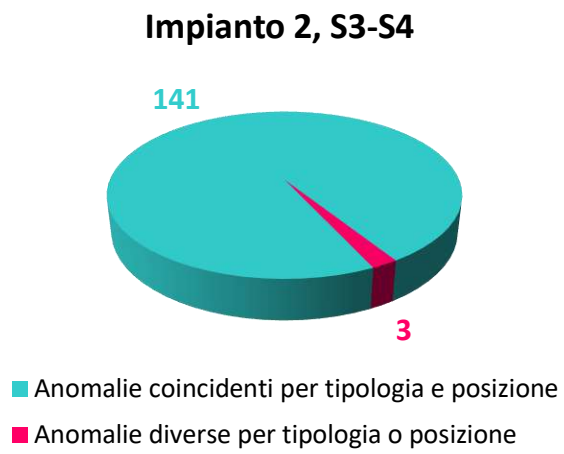
Tabella 11 Prestazioni di drone e aereo a confronto per severità di guasto.

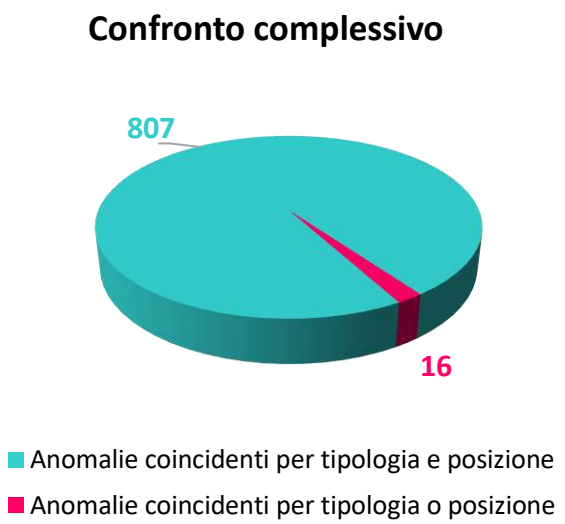
Le più generali considerazioni della Tabella 9 possono essere esposte con l'ausilio di grafici a torta, che comunicano i risultati in modo più intuitivo e immediato.
Si riportano i conteggi delle anomalie comuni fra le due piattaforme (azzurro) e di quelle rilevate esclusivamente dal drone (rosa); è chiara la sostanziale identità fra le due quantità.
Infine, è stato realizzato un grafico che riassume il confronto: si riportano le anomalie complessivamente individuate solo dal drone e quelle percepite anche dall'aereo.


Impianto 1, S1-S2
227
9
Anomalie coincidenti per tipologia e posizione
Anomalie diverse per tipologia o posizione


Impianto 1, S3-S4
297
2
Anomalie coincidenti per tipologia e posizione
Anomalie diverse per tipologia o posizione


Impianto 2, S1-S2
142
2
Anomalie coincidenti per tipologia e posizione
Anomalie diverse per tipologia o posizione


Impianto 2, S3-S4
141
3
Anomalie coincidenti per tipologia e posizione
Anomalie diverse per tipologia o posizione


Confronto complessivo
807
16
Anomalie coincidenti per tipologia e posizione
Anomalie coincidenti per tipologia o posizione

3.5 Confronto fra sorvoli successivi del drone

A completamento del raffronto fra drone e aereo, si propone il confronto fra i ΔT misurati dal drone in occasione delle ispezioni condotte. Si tratta di un'analisi multitemporale, che permette di studiare il decorso delle anomalie nel tempo.
Sono state ignorate, tanto per la realizzazione dei grafici quanto per il calcolo delle medie, tutte quelle anomalie di gravità trascurabile ($\Delta T < 2$ K).

3.5.1 BVG01

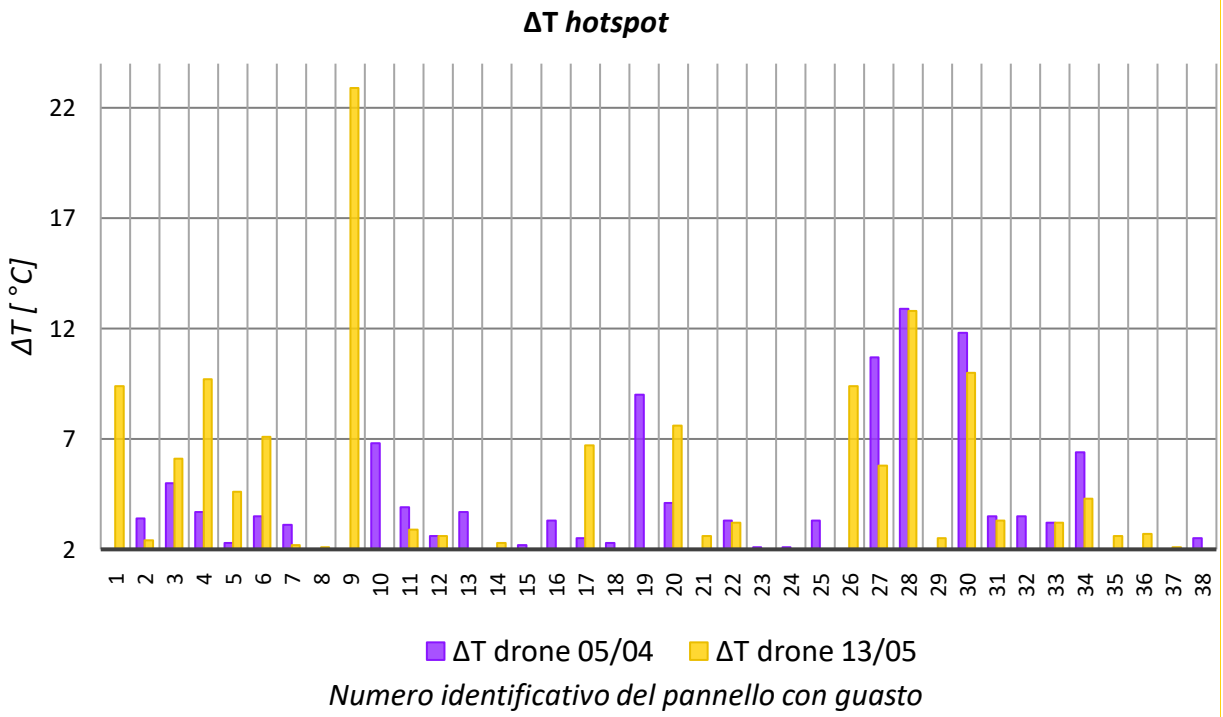


Grafico 21 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di *hotspot* nei due sorvoli successivi;

segue tabella riassuntiva delle misurazioni.

Numero identificativo del guasto	Stringa;modulo in cui il guasto si trova	ΔT ispezione 1 [°C]	ΔT ispezione 2 [°C]
1	1;7		9.4
2	14;21	3.4	2.4
3	14;7	5	6.1
4	15;7	3.7	9.7
5	17;15	2.3	4.6
6	22;1	3.5	7.1
7	27;7	3.1	2.2
8	30;6		2.1
9	31;5		22.9
10	36;17	6.8	
11	43;9	3.9	2.9
12	43;11	2.6	2.6
13	46;4	3.7	
14	47;3		2.3
15	49;13	2.2	1.8
16	68;2	3.3	
17	70;11	2.5	6.7
18	75;9	2.3	
19	75;17	9	
20	82;12	4.1	7.6
21	84;1		2.6
22	88;10	3.3	3.2
23	98;3	2.1	
24	107;8	2.1	
25	112;9	3.3	

26	120;3		9.4
27	120;4	10.7	5.8
28	153;4	12.9	12.8
29	153;18		2.5
30	166;16	11.8	10
31	169;2	3.5	3.3
32	177;4	3.5	
33	177;5	3.2	3.2

34	181;18	6.4	4.3
35	196;12		2.6
36	197;10		2.7
37	197;15	2	2.1
38	200;4	2.5	
Media ΔT drone		4.4 °C	
Media ΔT aereo		5.7 °C	

Dal confronto non emerge una tendenza precisa: alcune anomalie hanno mantenuto inalterata la propria gravità, mentre altre sono peggiorate. Questo può essere spiegato con un insaprimento del malfunzionamento elettrico, a causa della mancata manutenzione dopo la prima ispezione.
Inoltre si contano diversi nuovi guasti, ma, al tempo stesso, alcuni sono scomparsi: questo particolare comportamento potrebbe essere legato a tutti quegli *hotspot* riconducibili a sporcizia sul vetro protettivo della cella. Precipitazioni atmosferiche fra i sorvoli, infatti, possono aver contribuito spontaneamente alla rimozione dei depositi superficiali.
In modo duale, nuove impurità possono aver contribuito all'ulteriore surriscaldamento dei punti difettosi.
Di conseguenza, emerge la necessità di combinare ispezioni visive (con camere RGB o sul campo) con quelle termografiche (con sensori IR): così facendo, si ha certezza della natura del guasto e si aggirano perdite di potenza facilmente risolvibili.
Un'ulteriore causa della scomparsa di alcune anomalie potrebbe essere ricondotta a riflessi della luce solare sui pannelli, che potrebbe aver aggravato alcuni guasti rivelatisi poi poco significativi.
In generale, comunque, l'innalzamento del ΔT medio testimonia un generale peggioramento degli *hotspot* della centrale solare.

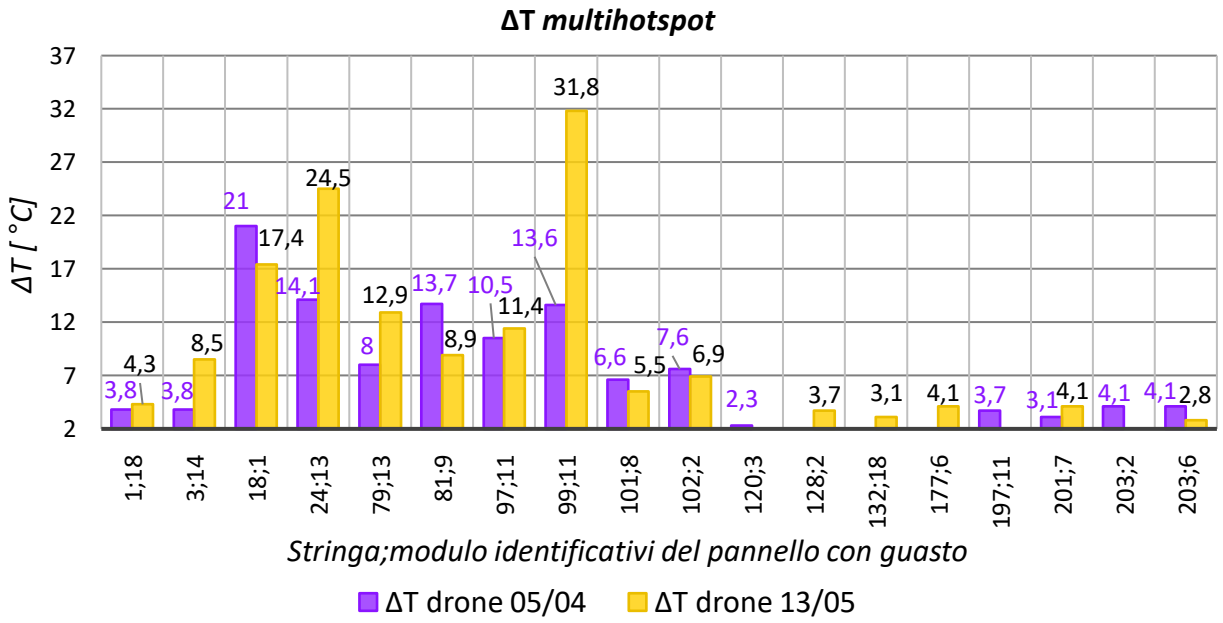


Grafico 22 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di *hotspot* nei due sorvoli successivi.

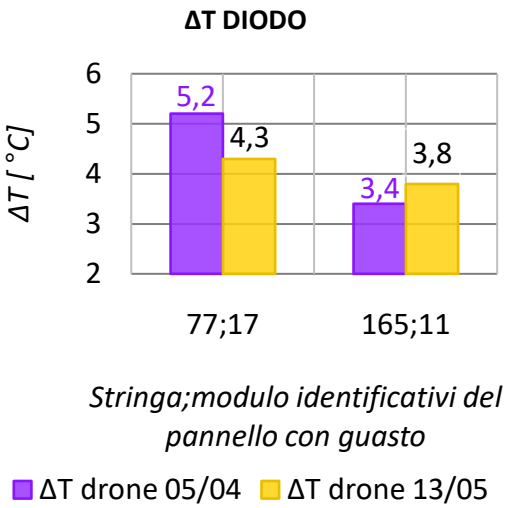


Grafico 23 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di diodi nei due sorvoli successivi.

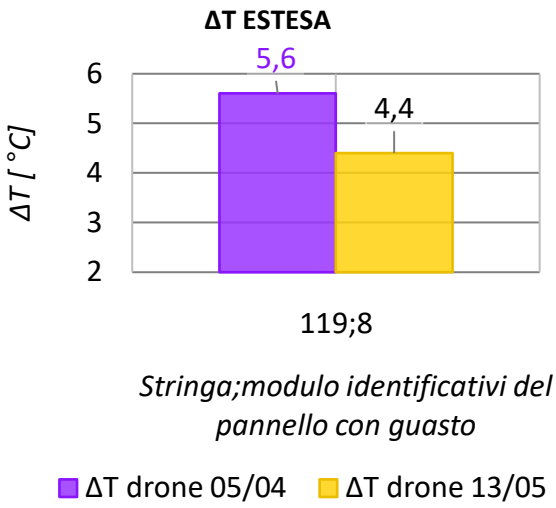


Grafico 24 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di estese nei due sorvoli successivi.

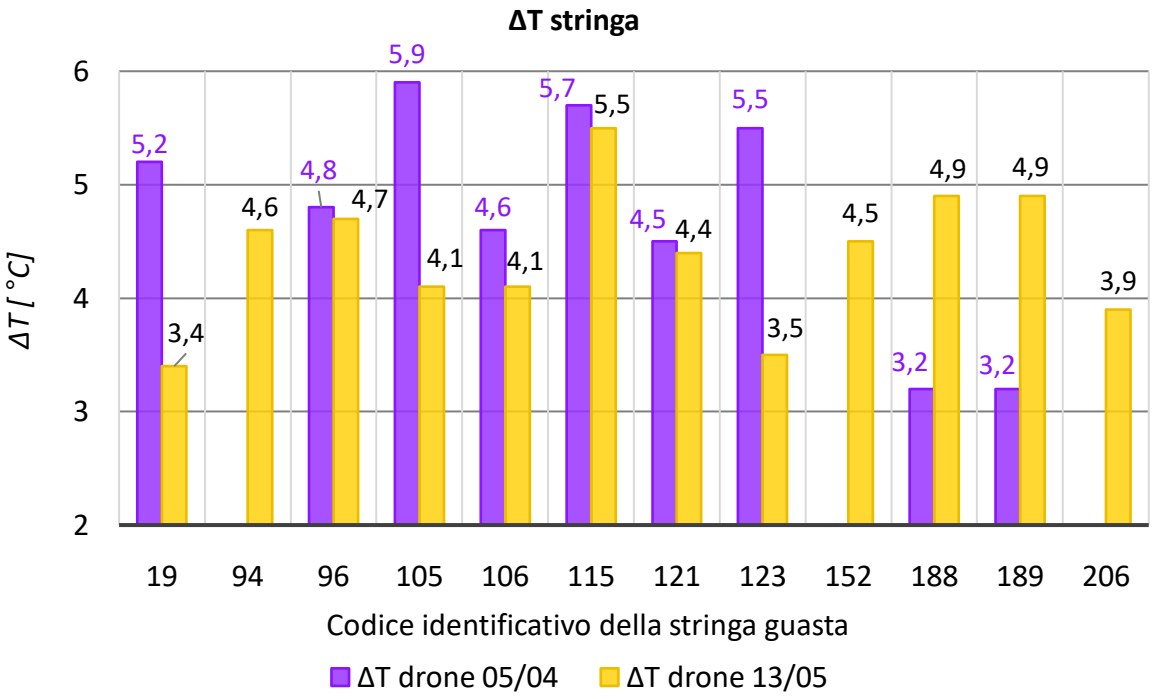


Grafico 25 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di stringhe nei due sorvoli successivi.

Le medie aritmetiche dei ΔT assumono i valori riportati nella seguente tabella.

Anomalia	Media ΔT drone 05/04 [°C]	Media ΔT drone 13/05 [°C]
Multihotspot	8.0	9.7
Diodo	4.3	4.1
Stringa	4.7	4.4

Le considerazioni introdotte per il confronto multitemporale di *hotspot* possono essere estese anche alle altre tipologie di guasto.
Merita più approfondita attenzione il comportamento delle stringhe: a eccezione di due, i guasti si presentano come meno gravi in occasione dell'ispezione del 13/05. Tuttavia, figurano 3 nuovi difetti di questo tipo che, come riportato in [2.2.3], si traducono in un importante calo della potenza prodotta.

3.5.2 FRL01

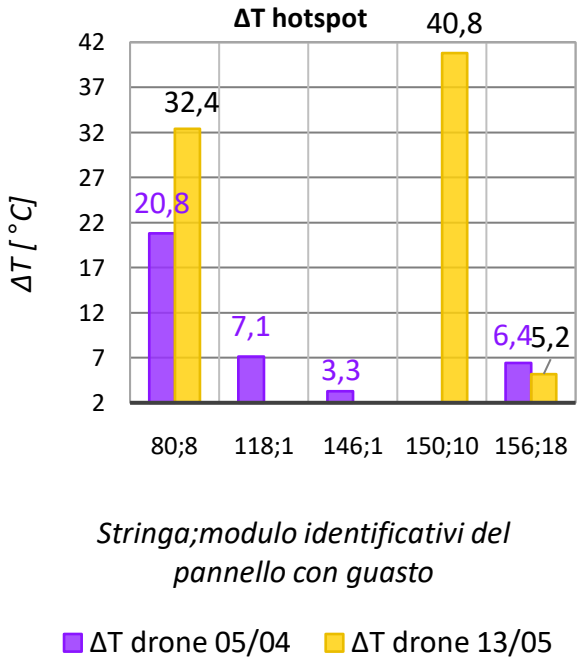


Grafico 26 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di *hotspot* nei due sorvoli successivi.

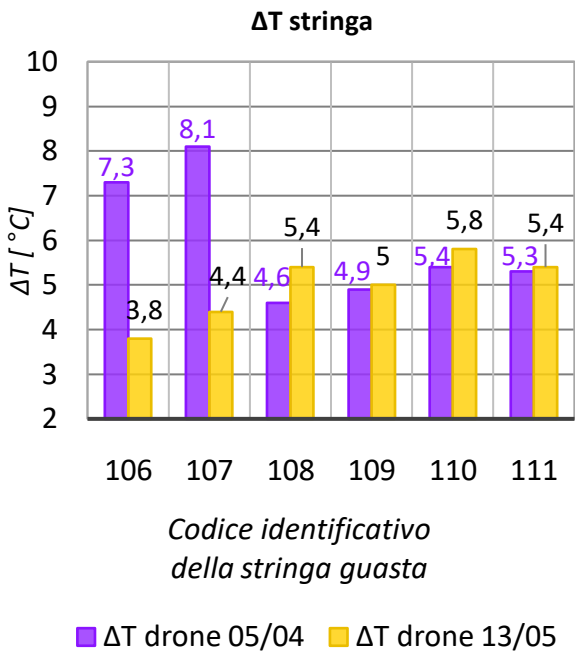


Grafico 27 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di stringhe nei due sorvoli successivi.

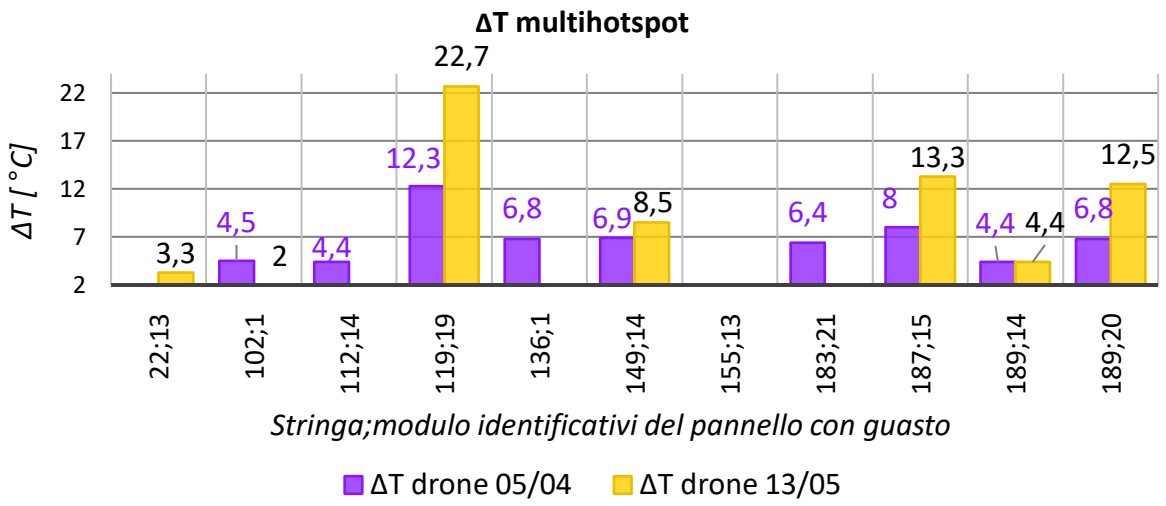


Grafico 28 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di *multihotspot* nei due sorvoli successivi.

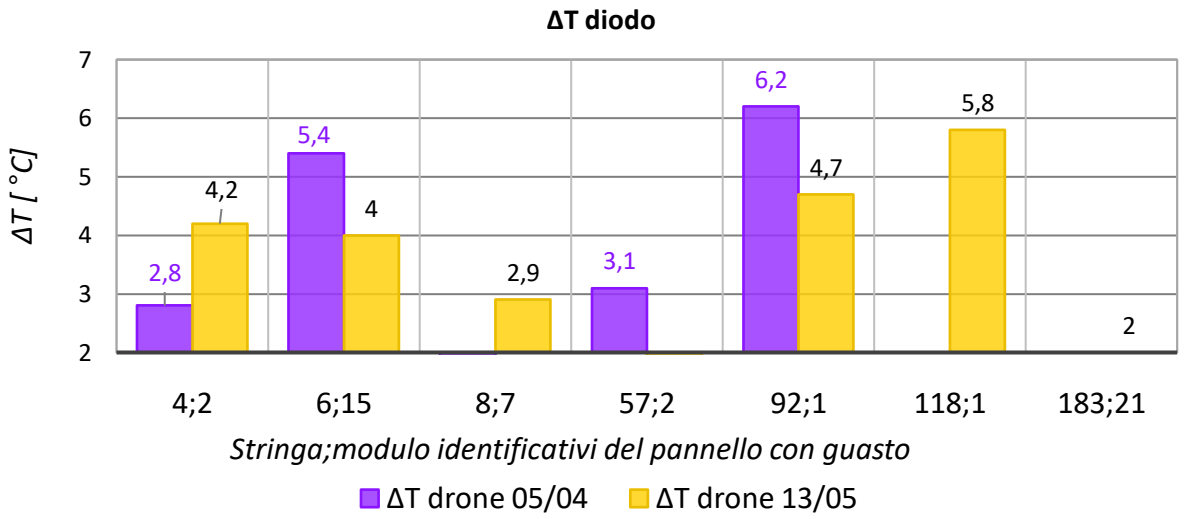


Grafico 29 ΔT rilevati dal drone in corrispondenza di diodi nei due sorvoli successivi

Le medie aritmetiche dei ΔT assumono i valori riportati nella seguente tabella.

Anomalia	Media ΔT drone 05/04 [°C]	Media ΔT drone 13/05 [°C]
Hotspot	9.4	26.1
Multihotspot	6.9	9.8
Diodo	4.5	4.0
Stringa	5.9	5.0

Anche per il secondo impianto, il raffronto multitemporale mette in luce le diverse cause della variazione dei ΔT fra un'ispezione e la successiva: la scomparsa o l'abbassamento della gravità di guasti grazie alla pulizia del vetro protettivo da parte della pioggia o a manutenzione, la comparsa di nuovi difetti a causa di malfunzionamenti elettrici

precedentemente assenti, il peggioramento di anomalie a causa di problematiche elettriche sempre più marcate o maggiore sporcizia.
In particolare, spicca un marcato peggioramento degli *hotspot:* l'emergere di uno nuovo e molto grave, oltre al brusco peggioramento di uno precedentemente rilevate, causa un deciso innalzamento del ΔT medio.
Come accadeva per l'impianto fotovoltaico di Bene Vagienna inoltre, i mutihotspot sono peggiorati nel tempo; al tempo stesso, la condizione di diodi e stringhe è leggermente migliorata in occasione della seconda ispezione. In particolare, non si rilevano nuovi guasti di quest'ultimo tipo.

4 CONCLUSIONI

La presente tesi ha approfondito il ruolo della termografia all'infrarosso nella diagnostica di impianti fotovoltaici di grande taglia, concentrandosi sulle più recenti e sostanziali innovazioni in questo campo.

In particolare, è stato effettuato il confronto fra le prestazioni del drone e dell'aereo: entrambe le piattaforme possono essere dotate di termocamere IR per il telerilevamento di anomalie termiche dei pannelli, riconducibili perlopiù a guasti di natura elettrica. Alcuni difetti tuttavia possono essere ricondotti a sporcizia e depositi superficiali, o ancora da vegetazione che ombreggia parzialmente i pannelli: si conferma quindi l'importanza di condurre anche ispezioni visive, sia sul campo che con camere RGB.

Oggigiorno l'utilizzo di *UAVs* è relativamente comune in questo ambito, ma la possibilità di impiegare aerei al loro posto rende l'*aIRT* ancor più allettante: le analisi condotte hanno dimostrato che i guasti vengono rilevati in modo sostanzialmente identico al riferimento del drone, tanto per tipologia del guasto, quanto per posizione sul pannello. Tuttavia, pur richiedendo un investimento iniziale più massiccio, permettono di ispezionare una moltitudine di impianti geograficamente vicini in poco tempo rispetto agli standard odierni, con meno operatori e senza le restrizioni cui i droni sono soggetti.

Più precisamente, le anomalie di natura diffusa sono risultate legate a ΔT poco difformi fra drone e aereo, sia impiegando sensori *long-wavelength* (7.5-12.5 µm), sia *medium-wavelength* (3-5 µm). Relativamente agli hotspot invece, e in particolare a quelli severi ($\Delta T > 10$K), si ravvisano differenze più marcate se entrambi i velivoli montano sensori LW. Adottando invece dispositivi LW per il drone e MW per l'aereo, la *performance* delle due piattaforme è particolarmente simile.

A questo proposito, le analisi compiute hanno permesso di concludere che non occorrono particolari alterazioni dei parametri significativi per ottenere letture paragonabili: gli scarti termici rilevati da drone e aereo si avvicinano mantenendo emissività dei pannelli pari a 0.85 e assumendo trasmissività dell'aria posta fra sensore e target unitaria.

L'ultimo raffronto vagliato dalla tesi è quello fra le rilevazioni del drone a distanza di tempo. È emerso che generalmente si assiste a un inasprimento della gravità delle anomalie, oltre che a un aumento in termini di numerosità. Al tempo stesso, è bene osservare che alcuni guasti sono migliorati o addirittura scomparsi: questa particolare tendenza potrebbe essere ricondotta alla presenza di riflessi della luce solare sui pannelli durante i sorvoli, oppure alla pulizia degli stessi da depositi e sporcizia grazie a precipitazioni atmosferiche.

Future ricerche su queste tematiche potrebbero rafforzare le conclusioni a cui si è giunti, confrontando i risultati di sorvoli su impianti diversi. Inoltre, se le nuove letture lo permettessero, si potrebbe cercare un fattore di scala (lineare o esponenziale) che consenta di legare fra loro i valori espressi dal drone e quelli proposti dall'aereo.

Si possono anche ripetere le analisi condotte con l'introduzione di software per l'analisi dei fotogrammi termici del drone che consentano di regolare gli stessi parametri di FLIR Research Studio.

BIBLIOGRAFIA

[1] F. Baumgartner, "Photovoltaic (PV) balance of system components: Basics, performance," *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment*, pp. 135–181, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-1-78242-336-2.00005-7.

[2] M. A. D. Studi and R. Internazionali, "Gestore dei Servizi Energetici."

[3] J. A. Tsanakas, L. D. Ha, and F. al Shakarchi, "Advanced inspection of photovoltaic installations by aerial triangulation and terrestrial georeferencing of thermal/visual imagery," *Renew Energy*, vol. 102, pp. 224–233, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.10.046.

[4] A. Riverola *et al.*, "Mid-infrared emissivity of crystalline silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 174, pp. 607–615, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2017.10.002.

[5] L. Zhu, A. Raman, K. X. Wang, M. A. Anoma, and S. Fan, "Radiative cooling of solar cells," *Optica*, vol. 1, no. 1, p. 32, Jul. 2014, doi: 10.1364/optica.1.000032.

[6] A. W. Kandeal *et al.*, "Infrared thermography-based condition monitoring of solar photovoltaic systems: A mini review of recent advances," *Solar Energy*, vol. 223, pp. 33–43, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.05.032.

[7] A. Kirsten Vidal de Oliveira, M. Aghaei, and R. Rüther, "Aerial infrared thermography for low-cost and fast fault detection in utility-scale PV power plants," *Solar Energy*, vol. 211, pp. 712–724, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.066.

[8] "2008_Celle e Moduli Fotovoltaici - Brofferio".

[9] I. Subedi, T. J. Silverman, M. G. Deceglie, and N. J. Podraza, "Emissivity of solar cell cover glass calculated from infrared reflectance measurements," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 190, pp. 98–102, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2018.09.027.

[10] *TECHNICAL SPECIFICATION Photovoltaic (PV) systems-Requirements for testing, documentation and maintenance-Part 3: Photovoltaic modules and plants-Outdoor infrared thermography*. 2017. [Online]. Available: www.iec.ch

[11] "https://www.dji.com/it/mavic-2-enterprise-advanced/specs."

[12] "https://support.flir.com/DsDownload/Assets/29444-201-en-US.html."

[13] "https://support.flir.com/DsDownload/Assets/29443-201-en-US.html."

[14] "https://www.flir.it/products/50-mm-f2.5-lwir-fpo-motorized-lens/."

[15] "https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD-in-photogrammetry."

[16] A. Licciulli, "Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali Corso di: Scienza e Tecnologia dei materiali ceramici," 2002.

[17] Wesii S.R.L., "Wesii_Anomalies Classification".

[18] "P. Pinceti, P. Profumo, E. Travaini, and M. Vanti, 'Using drone-supported thermal imaging for calculating the efficiency of a PV plant,' Proc. - 2019 IEEE Int. Conf.

Environ. Electr. Eng. 2019 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. EEEIC/I CPS Eur. 2019, 2019."

[19] Wesii S.R.L., "ENERGY LOSS ASSESSMENT".

[20] "https://3dmetrica.it/ortofoto/."

[21] "https://www.qgis.org/it/site/."

[22] "https://www.dji.com/it/downloads/softwares/dji-dtat3."

[23] "https://www.flir.eu/products/flir-research-studio/."

[24] Wesii S.R.L., "FRL01_2022_05_13," *Dati meteorologici*.

[25] Wesii S.R.L., "BVG01_2022_05_13," *Dati meteorologici*.

[26] Wesii S.R.L., "BVG01_2022_04_05," *Dati meteorologici*.

[27] "https://www.wunderground.com/weather/it/bene-vagienna."

[28] "https://www.wunderground.com/weather/it/farigliano."

Rigraziamenti

Mi piacerebbe riservare questo spazio per esprimere la mia gratitudine nei confronti di chi, a proprio modo, mi ha permesso di arrivare fino a qui.
Anzitutto vorrei ringraziare il relatore Professor Giovanni Tanda per la passione con cui mi ha coinvolto in questo progetto e la straordinaria dedizione con cui ha seguito passo passo il mio lavoro, dandomi aiuto e consiglio in qualunque momento.
Grazie al co-relatore Dottor Mauro Migliazzi per la fiducia che mi ha accordato fin dall'inizio e per gli stimoli che mi ha dato lungo l'intero percorso, alimentando la mia curiosità.
Vorrei ringraziare l'intera squadra di Wesii, per avermi accolto con simpatia e naturalezza; in particolare Pietro Salvagno, che armato di grande pazienza e disponibilità mi ha introdotto a un mondo che non conoscevo e spiegato tantissime cose, che hanno arricchito questa tesi e le mie conoscenze.
Questa non è solo la fine della mia tesi, ma anche e soprattutto una tappa importante di un percorso più ampio.
Non sarei mai arrivato a questo punto senza l'incondizionato appoggio dei miei genitori, che, specialmente quando lo meritavo di meno o ne avevo più bisogno, non sono mancati un solo istante. Grazie per aver incessantemente investito tempo ed energie nella mia formazione, personale e scolastica, e per tutti gli orizzonti che mi avete aiutato a vedere.
A mia sorella Linda, riferimento per mille cose, per avermi dimostrato che il duro lavoro e la dedizione portano lontano, oltre che per avermi aiutato ad orientarmi quando non sapevo in che direzione andare. Ovviamente grazie, ancora di più, per la tua compagnia e la dolcezza con cui ti lasci prendere in giro da me: certi lati di Auar non cambieranno mai.
Infine, vorrei ringraziare di cuore tutti i miei amici: per avermi aiutato a distrarmi quando ne avevo bisogno e aver ascoltato pazientemente le mie lamentele, ma anche per aver condiviso tantissimi momenti, più o meno spensierati, che ci hanno fatto crescere insieme. Grazie fra tutti a Luca, Giulia, Alice, Valentina.
Questi ultimi e impegnativi mesi non avrebbero avuto lo stesso sapore senza Lucia e Chiara, la miglior squadra che potessi avere al mio fianco e che mi ha dimostrato come insieme si vada lontano (e anche piuttosto velocemente).