POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



Tesi di Laurea Magistrale

Diagnostica automatizzata di generatori fotovoltaici tramite analisi di elettroluminescenza

Relatori:

Prof. Paolo Di Leo

Candidato:

Giorgio Giacalone

Ing. Alessandro Ciocia

Marzo 2021

Anno Accademico 2020/2021

HMamma e Papà,

che mi hanno insegnato l'arte del vivere.

*H*i mi*e*i Nonni,

che hanno creduto in me fin dal primo respiro.

Indice

1 A elettr	analisi d olumines	lel degrado delle celle fotovoltaiche tramite tecnica scenza	1 di 12
1.1	Frattu	re delle celle	12
1.2	2 Tecnie	che per l'individuazione dei difetti e dei fenomeni nelle celle	14
	1.2.1	Test di elettroluminescenza	16
1.3	8 Analis	si dei difetti riscontrabili tramite test di elettroluminescenza	21
	1.3.1	Difetti creatisi durante la produzione delle celle	22
	1.3.2	Difetti creatisi durante la fabbricazione dei moduli	24
	1.3.3	Difetti creatisi durante la fase di trasporto ed installazione	25
	1.3.4	Difetti creatisi in seguito ad agenti atmosferici	26
1.4	Analis	si dei fenomeni riscontrabili tramite test di elettroluminescenza	27
	1.4.1	Snail trails	27
	1.4.2	Nastri di interconnessione delle stringhe difettosi	29
	1.4.3	Burn marks	30
	1.4.4	PID	31
	1.4.5	Diodi di bypass difettosi	34
2 A elettr	utomatiz olumines	zzazione della procedura di analisi di immagini scenza da laboratorio	ad 35
2.1	Pre-pr	ocessing	36
2.2	2 Suddi	visione in singole celle	37

3 d	Au efiniz	itomatizzazione della procedura di classificazione di immagini ad zione di celle fotovoltaiche	alta 44
	3.1	Machine learning	49
	3.2	Classificazione	
		3.2.1 SVM	53
		3.2.2 Metodo Kernel	57
		3.2.3 Estrazione delle features	60
	3.3	Implementazione in Matlab	60
		3.3.1 Prove con SVM-OvR-Lineare	62
		3.3.2 Prova con SVM-OvR-RBF	68
		3.3.3 Prova con SVM-OvO-RBF	70
		3.3.4 Prova con SVM-OvR-Polinomiale	71
	3.4	Overfitting	76
4	Co	orrelazione tra le immagini ad elettroluminescenza e curve I-V	78
	4.1	Curve I-V e parametri elettrici	78
st	4.2 andar	Correlazione dei parametri elettrici con media, mediana e deviaz rd di immagini ad elettroluminescenza	zione 82
	4.3	Correlazione dei parametri elettrici con il quantitativo di pixel neri	85
	4.4	Correlazione tra potenza e difetti	86
5	An	alisi di immagini ad elettroluminescenza su campo	88
	5.1	Strumentazione utilizzata	89
	5.2	Allestimento delle prove di elettroluminescenza	89
	5.3	Mappatura dell'impianto	91
	5.4	Post-elaborazione delle immagini	97
	5.4 5.5	Post-elaborazione delle immagini Risultati delle prove	97 99

	5.7	Applicazione del classificatore sulle foto dell'impianto reale	111
6	Со	nclusioni	116
7	Bił	bliografia	118
8	Ар	pendice	120
	8.1	Script per il ritaglio in Matlab	120
	8.2	Script per la classificazione binaria	125
	8.3	Script per la creazione del classificatore SVM in Matlab	127
	8.4	Script per l'Implementazione del classificatore su Matlab	127

Lista delle figure

Figura 1-1: Esempio di microcrack13
Figura 1-2: Confronto tra immagini ottenute con termografia a infrarossi (ir alto) ed elettroluminescenza (in basso) di uno stesso pannello solare15
Figura 1-3: Segnale di luminescenza del silicio17
Figura 1-4: Efficienza quantica dei sensori CCD e InGaAs a confronto 19
Figura 1-5: Possibile schema di acquisizione di immagini EL20
Figura 1-6: Schermo protettivo dalla luce solare per effettuare il test EL anche su moduli installati all'aperto
Figura 1-7: Confronto tra il metodo di acquisizione in laboratorio (a sinistra) e quello sul campo (a destra)21
Figura 1-8: Esempio di celle affette da macchie scure sulla superficie22
Figura 1-9: Esempio di celle affette da chain pattern23
Figura 1-10: Esempio di celle aventi finger difettosi24
Figura 1-11: Esempio di celle soggette a fratture parallele ai busbar24
Figura 1-12: Esempio di cella affetta da connessione inesistente (a sinistra) e parziale (a destra) tra il busbar e la cella stessa
Figura 1-13: Esempio di celle affette da crack poco significativi dovuti a stress meccanici
Figura 1-14: Esempio di celle affette da crack significativi dovuti a stress meccanici
Figura 1-15: Esempio di cella affetta da crack dovuto ad eventi atmosferici.27
Figura 1-16: Confronto tra due celle con snail trails (sopra) e senza difett (sotto) tramite EL

Figura 1-17: Immagine di un modulo affetto da snail trails confrontata con la rispettiva immagine EL
Figura 1-18: Descrizione dei componenti di un modulo29
Figura 1-19: Esempio di immagine EL di un modulo FV avente tre interconnessioni tra celle interrotte
Figura 1-20: Esempio di cella affetta da burn mark31
Figura 1-21: Percorso anomalo dei portatori di carica nel modulo FV32
Figura 1-22: Degradazione potenziale indotta (PID) di un modulo FV33
Figura 1-23: Cella priva di difetti a sinistra e stessa cella affetta da PID dopo essere stata sottoposta a un test di invecchiamento a destra
Figura 1-24: Esempio di modulo con diodi di bypass cortocircuitati34
Figura 2-1: Flow chart per immagini EL da laboratorio
Figura 2-2: Foto dei moduli 2, 4 e 9
Figura 2-3: Immagine EL del modulo 4 a sinistra e immagine EL del modulo 4 con prospettiva corretta a destra
Figura 2-4: Immagine EL del modulo 2 con prospettiva corretta a sinistra e modulo 2 ritagliato a destra
Figura 2-5: Immagine EL del modulo 4 con prospettiva corretta a sinistra e modulo 4 ritagliato a destra
Figura 2-6: Esempi di celle non correttamente ritagliate
Figura 2-7: Prima e dopo il ritaglio corretto della cella nº 43 del modulo 440
Figura 2-8: Prima e dopo il ritaglio corretto della cella nº 11 del modulo 940
Figura 2-9: Prima e dopo il ritaglio non corretto della cella n ° 3 del modulo 9 41

Figura 4-5: Visualizzazione grafica della correlazione tra lo scarto di corrente e la somma dei pixel neri
Figura 5-1: Flow chart per immagini EL da campo88
Figura 5-2: Planimetria dell'impianto fotovoltaico92
Figura 5-3: Legenda93
Figura 5-4: Mappatura dei moduli fotovoltaici della zona "nord-ovest" dell'impianto con indicazione del codice univoco del modulo
Figura 5-5: Mappatura dei moduli fotovoltaici della zona "nord-est" dell'impianto con indicazione del codice univoco del modulo
Figura 5-6: Mappatura dei moduli fotovoltaici della zona "sud-est" dell'impianto con indicazione del codice univoco del modulo
Figura 5-7: Mappatura dei moduli fotovoltaici della zona "sud-ovest" dell'impianto con indicazione del codice univoco del modulo
Figura 5-8: Foto originali del primo giorno97
Figura 5-9: Foto modificate del primo giorno98
Figura 5-10: Foto originali del secondo giorno98
Figura 5-11: Esempio di cella con frattura lungo uno dei due busbars99
Figura 5-12: Esempio di cella con frattura lungo uno dei due busbar nell'immagine EL del modulo 2_0373 e relativo ingrandimento100
Figura 5-13: Esempio di celle con fratture lungo uno dei due busbar nell'immagine EL del modulo 2_0319 e relativo ingrandimento101
Figura 5-14: Esempio di celle con fratture lungo uno dei busbar nelle immagini EL dei moduli 2_0414 (a sinistra) e 2_0305 (a destra)101
Figura 5-15: Esempio di celle con fratture lungo uno dei busbar nelle immagini EL dei moduli 1_0348 (a sinistra) e 1_0044 (a destra)102

Figura 5-16: Esempio di celle con disconnessione di uno dei busbars laterali (a sinistra) e di quello centrale (a destra)102
Figura 5-17: Esempio di cella con forte disomogeneità nell'immagine EL del modulo 2_0440 e relativo ingrandimento103
Figura 5-18: Esempio di celle con forte disomogeneità nelle immagini EL dei moduli 1_0006 (a sinistra) e 1_0033 (a destra)104
Figura 5-19: Esempio di celle con forte disomogeneità nelle immagini EL dei moduli 1_0093 (a sinistra) e 2_0390 (a destra)104
Figura 5-20: Esempio di cella con piccola frattura105
Figura 5-21: Esempio di cella con una piccola frattura nell'immagine EL del modulo 2_0235 e relativo ingrandimento (l'immagine in ingrandimento è ruotata per comodità di visualizzazione)
Figura 5-22: Esempio di celle con piccole fratture nelle immagini EL dei moduli 2_0305 (a sinistra) e 2_0414 (a destra)106
Figura 5-23: Esempio di celle con piccole fratture nelle immagini EL dei moduli 1_0044 (a sinistra) e 1_0348 (a destra)107
Figura 5-24: Esempio di moduli con luminosità disomogenea tra le celle (modulo 1_0113 a sinistra e modulo 2_0207 a destra)108
Figura 5-25: Esempio di moduli con luminosità disomogenea tra le celle (modulo 1_0257 a sinistra e modulo 2_0365 a destra)108
Figura 5-26: Esempio di modulo con celle aventi difetti di fabbricazione e relativo ingrandimento (modulo 2_0371)109
Figura 5-27: Esempio di moduli con celle aventi difetti di fabbricazione (modulo 2_0305 a sinistra e modulo 2_0354 a destra)109
Figura 5-28: Foglia osservata nello spettro dell'infrarosso (a sinistra) e nel visibile (a destra)
Figura 5-29: Esempi di immagini troppo distorte112

8

Lista delle tabelle

Tabella 3-1: Classifica delle celle del modulo 2 realizzata tramite il metodo del conteggio dei pixel al di sotto di una soglia del 10% e i relativi istogrammi.......48

 Tabella 3-2: Matrice di confusione della prova 1
 63

 Tabella 3-3: Matrice di confusione della prova 2
 64

 Tabella 3-4: Matrice di confusione della prova 3
 65

 Tabella 3-5: Matrice di confusione della prova 4
 66

 Tabella 3-6: Matrice di confusione della prova 5
 67

 Tabella 3-7: Matrice di confusione della prova 6
 68

 Tabella 3-8: Matrice di confusione della prova 7
 70

Tabella 3-9: Matrice di confusione della prova 871 Tabella 3-10: Matrice di confusione della prova 972 Tabella 3-11: Esempi di esiti positivi della classificazione tramite SVM della "prova 9"......74 Tabella 3-12: Esempi di esiti negativi della classificazione tramite SVM della "prova 9"......76 Tabella 4-1: Fattori di correlazione tra i parametri elettrici e deviazione Tabella 4-2: Fattori di correlazione tra i parametri elettrici e il quantitativo di pixel neri al di sotto della soglia specificata......85 Tabella 4-3: Confronto tra lo scarto in potenza reale e quello calcolato.......87

 Tabella 5-1: Test EL del primo giorno......90

Tabella 5-2: Test EL del secondo giorno91

Tabella 5-3: Conteggio difetti per I1S1	
Tabella 5-4: Conteggio difetti per inverter	111
Tabella 5-5: Conteggio difetti per zona	
Tabella 5-6: Risultati dell'applicazione del classificatore della "	prova 9" alle
immagini di un impianto reale	

Introduzione

L'attuale consumo sempre più intenso delle risorse non rinnovabili del pianeta impone all'uomo la necessità di estendere la propria attenzione a nuove fonti di energia rinnovabili e non inquinanti. Il fotovoltaico ha il potenziale per diventare, ad un ritmo estremamente rapido, una delle principali fonti di energia elettrica in diversi paesi. La capacità cumulativa fotovoltaica è cresciuta rapidamente negli ultimi decenni, passando da \approx 9,2 GW nel 2007 a \approx 630 GW nel 2019. Questa crescita rappresenta un investimento significativo nel settore energetico, dell'ordine di cento miliardi di euro.

Avere a disposizione moduli fotovoltaici sempre efficienti nel corso della vita dell'impianto, dunque capaci di convertire la massima quantità di radiazione solare possibile riduce il *Pay Back Time* (PBT), ovvero il numero di anni dopo i quali il ritorno economico bilancia completamente l'investimento iniziale. Ciò massimizza i ritorni finanziari degli investitori in termini energetici, dunque incentiva l'espansione di tale settore e parallelamente l'abbattimento dell'inquinamento ambientale. Pertanto, la garanzia della qualità all'interno degli impianti fotovoltaici è essenziale per assicurare l'efficienza e l'affidabilità a lungo termine dei moduli solari, dunque, fondamentale per poter realizzare la decarbonizzazione necessaria all'*energy transition*.

Questa tendenza sottolinea la necessità di tenere traccia dei guasti, una volta installati i moduli, con metodi diagnostici accurati e di facile utilizzo per garantire un elevato rendimento globale dell'impianto. Per questo motivo, vengono messi in pratica metodi di ispezione tecnica al fine di valutare la qualità e le prestazioni dei moduli FV in loco.

In questo lavoro di tesi vengono proposte delle procedure di diagnostica dettagliata, sia per moduli singoli analizzati in laboratorio sia per un impianto fotovoltaico reale, finalizzate all'ottimizzazione della manutenzione dei moduli fotovoltaici tramite la tecnica diagnostica dell'elettroluminescenza (EL). Nella prima parte vengono presentati approcci automatizzati per la classificazione delle singole celle fotovoltaiche in base alla tipologia di difetto. Nella seconda parte viene descritta la metodologia utilizzata per analizzare lo stato di salute dei moduli appartenenti ad un impianto reale, partendo da foto scattate sul campo, e ne vengono analizzati i problemi.

1 Analisi del degrado delle celle fotovoltaiche tramite tecnica di elettroluminescenza

1.1 Fratture delle celle

Le celle fotovoltaiche sono fatte di silicio e ciò le rende molto fragili. Nel substrato di silicio possono formarsi *microcrack*, ovvero crepe di diverse lunghezze e orientamenti, che spesso non possono essere viste ad occhio nudo. Esse sono dovute alle sollecitazioni meccaniche sostenute dai moduli durante la loro vita.

L'incidenza di un'incrinatura sulla potenza elettrica può dipendere da vari fattori. Finché il microcrack non coinvolge la metallizzazione delle celle, il flusso di corrente può continuare a circolare. Viceversa, se una porzione di cella resta isolata, la corrente non può più scorrere dai contatti metallici alla griglia di raccolta delle cariche.

Come evidenziato in Figura 1-1, i casi a) e b) mostrano un esempio di come i microcrack possono determinare la separazione dei contatti metallici. In questo caso la corrente generata dalle aree evidenziate non può defluire verso le griglie di raccolta delle cariche; ciò determina porzioni inattive. Il caso c) mostra un esempio di cella avente una crack trasversale alla griglia di raccolta delle cariche; ciononostante i contatti metallici sono integri, cioè in grado di trasportare la corrente, dunque, in questo caso, il passaggio del flusso di corrente non è compromesso. Infine, nel caso della cella d), il crack longitudinale presente nella zona centrale della cella non influisce sulla circolazione della corrente, la quale infatti può riversarsi liberamente sulla griglia di raccolta delle cariche non danneggiata.



c) Crack trasversale

d) Crack longitudinale

Figura 1-1: Esempio di microcrack

A seconda del tipo di crack, le variazioni di temperatura e umidità, causate dai cambiamenti metereologici, aggravano il fenomeno attraverso sollecitazioni termomeccaniche che possono portare ad avere porzioni di celle o addirittura intere celle inattive. Ciò si traduce in un calo di potenza della cella fotovoltaica interessata e dunque dell'intero modulo solare. Maggiore è il numero di incrinature in un modulo FV, maggiori sono le possibilità che se ne creino e sviluppino di più lunghe e ampie durante il suo normale funzionamento.

1.2 Tecniche per l'individuazione dei difetti e dei fenomeni nelle celle

L'analisi della curva I-V, la termografia a infrarossi (IR) e l'imaging a elettroluminescenza sono sicuramente gli strumenti più validi per l'individuazione dei principali difetti che determinano cali delle performance dei moduli fotovoltaici.

Il test più importante utilizzato per controllare lo stato di un generatore FV consiste nella determinazione della sua curva caratteristica I-V eseguita con sistemi di misura adeguati, utilizzando carichi capacitivi o elettronici. Ha come scopo quello di misurare i parametri elettrici effettivi dei generatori FV e confrontarli con i valori indicati dal produttore ma soprattutto quello di quantificare il calo delle prestazioni dovuto al deterioramento dei materiali, ad eventi atmosferici o a danni durante la manutenzione. In particolare, essa può rivelare due difetti: parti di celle non attive dovute a fenomeni di *crack* cellulare o altri motivi (difetti di rete); cortocircuito di un diodo di *bypass*. L'unico limite di questa tecnica è che non può fornire facilmente informazioni sulle cause del problema perché i metodi utilizzati convenzionali richiedono lunghi tempi di misurazione e ciò limita la sua applicabilità in ambito industriale.

Con l'ispezione termografica a infrarossi è possibile invece monitorare rapidamente lo stato di ogni singolo pannello fotovoltaico e delle singole celle. Una termocamera a infrarossi (IR) funziona come un dispositivo di registrazione video (nell'intervallo spettrale 7-14 μ m), che produce un'immagine termica radiometrica. In questo modo viene realizzata una mappa termografica spaziale dei moduli dell'impianto che mostra le regioni con temperature più fredde o più calde. Le celle ben funzionanti mostrano una densità di corrente quasi uniforme in polarizzazione inversa e il carico termico è ben distribuito attraverso il modulo. Al contrario, le celle difettose, generalmente a causa di crepe o altri tipi di difetti, presentano zone ad alta temperatura (hot-spot) che possono danneggiare la cella in pochi secondi. La tecnica termografica più comune e più facile da applicare è la termografia in condizioni stazionarie perché consente l'analisi dei moduli sul campo senza richiedere l'arresto del sistema. Tuttavia, per ottenere una visione adeguatamente dettagliata del modulo fotovoltaico bisogna ricorrere alla termografia ad impulsi o alla termografia lock-in, entrambe tecniche adoperabili necessariamente in condizioni di laboratorio. Queste telecamere vengono utilizzate anche per verificare la presenza di temperature pericolose in altri componenti, quali scatole di stringa, cavi e convertitori.

L'analisi della curva I-V e il test EL sono due tecniche diagnostiche complementari. La prima consente una valutazione quantitativa delle prestazioni del modulo FV, mentre il test EL fornisce uno stato di salute qualitativo, con dettagli sulle cause dei guasti. Questa proprietà rende la EL una tecnica migliore della termografia, che in molti casi può solo localizzare i difetti senza definirne le cause. La Figura 1-2 confronta le immagini ottenute dall'applicazione di entrambi i metodi su stessi pannelli fotovoltaici in stesse condizioni. Risulta evidente come la tecnica EL offre una risoluzione dell'immagine e un livello di dettaglio notevolmente migliori (1).



Figura 1-2: Confronto tra immagini ottenute con termografia a infrarossi (in alto) ed elettroluminescenza (in basso) di stessi pannelli solari

La maggiore risoluzione nell'imaging EL consente una valutazione dei dati più affidabile e più accurata. I limiti dell'imaging EL si verificano principalmente a causa della presenza di luce diffusa intensa, essenzialmente luce solare. I principali vantaggi di EL rispetto ad altri metodi di analisi invece sono la sua semplicità e la capacità di produrre mappature ad alta risoluzione utilizzando tempi di acquisizione brevi, che ne consentono anche l'applicazione in ambienti industriali come strumento di caratterizzazione dei moduli in linea di produzione.

1.2.1 Test di elettroluminescenza

I test di elettroluminescenza sono una tipologia di analisi largamente utilizzata nell'ambito dello studio del degrado dei sistemi fotovoltaici. L'elettroluminescenza (EL) è una tecnica veloce e non distruttiva, ovvero non comporta alcuna forma di danneggiamento per i moduli da analizzare e non altera in alcun modo le prestazioni elettriche dei componenti, in grado di fornire informazioni sullo stato di salute delle celle fotovoltaiche. Essa garantisce un'elevata precisione nel rilevamento di difetti e guasti più comuni nelle celle che possono verificarsi durante la loro intera vita e consente di individuare le cause delle perdite di performance di un determinato modulo o impianto individuato sulla caratterista corrente-tensione. Ad esempio, le immagini EL possono mostrare degradazioni di vario genere come microcrack, rotture e persino disomogeneità nella struttura cristallina delle celle di silicio non rilevabili dall'occhio umano.

La luminescenza è un fenomeno fisico che prevede l'emissione di fotoni di luce da parte di atomi eccitati da cause diverse dall'aumento di temperatura. L'elettroluminescenza si basa sull'analisi della luminescenza, in termini di intensità e di distribuzione spaziale, emessa da atomi sottoposti ad un potenziale elettrico in polarizzazione diretta.

La prova di elettroluminescenza viene eseguita operando in maniera inversa rispetto all'ordinario funzionamento di un modulo fotovoltaico. Il test, ottenuto come processo inverso dell'effetto fotovoltaico, consiste nell'applicare una tensione in modo da indurre un flusso di corrente nel modulo fotovoltaico. Tale flusso eccita gli elettroni del silicio della giunzione p-n i quali, passando dalla banda di valenza a quella di conduzione, liberano un fotone nella lunghezza d'onda dell'infrarosso. Il segnale di luminescenza dal silicio cristallino infatti varia da circa 950 nm a 1350 nm e il picco, corrispondente al *bandgap*, è di 1150 nm (v. Figura 1-3) (2).



Figura 1-3: Segnale di luminescenza del silicio

I fotoni emessi possono essere captati da apposite fotocamere aventi dei sensori in grado di rilevare la luce *Near-Infrared* (NIR - $0.75 \div 1.4 \mu m$), dunque ottenere immagini EL. I sensori delle fotocamere utilizzate per effettuare test EL possono essere realizzati, principalmente, con due diversi tipi di semiconduttori:

- Arseniuro di indio gallio (InGaAs); Le telecamere InGaAs sono ideali per l'uso da parte dell'industria solare per l'ispezione delle celle grazie alla loro elevata efficienza quantica (circa l'80% in corrispondenza del picco di emissione del silicio, v. Figura 1-4). I sensori InGaAs garantiscono un'elevata risoluzione dell'immagine anche nello spettro *Short-Wavelength Infrared* (SWIR - 1.4 ÷ 3.0 µm), ma anche un costo elevato per il sensore (tra le migliaia e le decine di migliaia di euro). Il requisito principale per l'imaging EL con luce diurna derivante da sensori InGaAs è che le immagini devono essere acquisite velocemente e con tempi di esposizione brevi per evitare sfocature da movimento e saturazione dovute alla luce solare.
- 2. Sensori al silicio (CCD/CMOS); L'elettroluminescenza è diventata sempre più popolare con l'avvento dei sensori al silicio a basso costo. Sono simili a quelli utilizzati per le fotocamere digitali ma ottimizzati per essere più sensibili nell'infrarosso. Le fotocamere più performanti hanno un sistema in grado di raffreddare il silicio del sensore al fine di ottenere immagini più nitide. Uno svantaggio significativo di un sensore al silicio è che hanno una scarsa risposta oltre i 1000 nm a causa del

basso coefficiente di assorbimento del silicio (v. Figura 1-4). Sebbene elettronicamente più sensibili dell'InGaAs a causa del minore rumore di lettura, le telecamere al silicio necessitano di più tempo di integrazione perché il bagliore spettrale della cella solare al silicio è al limite del bandgap, che è anche il punto in cui l'efficienza quantica del materiale diminuisce rapidamente. Il sensore al silicio ha una risposta relativamente scarsa nella regione di interesse di 1000-1200 nm, ma il suo costo è basso. Per questo motivo l'utilizzo di camere con questi sensori è ancora più interessante, dato che è possibile ottenere risultati comunque soddisfacenti. Il sensore può essere di tipo CCD (Charge-Coupled CMOS (Complementary-Metal-Oxide-Device) 0 Semiconductor). Entrambi i sensori hanno come elemento base il fotodiodo, l'elemento fotosensibile che, colpito da un raggio di luce, genera una carica elettrica.

- Il primo consiste in un circuito integrato formato da una riga, o da una griglia, di elementi semiconduttori in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica ad un altro elemento adiacente. Nel caso del sensore CCD, la carica elettrica viene convertita in voltaggio per poi uscire dal sensore come segnale analogico o digitale tramite la quale è possibile ricostruire la matrice dei pixel.
- Il CMOS è un tipo di tecnologia utilizzata in elettronica digitale per la progettazione di circuiti integrati, alla cui base sta l'uso dell'invertitore a transistor MOSFET. Ogni fotodiodo è accompagnato da un convertitore che trasforma l'energia luminosa in voltaggio, e spesso anche da amplificatori di segnale, riduttori di rumore e circuiti di digitalizzazione, in modo da ottenere in uscita un segnale in formato digitale.

Sia i sensori CCD che CMOS possono offrire un'eccellente qualità dell'immagine se ben progettati. Ognuna delle due tecnologie ha punti di forza e di debolezza. Il CMOS è più suscettibile al rumore e ha una maggiore complessità costruttiva dei CCD, i quali però consumano una

grande quantità di energia e sono più costosi. I sensori CMOS generalmente necessitano la presenza di un chip che ottimizzi la qualità dell'immagine, incrementando così il costo e riducendo il vantaggio sui consumi. Gli sforzi dei progettisti di CMOS sono stati infatti direzionati a raggiungere una più alta qualità dell'immagine, mentre i realizzatori di CCD hanno lavorato per ridurre il consumo energetico e le dimensioni dei pixel. In condizioni di luce fioca, in cui le variazioni dovute all'amplificazione sono più significative, i sensori CCD generano una risposta dei pixel più uniforme rispetto a quanto succede nei CMOS. Entrambi i sensori possono essere raffreddati, con raffreddamento termoelettrico, per ottenere un miglior rapporto segnale/rumore mediante la riduzione della dark current del dispositivo proveniente dalle cariche generate termicamente.

La Figura 1-4 mostra l'efficienza quantica (QE) tipica dei sensori al silicio confrontata con quella dei sensori con tecnologia InGaAs (2).



Figura 1-4: Efficienza quantica dei sensori CCD e InGaAs a confronto

Tipicamente, l'imaging EL viene condotto in un ambiente di laboratorio in cui il pannello solare può essere nascosto alla luce solare, che influisce negativamente sulla cattura delle immagini EL, attraverso l'uso di costose apparecchiature. La Figura 1-5 mostra un possibile schema di acquisizione in laboratorio di immagini EL come proposto in (3).



Figura 1-5: Possibile schema di acquisizione di immagini EL

Questa situazione non è l'ideale per ispezionare i pannelli solari dopo l'installazione e pertanto si sono ideate delle soluzioni per acquisire immagini EL anche all'aperto, tramite apparecchiature portatili come mostrato nella Figura 1-6.



Figura 1-6: Schermo protettivo dalla luce solare per effettuare il test EL anche su moduli installati all'aperto

Gli autori in (4) mettono a confronto i risultati di due analisi EL effettuate in laboratorio e sul campo, rispettivamente. Il primo metodo risulta sicuramente più costoso ma permette di verificare con più accuratezza la presenza di difetti sul modulo, mentre il secondo risulta più economico ma presenta delle inesattezze di immagine dovute alla non perfetta copertura del modulo. Tuttavia, le due immagini EL acquisite con i due diversi metodi non pongono differenze importanti e sono perciò paragonabili; ciò certifica il successo del metodo low-cost, che permette di visualizzare con buona approssimazione gli stessi difetti. La Figura 1-7 mostra il confronto delle due immagini.



Figura 1-7: Confronto tra il metodo di acquisizione in laboratorio (a sinistra) e quello sul campo (a destra)

Nella foto a destra i bordi inferiore e superiore del pannello appaiono scuri a causa dell'elaborazione non buona dell'immagine, in quanto la luce prodotta dal pannello è fuoriuscita dalla tenuta dello schermo posto sopra di esso.

1.3 Analisi dei difetti riscontrabili tramite test di elettroluminescenza

Il test EL permette di individuare i difetti delle celle solari che creano un calo nella produzione dell'impianto. Nelle immagini EL, le zone intatte e perfettamente funzionanti della cella possono essere facilmente individuate perché visibilmente differenti dalle zone danneggiate o elettricamente isolate, le quali appaiono nere o con una tonalità di grigio molto scura a causa della loro più bassa luminescenza.

I difetti nelle celle dei moduli fotovoltaici riscontrabili tramite la prova di elettroluminescenza possono essere categorizzati a seconda di quando tali difetti si manifestano:

- Difetti creatisi durante la fase di produzione delle celle fotovoltaiche;
- Difetti creatisi durante la fase di assemblaggio dei moduli fotovoltaici;
- Difetti creatisi durante la fase di trasporto ed installazione;
- Difetti creatisi a causa di agenti atmosferici successivi all'installazione.

I paragrafi successivi approfondiscono brevemente queste suddette tipologie di difetti (5).

1.3.1 Difetti creatisi durante la produzione delle celle

Durante il processo di realizzazione delle celle solari è possibile che si creino diverse tipologie di difetti.

1.3.1.1 Macchie scure

Uno di questi difetti consiste nella formazione di zone scure, tipicamente localizzate nella zona centrale della cella. Queste macchie scure, osservabili nelle immagini acquisite tramite tecnica EL, rappresentano zone di forma irregolare, più o meno estese, caratterizzate da bassi valori di intensità luminosa; esse sono, dunque, oggetto di una più scarsa produzione di corrente. Questo tipo di difetto è strettamente legato ad un errore commesso nella fase di produzione dei moduli detta *"firing*", ovvero il processo durante la quale vengono introdotte le celle all'interno di un forno ad una temperatura abbastanza elevata da attivare lo strato di nitruro di silicio, o ossido, depositato sulla parte posteriore della cella. Lo scopo dell'ossido è quello di proteggere lo strato di alluminio necessario per la conduzione e quello di aumentare la conducibilità della cella stessa. Nel momento in cui dovesse crearsi un gradiente di temperatura fra il bordo della cella e la sua parte centrale, l'ossido non verrà attivato omogeneamente sulla totalità della superficie e pertanto la cella non avrà più la capacità di garantire una generazione di corrente omogenea. A causa della quantità di calore ceduta in maniera disomogenea alla cella, varie zone della cella presenteranno differenze nella luminescenza. La Figura 1-8 mostra esempi di celle affette da macchie scure.



Figura 1-8: Esempio di celle affette da macchie scure sulla superficie

1.3.1.2 Chain pattern

I chain pattern sono difetti caratterizzati da piccole macchie scure che nel complessivo identificano un pattern tipicamente associabile ad una "impronta di scarpa". Anche in questo caso l'origine di questo fenomeno è associabile alla fase di firing del processo di produzione in cui il contatto tra la cella ed il nastro trasportatore all'interno del forno determina una distribuzione della temperatura disomogenea sulla superficie della cella stessa. Tale difetto non è visibile ad occhio nudo e non è particolarmente significativo in termini di rendimento della cella. La Figura 1-9 mostra esempi di celle affette da chain pattern.



Figura 1-9: Esempio di celle affette da chain pattern

1.3.1.3 Fingers difettosi

I *fingers* sono contatti elettrici in alluminio (Al) o rame (Cu) situati sulla superficie della cella solare in maniera perpendicolare ai busbars. Durante la fase di produzione delle celle, in particolare durante la fase di realizzazione dei finger, le eventuali anomalie nella procedura di deposito del materiale conduttivo sulla cella possono determinare la presenza di finger interrotti o addirittura mancanti. In prossimità dei finger difettosi, la zona di competenza risulta essere inattiva. Le aree inattive sono riconoscibili come sottili strisce di colore scuro perché aventi una bassa luminescenza. Tali difetti hanno un impatto negativo generalmente trascurabile sul rendimento della cella. La Figura 1-10 mostra esempi di celle aventi finger difettosi.



Figura 1-10: Esempio di celle aventi finger difettosi

1.3.2 Difetti creatisi durante la fabbricazione dei moduli

1.3.2.1 Fratture parallele ai busbar

Durante la fase di costruzione dei moduli fotovoltaici, in particolare durante il processo di saldatura dei busbar in fase di assemblaggio delle celle, quest' ultime sono sottoposte a sollecitazioni meccaniche che potrebbero danneggiarle creando fratture. Di particolare interesse sono soprattutto quelle che si sviluppano parallelamente ai busbar perché potenzialmente dannose. Esse sono in grado di portare porzioni di cella al completo isolamento elettrico inducendo un drastico crollo della produzione di energia. In Figura 1-11 viene riportato un esempio di cella affetta da questo difetto.



Figura 1-11: Esempio di celle soggette a fratture parallele ai busbar

1.3.2.2 Connessione inesistente o parziale del busbar con la cella

La non corretta connessione tra i busbar e la cella porta alla formazione di zone con più bassa luminescenza, dunque visibilmente più scure, che possono interessare totalmente o parzialmente l'area della cella (v. Figura 1-12). Tali zone non daranno contributo nella generazione di corrente e ciò comporterà un calo nella potenza della singola cella e perciò dell'intero modulo. Inoltre, le porzioni di cella correttamente collegate ai busbar, poiché sono responsabili del trasporto dell'intera corrente generata dalla cella, appariranno più luminose; ciò è dovuto al surriscaldamento provocato dal passaggio di una sovracorrente locale anomala.



Figura 1-12: Esempio di cella affetta da connessione inesistente (a sinistra) e parziale (a destra) tra il busbar e la cella stessa

1.3.3 Difetti creatisi durante la fase di trasporto ed installazione

I difetti più frequenti e dannosi delle celle fotovoltaiche sono quelli che compaiono durante le fasi di trasporto ed installazione dei moduli. L'origine di tali difetti è associabile all'inappropriato maneggiamento, da parte degli operatori, dei moduli che, calpestandoli o urtandoli contro ostacoli, possono sottoporli a sollecitazioni meccaniche elevate. Gli eventuali crack derivanti influiscono negativamente sulle prestazioni elettriche delle celle coinvolte, poiché possono determinare una discontinuità parziale o, nel peggiore dei casi, totale del flusso di corrente. L'estensione delle fratture e la loro posizione nella cella determinano la gravità dei danni. Tipicamente, singoli punti di frattura localizzati nella zona della cella compresa tra i due busbar non sono particolarmente significativi perché non comportano l'isolamento elettrico ma determinano un ridimensionamento del flusso di corrente solo parziale. Viceversa, le fratture localizzate ai bordi della cella, se di sufficiente ampiezza, possono compromettere intere aree della cella rendendole inattive, dunque elettricamente isolate. Conseguentemente, le perdite, in quest'ultimo caso, sono notevolmente maggiori rispetto al caso precedente. La Figura 1-13 e la Figura 1-14 riportano alcuni esempi di crack più o meno significativi.



Figura 1-13: Esempio di celle affette da crack poco significativi dovuti a stress meccanici



Figura 1-14: Esempio di celle affette da crack significativi dovuti a stress meccanici

1.3.4 Difetti creatisi in seguito ad agenti atmosferici

A seguito dell'installazione, durante il normale funzionamento dei moduli, fenomeni atmosferici, come vento e neve, possono comportare il danneggiamento dei moduli a causa dell'eccessivo carico distribuito sulla loro superfice. Lo stress meccanico che ne deriva crea punti di frattura soprattutto nelle celle situate nella parte centrale del modulo ovvero la zona dove le deformazioni meccaniche sono massime. Similmente, il fenomeno della grandine può portare invece alla formazione di crack causati dall'insorgere di un carico puntuale nelle zone della cella colpite. Tipicamente, la rottura è caratterizzata da più fratture ramificate in svariate direzioni a partire dal punto d'impatto. In alcuni casi, la forma dei crack dovuti ai fenomeni atmosferici può risultare molto simile a quella delle fratture creatisi nella fase di trasporto e installazione. La Figura 1-15 ne mostra un esempio.



Figura 1-15: Esempio di cella affetta da crack dovuto ad eventi atmosferici

1.4 Analisi dei fenomeni riscontrabili tramite test di elettroluminescenza

1.4.1 Snail trails

Il fenomeno delle *Snail Trails* o *Snail Tracks*, letteralmente "bave di lumaca", è un fenomeno di degradazione caratteristico del silicio cristallino dei moduli. Si tratta di un difetto di decolorazione che si manifesta sotto forma di piccole linee scure che assomigliano a una traccia di lumaca sul vetro frontale del modulo. La loro natura è dovuta alla presenza di nanoparticelle di argento, ossido di argento e carbonato di argento. L'argento che costituisce le bave di lumache proviene dall'EVA (etilene vinil acetato, comunemente chiamato *Materassina*), ovvero un composto elastico utilizzato nel processo di fabbricazione dei moduli a protezione delle celle (6). Durante la fase di produzione del modulo, impurezze di fosfato di argento potrebbero essere assorbite dall'EVA. Conseguentemente, le impurezze instaurano reazioni chimiche che portano alla formazione delle snail trails. La presenza di queste striature scure di nanoparticelle di argento potre da una diminuzione della potenza del modulo, anche fino al 9%, poiché le linee scure fanno da barriera al passaggio della radiazione solare che non può essere più assorbita dalle celle solari.

Attraverso l'imaging EL è possibile correlare il fenomeno di snail trails direttamente con il crack cellulare, come mostrato in Figura 1-16 (7).



Figura 1-16: Confronto tra due celle con snail trails (sopra) e senza difetti (sotto) tramite EL

Tipicamente, come mostrato in Figura 1-17, le snail trails si verificano lungo le posizioni di microcrack o ai margini della cella (8).



Figura 1-17: Immagine di un modulo affetto da snail trails confrontata con la rispettiva immagine EL

1.4.2 Nastri di interconnessione delle stringhe difettosi

Le celle solari dei moduli fotovoltaici in silicio cristallino convenzionali sono interconnesse in serie tramite dei nastri, noti come "*interconnect ribbons*", per ottenere una tensione totale più elevata. Il nastro è un conduttore di rame stagnato a caldo che unisce le singole celle e trasporta la corrente generata al sistema di distribuzione. Una serie di celle interconnesse è chiamata stringa. Le stringhe di celle sono tipicamente interconnesse in serie o talvolta in parallelo da nastri di interconnessione di stringhe (v. Figura 1-18). In moduli con interconnessioni convenzionali, a volte si riscontrano nastri di interconnessione di celle o stringhe indeboliti; ciò può causare disconnessioni. Soprattutto il cosiddetto "*ribbon kink*", ovvero il nodo del nastro tra le celle e il punto di incontro tra il nastro di interconnessione cellulare e quello di interconnessione di stringa sono inclini alla rottura a fatica.



Figura 1-18: Descrizione dei componenti di un modulo

Diverse potrebbero essere le cause di questo tipo di guasto. Solitamente, le disconnessioni sono strettamente legate ad una cattiva saldatura, durante il processo di fabbricazione del modulo fotovoltaico, della connessione tra il nastro di interconnessione delle celle e quello di interconnessione delle stringhe. Un'altra possibile causa è associabile a deformazioni meccaniche troppo intense durante la fabbricazione dei ribbon kink. Inoltre, una distanza troppo breve tra le celle favorisce negativamente la rottura del nastri. Lo stress fisico durante il trasporto del modulo fotovoltaico, il ciclo termico e/o gli hot spots causati dall'ombreggiamento parziale delle celle durante il normale funzionamento inducono, col passare del tempo, i nodi deboli a rompersi.



La rottura del nastro può essere rilevata tramite test EL. La Figura 1-19 mostra un esempio di come potrebbe apparire tale fenomeno in un'immagine EL (8).

Figura 1-19: Esempio di immagine EL di un modulo FV avente tre interconnessioni tra celle interrotte

1.4.3 Burn marks

Uno dei guasti più comuni dei moduli di silicio è associato a parti del modulo molto calde a causa del cedimento del legame di saldatura e/o della rottura del nastro oppure al riscaldamento localizzato dovuto all'applicazione di un flusso di corrente inverso o altri *hot-spot*.

I guasti al legame di saldatura e al nastro possono essere causati da fatica termica. L'aumento della resistenza e del riscaldamento associato al flusso di corrente che scorre lungo la congiunzione guasta può accelerare i cedimenti nei legami di saldatura. L'innalzamento della temperatura e dunque della resistenza può arrivare ad un livello abbastanza elevato da scolorire l'incapsulamento anteriore e/o quello posteriore. Tali guasti possono verificarsi in qualsiasi interconnessione metallo-semiconduttore o metallo-metallo, come all'interno di un nastro o altro conduttore metallico.

Un secondo caso di *burn mark* si verifica perché una cella o parte di essa viene sottoposta a polarizzazione inversa. A volte ciò accade perché parte del modulo è ombreggiato oppure a causa della disomogeneità del reticolo cristallino all'interno del modulo, come ad esempio per celle incrinate. In alcuni casi, il flusso di corrente inverso causa un riscaldamento che localizza ulteriormente il flusso stesso, determinando un effetto termico incontrollato e dunque la relativa bruciatura.

Tale difetto è spesso associato alla perdita di potenza. Tuttavia, se le interconnessioni elettriche utilizzate risultano essere ridondanti, un legame di saldatura guasto può avere un effetto negativo trascurabile sulla potenza. Nei casi in cui tutti i legami di saldatura di una cella si rompono, il flusso di corrente della rispettiva stringa risulta completamente bloccato. Se la corrente non può essere bypassata dal diodo di bypass, si crea un arco elettrico portando il sistema ad operare ad alta tensione. In questo caso, l'arco elettrico può causare un incendio.

I burn mark possono di solito essere identificati visivamente, ma tramite l'imaging EL il loro rilevamento, come mostrato in Figura 1-20, risulta essere più rapido e semplice (8).



Figura 1-20: Esempio di cella affetta da burn mark

1.4.4 PID

Gli impianti FV prevedono la connessione in serie tra i moduli per aumentare la tensione del sistema fino a valori di centinaia di Volt. Per problemi di sicurezza legati alle scariche elettriche, tutte le strutture metalliche dell'impianto devono disporre della messa a terra. A causa degli elevati valori di tensione tra le celle e la superficie del vetro frontale, la quale viene messa a terra attraverso il telaio, i portatori di carica presenti all'interno dei materiali utilizzati per la realizzazione della struttura, se l'isolamento tra la struttura del pannello e gli altri strati attivi non è ottimale, possono migrare attraverso la cornice dei moduli dando origine a perdite di corrente indesiderate. Questo fenomeno, noto come "*Potential Induced Degradation*" (PID), dà origine a una polarizzazione potenzialmente in grado di compromettere le performance elettriche dei moduli. Il processo PID può essere considerato un segno di invecchiamento poiché dipende dalla forza del campo elettrico, dalla temperatura, dall'umidità relativa, dal tempo e dai materiali del modulo fotovoltaico. Esso provoca una progressiva diminuzione dell'efficienza nel tempo. L'elevata umidità e la temperatura accelerano questo processo poiché favoriscono il passaggio della corrente cella-suolo.

In Figura 1-21 è visibile la modalità con cui in portatori di carica si muovono nel modulo FV e danno origine a perdite di corrente



Figura 1-21: Percorso anomalo dei portatori di carica nel modulo FV

Tramite l'imaging EL possiamo valutare anche la presenza di PID in moduli FV, non distinguibile ad occhio nudo. Le aree del modulo affette da PID risultano meno luminescenti, come mostrato nell'esempio in Figura 1-22 (8). In questo caso, la degradazione da PID è identificata in un primo momento con immagini EL riferite a 1/10 della corrente I_{SC} , prima di passare a un valore pieno di corrente.


Figura 1-22: Degradazione potenziale indotta (PID) di un modulo FV

La Figura 1-23 mostra un ingrandimento di una cella affetta da PID dopo un test di invecchiamento accelerato che ha prodotto il difetto. La macchia scura rappresenta il difetto originato da PID (9).



Figura 1-23: Cella priva di difetti a sinistra e stessa cella affetta da PID dopo essere stata sottoposta a un test di invecchiamento a destra

1.4.5 Diodi di bypass difettosi

Tipicamente, in un modulo fotovoltaico vengono integrati diodi di bypass in parallelo con un certo numero di celle solari. Questi diodi di bypass evitano la polarizzazione inversa di singole celle solari che altrimenti sarebbero sottoposte alla tensione totale delle celle non difettive o, ad esempio, non ombreggiate. Sottoporre una cella a una tensione superiore a quella progettata per la cella, potrebbe determinare hot-spot causando brunitura, bruciature o, nel peggiore dei casi, incendio. Solitamente vengono impiegati i diodi Schottky, i quali però sono molto suscettibili alle sollecitazioni meccaniche e alle scariche statiche ad alta tensione. Di conseguenza, possono verificarsi spesso casi in cui il diodo di bypass fallisce. Tramite l'imaging EL è possibile verificare se il flusso di corrente di una determinata stringa è stato interrotto a causa della presenza di diodi di bypass difettosi, come mostrato in Figura 1-24 (8), oppure di connessioni errate o malfunzionanti delle celle fotovoltaiche.



Figura 1-24: Esempio di modulo con diodi di bypass cortocircuitati

2 Automatizzazione della procedura di analisi di immagini ad elettroluminescenza da laboratorio

Nel seguente capitolo viene proposta una possibile procedura per il preprocessing di immagini ad elettroluminescenza di moduli fotovoltaici e per la loro suddivisione nelle singole celle in maniera tale da poterle classificare in seguito (v. capitolo 3) a seconda dei difetti presenti. Gli step principali della procedura vengono illustrati nel seguente flow chart (v. Figura 2-1).



Figura 2-1: Flow chart per immagini EL da laboratorio

2.1 Pre-processing

Inizialmente, sono state fornite immagini ad elettroluminescenza, ad elevata risoluzione, di dieci moduli fotovoltaici scattate in laboratorio tramite fotocamera da 14.2 Mpixel con sensore CCD e filtro infrarosso da 800 nm. La Figura 2-2 mostra alcuni esempi delle foto menzionate.



Figura 2-2: Foto dei moduli 2, 4 e 9

Per poter proseguire con la suddivisione nelle singole celle, è stato necessario correggere manualmente i parametri di luminosità e contrasto delle foto che presentavano una forte oscurità e che dunque non permettevano una chiara distinzione tra il pannello fotovoltaico e lo sfondo; un esempio è il modulo 2 (v. Figura 2-2).

Il non perfetto allineamento della camera con il centro del modulo ha determinato una visualizzazione inappropriata dell'oggetto. In ciascuna foto, infatti, i lati dei moduli non risultano essere paralleli ai bordi dell'immagine; ciò è indispensabile per la corretta suddivisione dei moduli in singole celle. Per correggere l'errore di prospettiva è stato utilizzato il software ShiftN. È un software gratuito che consente di ottimizzare e correggere rapidamente, facilmente e, soprattutto, automaticamente l'effetto "prospettiva storta" delle foto. Il programma esegue un processo di ottimizzazione che tenta di determinare la prospettiva, correggendo l'immagine in modo che le linee siano parallele tra loro. La Figura 2-3 mostra un esempio di prima e dopo.



Figura 2-3: Immagine EL del modulo 4 a sinistra e immagine EL del modulo 4 con prospettiva corretta a destra

La procedura di correzione della prospettiva è stata applicata manualmente un modulo alla volta ma senza dover selezionare i quattro angoli del pannello fotovoltaico in maniera manuale; potrebbe considerarsi dunque una procedura semiautomatica.

2.2 Suddivisione in singole celle

Una volta corretto luminosità, contrasto e prospettiva, è stato possibile procedere con la suddivisione del pannello fotovoltaico nelle singole celle che lo compongono. Tale procedura è stata completamente automatizzata tramite l'ausilio del software Matlab. Lo script, in allegato (v. 8.1), ha come output una cartella contenente tutte le immagini separate delle singole celle costituenti il rispettivo modulo avendo come input l'immagine con prospettiva corretta fornita dal programma ShiftN.

Per poter procedere con la suddivisione in singole celle, è stato prima necessario isolare il modulo fotovoltaico eliminando, dunque, lo sfondo. Una volta importata l'immagine, essa viene prima trasformata in scala di grigi e poi in immagine binaria; ad ogni pixel nero è associato lo 0 e ad ogni pixel bianco 1. Per migliorare il più possibile il riconoscimento dell'oggetto è stata utilizzata la funzione "imfill(binaryImage, 'holes')".

Con la funzione "bwareaopen (binaryImage, pixelConnessi)" sono stati eliminati eventuali pixel bianchi sullo sfondo. "pixelConnessi" è un parametro di input da fissare a seconda dei casi. Rappresenta la soglia di pixel bianchi connessi che si vogliono eliminare dallo sfondo per poter effettuare un corretto ritaglio del modulo. Per le immagini dei dieci moduli fotovoltaici fornite, è sufficiente un valore maggiore o uguale a 15.

Per poter concretizzare il ritaglio è stato necessario evidenziare i bordi del modulo. Di conseguenza, tramite l'utilizzo della funzione "find" sono state trovate le prime e le ultime righe e colonne contenenti pixel bianchi. Una volta noti i bordi è stata creata una nuova matrice, sulla base dell'immagine in scala di grigi, che se plottata risulta essere effettivamente l'immagine del solo modulo fotovoltaico, in scala di grigi, senza lo sfondo. La Figura 2-4 e la Figura 2-5 mostrano due esempi del risultato finale.



Figura 2-4: Immagine EL del modulo 2 con prospettiva corretta a sinistra e modulo 2 ritagliato a destra



Figura 2-5: Immagine EL del modulo 4 con prospettiva corretta a sinistra e modulo 4 ritagliato a destra

Noti il numero di celle per riga e il numero di celle per colonna di ogni modulo, è stato possibile creare una matrice contenente sottomatrici corrispondenti ad ogni singola cella del modulo. La suddivisione viene effettuata calcolando l'altezza e la larghezza, in pixel, di ogni sottomatrice nel seguente modo:

$$H_{cella} = \frac{H_{Totale}}{N_{celle \ per \ riga}} \qquad L_{cella} = \frac{L_{Totale}}{N_{celle \ per \ colonna}}$$

A causa della non idealità nella correzione della prospettiva (v. Figura 2-5), questa procedura di suddivisione geometrica ha portato a un non perfetto allineamento tra i bordi delle celle e il taglio effettivo. Alcuni dei risultati, non abbastanza adeguati, sono mostrati nella Figura 2-6.



Figura 2-6: Esempi di celle non correttamente ritagliate

La presenza di parti di altre celle nell'immagine relativa ad una specifica cella potrebbe falsificare i risultati che si otterrebbero dalla classificazione. Per migliorare il ritaglio delle singole celle è stata dunque implementata la stessa procedura utilizzata per il ritaglio del pannello andando però a settare il parametro "pixelConnessi" ad un valore, compreso tra 1500 e 5000 a seconda del modulo, molto più alto rispetto a quello utilizzato per il ritaglio dell'intero pannello. Tale valore è riconducibile al numero di pixel, connessi tra loro, che si vuole eliminare dallo sfondo; dunque, le porzioni di celle vicine a quella considerata per il ritaglio.

In molti dei casi, come mostrato nella Figura 2-7 e nella Figura 2-8, il ritaglio è risultato essere quasi ideale.



Figura 2-7: Prima e dopo il ritaglio corretto della cella nº 43 del modulo 4



Figura 2-8: Prima e dopo il ritaglio corretto della cella nº 11 del modulo 9

In altri casi, lo script non è stato in grado di eseguire nessun ritaglio, evidentemente perché le parti di celle vicine da eliminare erano costituite da un numero di pixel più alto rispetto a quello di "pixelConnessi"; dunque, si è proceduto nel settarlo ad un valore più alto per riuscire così da eliminare le porzioni di celle di non interesse. Incrementando tale valore è aumentato così il numero di celle ben ritagliate. Tuttavia, per valori superiori a 4300, in molte celle di quasi tutti i moduli sono state tagliate parti di cella rilevanti, come mostrato nella Figura 2-9, soprattutto per celle caratterizzate dalla presenza di difetti considerevoli, come mostrato nella Figura 2-10. Si è arrivati alla conclusione che il valore di 4300 è il compromesso ottimale per il ritaglio delle celle per tutti i dieci moduli fotovoltaici.



Figura 2-9: Prima e dopo il ritaglio non corretto della cella n ° 3 del modulo 9



Figura 2-10: Prima e dopo il ritaglio non corretto della cella n ° 34 del modulo 2

Si è preferito, ovviamente, scegliere le immagini originali piuttosto che quelle che avevano subito un ritaglio troppo significativo, dunque di dimensioni molto inferiori rispetto all'originale. In particolare, si è fissato il parametro "percentualeAreaTagliata" in maniera tale da mantenere l'immagine originale nel caso in cui l'operazione di ritaglio ne rimuova più del 14% della sua area. Per tutte quelle immagini che risultavano avere le dimensioni originali, dunque sia le immagini che non erano state ritagliate fin da subito per via di un valore, relativo al singolo caso, di "pixelConnessi" troppo basso e sia le immagini che sono state eccessivamente tagliate per via di un valore troppo alto, sono state scurite scalando ciascun pixel di un valore uguale a "valoreScurimento". Una volta applicata la sopra menzionata procedura di ritaglio, si è riscontrato un miglioramento nell'efficienza media del ritaglio delle singole celle utilizzando un valore di 30.

L'operazione di scurimento viene effettuata sulle immagini in scala di grigi, solitamente quelle con una luminosità media particolarmente elevata, tale per cui la conversione in immagine binaria darebbe come risultato un numero di pixel associati a 1 (bianco), relativi alla parte di immagine da eliminare, superiore alla soglia di "pixelConnessi" specificata, rendendo dunque inefficace l'operazione di ritaglio. Lo scurimento ha l'obiettivo di aumentare il numero di pixel che nella conversione in binario sarebbero associati a 0, riducendo di conseguenza i pixel bianchi ad un valore inferiore alla soglia sopra menzionata e permettendo pertanto un ritaglio efficace dell'immagine. Un'ulteriore soluzione sarebbe incrementare la soglia di "pixelConnessi", ma si ritornerebbe al caso, analizzato sopra, in cui viene eliminata erroneamente una porzione significativa della cella.

Una volta ottenute le singole celle separate tra loro di tutti i moduli, è stata applicata ad ogni immagine la funzione "histogram(cellImage, 'Normalization', 'probability')". In questo modo è stato associato ad ogni cella un istogramma, strumento utile per l'analisi della luminosità di un'immagine. L'istogramma, ovvero la rappresentazione grafica della distribuzione della scala dei grigi dei pixel dell'immagine, è formato da rettangoli adiacenti la cui altezza è calcolata come densità di frequenza, ossia la frequenza relativa di una data tonalità di grigio normalizzata sull'area totale (la somma delle ampiezze dei rettangoli corrisponde al 100% dell'immagine). La Figura 2-11 e la Figura 2-12 mostrano due esempi di istogrammi associati alle rispettive celle.

Il primo istogramma è riferito ad una cella priva di difetti e dunque caratterizzato da un solo picco nel diagramma orientato verso valori tendenti al bianco.



Figura 2-11: Istogramma relativo alla cella nº 2 del modulo 2

Il secondo istogramma riportato è riferito ad una cella con evidenti porzioni inattive dovute alla presenza di fratture. In questo caso è riportato un picco del diagramma molto vicino al valore 0, dunque associabile alla forte presenza del colore nero all'interno dell'immagine rappresentativo della disattivazione di porzioni di cella estese.



Figura 2-12: Istogramma relativo alla cella nº 11 del modulo 2

3 Automatizzazione della procedura di classificazione di immagini ad alta definizione di celle fotovoltaiche

La procedura di ritaglio dei moduli fotovoltaici tramite lo script ha reso possibile la loro suddivisione in 60 (10 x 6) o 96 (12 x 8) singole celle, a seconda dei casi. In molte delle celle sono state riscontrate varie tipologie di difetti. Questo capitolo mostra la metodologia utilizzata per classificare tali celle a seconda dei difetti presenti.

Il primo approccio utilizzato è stato improntato sull'associazione dei difetti alla tonalità di grigi presenti all'interno di ciascuna immagine. Ad ogni singola cella è stato associato il valore più alto all'interno della matrice identificativa dell'immagine, dunque il valore del pixel con la tonalità di grigio maggiormente tendente al bianco. È stato, in seguito, selezionato il più alto valore tra quelli rappresentativi di ogni cella, ovvero il massimo valore dell'intero modulo, per ottenere un riferimento comune rappresentativo della luminosità di ciascun modulo.

Inizialmente sono stati sommati tutti i valori di grigio dei pixel al di sotto di una certa soglia per ciascuna immagine EL relativa alle singole celle. Le somme relative ad ogni cella possono essere associabili alla "qualità di nero" presente nell'immagine. Sono stati ordinati tali valori in ordine decrescente in modo da cercare di ottenere una classifica delle celle fotovoltaiche dalla più scura, dunque teoricamente poco efficiente, alla più luminosa, dato che la presenza di difetti comporta un calo nella produzione di energia e conseguentemente una bassa luminescenza media. Si è visto che il valore di soglia ottimale per la classificazione è compreso tra il 5% e il 50% del valore di riferimento, ovvero il valore del pixel più luminoso, per un dato modulo.

Successivamente, è stato utilizzato un approccio basato sul confronto quantitativo dei singoli pixel. Tale procedura consiste nel conteggio dei pixel aventi

un valore al di sotto di una soglia, calcolata allo stesso modo del caso precedente. In entrambi i metodi si è scelto di pesare i valori utilizzati per effettuare la classificazione, nel primo caso la somma dei pixel neri e nel secondo il numero dei pixel neri al di sotto della soglia, in base alla grandezza dell'immagine della singola cella. In tal modo, nel caso in cui si dovesse verificare un errore di classificazione dovuto alla disomogeneità del ritaglio, il conteggio o la somma dei pixel neri risulterà proporzionale alle grandezze effettive delle immagini ritagliate.

La classificazione delle celle ottenuta ha raggiunto risultati molto simili alla precedente. Tuttavia, entrambe le procedure di classificazione, realizzate tramite lo script in Matlab in allegato (v. 8.2), non risultano soddisfacenti nell'identificazione delle diverse tipologie di difetti presenti all'interno delle celle fotovoltaiche. Tali procedure, infatti, realizzano una classificazione binaria (rotte-sane) delle celle che potrebbe non essere sufficiente per la completezza della diagnostica di un impianto fotovoltaico reale o di moduli singoli. Oltretutto, la mancata conoscenza a priori della soglia da utilizzare, la quale varia a seconda dell'approccio utilizzato e soprattutto delle caratteristiche del modulo, rende tali procedure non del tutto automatiche; è, infatti, necessario ricercare manualmente il valore ottimale delle soglie per ogni modulo in modo da ottenere una corretta suddivisione delle celle.

La Figura 3-1 mostra l'immagine EL del modulo 2 con la rispettiva mappa di calore, per una migliore visualizzazione, e la numerazione, utilizzata anche per il resto dei moduli, con la quale sono state identificate le celle.



Figura 3-1: Immagine EL del modulo 2 (a sinistra), mappa di calore del modulo 2 (al centro) e metodo di numerazione delle celle (a destra)

La Tabella 3-1 mostra invece il risultato del secondo metodo proposto, ovvero la classifica delle celle, dalla più danneggiata alla più sana, del modulo 2 in esempio, eseguita con una soglia pari a 12,3 ovvero il 10% del bianco massimo dell'immagine del modulo intero. Ad ogni cella è associato il corrispondente istogramma di frequenza della scala dei grigi relativo all'area percentuale, visto in precedenza.

Posizione nella classifica	N° cella	Immagine EL	Istogramma
1°	41		Diagramma delle frequenze
2°	27		0.08 Diagramma delle frequenze
3°	11		0.08 Diagramma delle frequenze

46

		r	l .
4°	26		Digramma delle frequenza 0.05 0.05 0.04 0.04 0.02 0.04 0.02 0.04 0.02 0.04 0.02 0.04 0.02 0.04 0.05 0.04 0.05 0.04 0.05 0.05 0.05
5°	38		0.08 Diagramma delle frequenze
6°	20		Diagramma della frequenza 0.07 0.06 0.05 0.05 0.04 0.02 0.01 0.02 0.01 0.02 0.01 0.02 0.01 0.02 0.01 0.02 0.01 0.02 0.02
7°	35		Digramma delle frequenze



Tabella 3-1: Classifica delle celle del modulo 2 realizzata tramite il metodo del conteggio dei pixel al di sotto di una soglia del 10% e i relativi istogrammi

Conseguentemente, per riuscire ad ottenere un'adeguata classificazione delle immagini delle celle fotovoltaiche, distinguendole in base alla tipologia di difetto presente, svincolata dalla variabilità inter- ed intra-operatore legata alla scelta delle soglie più adatte ai casi, si è optato per l'implementazione di un classificatore.

La classificazione delle singole celle fotovoltaiche per ciascun modulo è stata effettuata tramite la funzione di Matlab "trainImageCategoryClassifier" (v. 3.3). Si tratta di una funzione "wrapper", presente all'interno della *Statistics and Machine Learning Toolbox*TM, la quale, ricevendo in input l'insieme di immagini da classificare e l'insieme delle relative features, fornisce in output il classificatore allenato. Il funzionamento interno della suddetta funzione prevede l'utilizzo di una *macchina a vettori di supporto* (SVM, dall'inglese *Support-Vector Machines*) (v. 3.2.1). L'estrazione delle features dalle immagini delle celle è invece effettuata tramite la funzione di Matlab "bagOfFeatures" (v. 3.2.3), presente nella *Computer Vision Toolbox*TM, la quale internamente implementa l'algoritmo di estrazione SURF (*Speeded Up Robust Features*).

3.1 Machine learning

L'apprendimento automatico (*machine learning*) è una branca dell'intelligenza artificiale che, in ambito informatico, si occupa di realizzare sistemi intelligenti capaci di sintetizzare nuove conoscenze a partire da dati forniti in ingresso in maniera autonoma senza istruzioni esplicite. Questi sistemi sono addestrati attraverso l'utilizzo di algoritmi di apprendimento specifici per ogni determinato problema o compito. Tali algoritmi possono apprendere da un insieme di dati e fare delle predizioni su questi, costruendo in modo "induttivo", dunque deducendo un insieme di regole a partire dall'analisi di un insieme di esempi, un modello basato su dei campioni. L'obiettivo dell'apprendimento automatico è che una macchina sia in grado di generalizzare dalla propria esperienza. La macchina ha infatti il compito di costruire un modello probabilistico generale dello spazio delle occorrenze, in maniera tale da essere in grado di produrre previsioni sufficientemente accurate quando sottoposta a nuovi casi. L'apprendimento automatico viene impiegato in quei campi dell'informatica nei quali progettare e programmare algoritmi espliciti è impraticabile.

I compiti dell'apprendimento automatico vengono tipicamente classificati in tre ampie categorie, a seconda della natura del segnale utilizzato per l'apprendimento o del feedback disponibile al sistema di apprendimento. Queste categorie, anche dette *paradigmi*, sono:

- Apprendimento supervisionato: è il processo di addestramento di un modello "predittivo" in cui vengono forniti degli esempi di input e i rispettivi output desiderati e l'obiettivo è quello di estrarre una regola generale che associ l'input all'output corretto;
- *Apprendimento non supervisionato*: è il processo di addestramento di un modello "descrittivo" che ha lo scopo di identificare dei pattern negli input forniti, i quali non hanno nè una struttura definita nè output associati, al fine di riprodurli o prevederli;
- Apprendimento per rinforzo: in cui il modello interagisce con un ambiente dinamico nel quale cerca di raggiungere un obiettivo. A differenza degli altri due, si occupa di problemi di decisioni sequenziali, in cui l'azione da

compiere dipende dallo stato attuale del sistema e ne determina quello futuro.

Un'altra categorizzazione dei compiti dell'apprendimento automatico si rileva quando si considera l'output desiderato del sistema di apprendimento automatico.

- Nella *classificazione* gli output sono divisi in due o più classi e il sistema di apprendimento, tipicamente supervisionato, deve produrre un modello che riesca ad assegnare nuovi input ad una o più di queste;
- Nella *regressione* vengono analizzati una serie di dati che consistono in una variabile dipendente e una o più variabili indipendenti. Lo scopo è stimare un'eventuale relazione funzionale esistente tra la variabile dipendente e le variabili indipendenti. La variabile dipendente nell'equazione di regressione è una funzione delle variabili indipendenti più un termine d'errore. Quest'ultimo è una variabile casuale e rappresenta una variazione non controllabile e imprevedibile nella variabile dipendente. I parametri sono stimati in modo da descrivere al meglio i dati;
- Nel *clustering* un insieme di input viene diviso, sulla base di similarità strutturali, in sottogruppi ("*cluster*") di elementi tra loro omogenei. Diversamente da quanto accade per la classificazione, i gruppi non sono noti a priori, rendendolo tipicamente un apprendimento non supervisionato.

3.2 Classificazione

Nella classificazione, l'obiettivo è quello di utilizzare le caratteristiche di un oggetto per identificare a quale classe (o gruppo) appartiene. Una caratteristica, nota come "feature", è una proprietà individuale e misurabile o una caratteristica di un fenomeno osservato. La scelta di feature discriminanti, ad alto contenuto informativo e indipendenti fra loro, è un passo cruciale per ottenere un efficiente algoritmo. Il valore di una feature viene solitamente reso in forma numerica, dato algoritmi nell'apprendimento automatico richiedono che molti una rappresentazione numerica di oggetti, poiché tali rappresentazioni facilitano l'elaborazione. Ad esempio, nel riconoscimento ottico dei caratteri, una feature può consistere nel numero di pixel neri di un'immagine o il numero di buchi interni.

Ogni algoritmo di machine learning può essere applicato seguendo i seguenti passi:

1. *Raccolta dei dati*; prevede l'acquisizione del materiale di apprendimento che l'algoritmo impiegherà per generare conoscenza pronta all'uso. I dati avranno bisogno di essere combinati in un'unica origine, ovvero il "*dataset*", come un file di testo, un foglio di lavoro o un database.

2. *Definizione dei prototipi*; sulla base del dataset a disposizione, vengono definiti i prototipi ovvero il set di valori delle feature sottoforma di vettori numerici n-dimensionali che saranno utilizzati per rappresentare ciascuna classe.



Figura 3-2: Classi, prototipi e feature

3. Dimensionality reduction; l'insieme inizialmente grezzo dei vettori numerici n-dimensionali delle feature, chiamato "feature space", potrebbe essere ridondante e troppo vasto per essere gestito efficientemente. Di conseguenza, un tipico passo preliminare in molte applicazioni dell'apprendimento automatico consiste nell'utilizzo di tecniche di riduzione della dimensionalità. Occorre individuare quali sono le variabili rappresentative degli elementi eliminando quelle poco influenti per la classificazione, ovvero è necessario effettuare una "feature extraction". Questa ha lo scopo di identificare le caratteristiche degli elementi del dataset che sono importanti per il contesto di interesse. Ridurre ulteriormente la dimensionalità equivale a ridurre i tempi di esecuzione, diminuire la complessità del modello e semplificare il costo delle risorse richieste per descrivere un grande insieme di dati accuratamente. Per far ciò è possibile applicare due diverse tecniche:

• *Feature construction;* gli algoritmi di feature construction generano un set completamente nuovo di features a partire dal set originale. Questo tipo di

procedure sono di più difficile interpretazione perché le nuove features non corrispondono direttamente a quelle originali ma sono ottenute da combinazioni lineari o non lineari di esse.

 Feature selection; gli algoritmi di feature selection selezionano il numero minimo di features maggiormente significative e informative dal set iniziale di variabili, in modo da mantenere intatto il significato degli elementi.

4. *Costruzione del sistema*; consiste nel tuning dei parametri, nell'implementazione del modello e la scelta e l'applicazione del metodo definendo una regola di classificazione. In particolare, l'elemento viene assegnato alla classe i cui prototipi sono più vicini all'elemento stesso, basandosi su misure di similarità.

5. *Addestramento*; se il numero di elementi è sufficientemente grande si estrae dal data set il "*training set*", o insieme di addestramento; solitamente si utilizza il 70%. Il modello viene addestrato sulla base di questi dati utilizzando un metodo di apprendimento supervisionato. Il set di dati di addestramento è infatti costituito da coppie di un vettore di input e del corrispondente vettore di output, ovvero la classe di appartenenza. Una volta eseguito, l'algoritmo apprende quali caratteristiche discriminano gli elementi appartenenti alle differenti categorie.

6. *Verifica*; la verifica del classificatore addestrato viene effettuata ponendo in input i vettori del training set non etichettati con la rispettiva classe. Il classificatore, dunque, produce un risultato che viene confrontato con le reali classi. In base al risultato del confronto e all'algoritmo di apprendimento specifico utilizzato, i parametri del modello vengono adeguati.

7. Validazione; È necessario valutare le prestazioni del sistema rispetto a dati che non sono stati utilizzati per la costruzione. La restante parte del dataset che non fa parte del training set definisce il "test set", un set di dati utilizzato per fornire una valutazione imparziale di un modello finale che si adatta al training set. Per valutare le prestazioni del classificatore rispetto al test set, in particolare la sua accuratezza, è possibile fare riferimento alla "confusion matrix" (v. Figura 3-3). Questa matrice mette in relazione la classificazione "vera" con i risultati del classificatore costruito. Sulla diagonale principale si trovano le percentuali degli elementi classificati correttamente rispetto al numero degli elementi totali e nelle altre caselle ci sono i "falsi" ossia le percentuali riferite agli elementi classificati in modo errato.

		True classification				
		Class A	Class B	Class C		
Classifier	Class A					
result	Class B					
	Class C					

Figura 3-3: Confusion matrix

8. *Miglioramento del modello*: se è necessario ottenere prestazioni migliori, diviene necessario utilizzare strategie più avanzate per elevare le prestazioni del modello. Talvolta può essere necessario scegliere un altro tipo di modello.



Figura 3-4: Workflow di sviluppo di un sistema per classificazione

3.2.1 SVM

Il Support Vector Machine (SVM) è il più utilizzato algoritmo di apprendimento supervisionato, che può essere utilizzato sia per scopi di classificazione che di regressione. È popolare in applicazioni quali l'elaborazione del linguaggio naturale, il riconoscimento vocale e delle immagini e la computer vision.

La tecnica di apprendimento automatico utilizzata permette di istruire un sistema informatico a riconoscere il valore di output di un dato sistema, relativo a un input di cui non ha alcuna conoscenza pregressa, basandosi su una serie di esempi ideali di coppie input-output. Il modello SVM, in particolare, associa ad ogni coppia di esempio un punto di uno spazio n-dimensionale, cercando di identificare un *iperpiano*, o limite di decisione lineare, ottimale che massimizzi la distanza tra i punti appartenenti a classi di interesse, ovvero valori di output, distinte, come mostrato in Figura 3-5 (10).



Figura 3-5: Separazione spaziale dei punti appartenenti a due classi

L'iperpiano ottimale può essere definito come un prodotto scalare multidimensionale in forma compatta (11):

$$\vec{w} \cdot \vec{x} - b = 0$$

dove \vec{w} è il vettore di peso, \vec{x} è il vettore di caratteristiche di input e b è il bias.

In generale, un iperpiano di separazione, in n dimensioni, è una combinazione lineare di tutte le dimensioni uguagliate a 0:

$$b + w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_n \cdot x_n = 0$$

Considerando, per semplicità, un problema bidimensionale avremo:

$$b + w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 = 0$$

I punti che stanno sopra l'iperpiano, e che rappresentano una classe, soddisfano la condizione per cui l'equazione è maggiore di zero. Viceversa, qualsiasi punto che si trova sotto l'iperpiano, appartenente quindi alla seconda classe, soddisfa la condizione per cui l'equazione è minore di zero.

Volendo includere in queste condizioni anche i limiti dei margini delle classi è possibile regolare i coefficienti o i pesi w₁ e w₂ nella seguente forma:

$$b + w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 \ge 1$$
, per $y = +1$
 $b + w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 \le -1$, per $y = -1$

dove y è l'etichetta di classe che può assumere solamente valore + 1 o - 1.

I due risultati rappresentano i confini del margine visti in Figura 3-5. Se il vettore dei pesi è indicato da w e ||w|| è la norma di questo vettore (ossia la sua lunghezza), allora la dimensione del margine massimo sarà:

$$\frac{1}{\|w\|} + \frac{1}{\|w\|} = \frac{2}{\|w\|}$$

Ciò significa che minimizzando il vettore peso w si riesce a massimizzare il margine che determina l'iperpiano ottimale. Gli elementi delle varie classi che hanno la minore distanza dal piano, ovvero il margine w, sono quelli che presentano maggiore criticità nell'identificazione e vengono definiti "*support vectors*". Dunque, maggiore è il margine, maggiore sarà l'accuratezza della SVM. Una volta definito lo spazio di classificazione ed il piano di separazione tra le classi, la SVM cerca di mappare i nuovi elementi ottenuti in input all'interno dello spazio, ottenendo di conseguenza i valori di output relativi agli stessi.

Il modello SVM è normalmente preposto ad una classificazione di tipo binario, ovvero con sole due classi a cui associare gli elementi, tuttavia è possibile adattarlo ad un modello multiclasse. Nello specifico, il problema di classificazione multiclasse per un numero k di classi viene ricondotto a un determinato numero di classificazioni binarie, a seconda della tecnica adottata. La Figura 3-6 mostra un esempio di spazio con k = 3.



Figura 3-6: Rappresentazione nello spazio di tre classi

Esistono due approcci maggiormente utilizzati (12):

1. *One-vs-One (OvO)*: consiste nel prendere in considerazione coppie di classi, di volta in volta operando la ricerca del piano di separazione come descritto sopra ed ignorando tutte le altre classi. In questo caso il classificatore utilizza $\frac{k(k-1)}{2}$ SVM. La Figura 3-7 mostra come vengono separate le coppie di classi indipendentemente dalle altre presenti nello spazio.



Figura 3-7: Rappresentazione di multi-separazioni binarie secondo One-to-One

 One-vs-Rest (OvR) o One-vs-All (OvA): consiste nell'utilizzo di k SVM, ciascuna corrispondente ad un differente classe, identificando un piano che separi la classe di interesse da tutte le restanti (v. Figura 3-8). In questo caso ogni SVM si occupa dell'associazione dei nuovi elementi in input alla propria classe di riferimento.



Figura 3-8: Rappresentazione di multi-separazioni binarie secondo One-to-Rest

3.2.2 Metodo Kernel

Nel machine learning, il metodo Kernel indica una classe di algoritmi per l'identificazione di relazioni tra gli elementi di un insieme di dati, il cui utilizzo principale è associato alle SVM. Nello specifico, il metodo Kernel opera tramite le cosiddette funzioni kernel, ovvero delle funzioni di similarità che permettono di separare i dati ricevuti in input, in questo contesto i vettori di features, tra di essi.

Per poter effettuare una separazione lineare tra i vettori, i quali possono essere rappresentati come punti di uno spazio, la funzione kernel rimappa questi ultimi in uno spazio con dimensioni superiori a quello di partenza ("*higher-dimensional space*"), senza però calcolare esplicitamente le coordinate di ogni singolo punto nello spazio, ma piuttosto calcolando il prodotto scalare tra le immagini di tutte le copie di dati nello spazio funzione. Ogni algoritmo per dati vettoriali che può essere espresso in termini del prodotto scalare fra vettori può essere implicitamente eseguito nello spazio delle feature associato al kernel, rimpiazzando i prodotti interni con valutazioni del kernel (13). Questa operazione, denominata "Kernel

trick", risulta molto meno onerosa dal punto di vista computazionale e contribuisce all'aumento dell'efficienza degli algoritmi SVM rispetto ad altri.

Il metodo Kernel consente di modellare modelli non lineari di dimensioni superiori. Ad esempio, ipotizziamo di dover classificare le due classi (punti gialli e punti blu) del set di dati visibile nello spazio nella Figura 3-9 (14).



Figura 3-9: Visualizzazione spaziale di due classi non separabili linearmente

Chiaramente non è possibile separare linearmente le due classi. Tuttavia, i vettori sono molto segregati, ma per poterli separare è necessario trovare uno spazio dimensionale superiore. Ci sono molti spazi dimensionali superiori in cui questi punti sono separabili linearmente. Un esempio potrebbe essere uno spazio tridimensionale dato dall'aggiunta di una terza dimensione $z = x^2 + y^2$. La Figura 3-10 mostra i punti tracciati nello spazio trasformato insieme all'iperpiano che separa le due classi e come appare lo stesso iperpiano nello spazio 2D originale di input, ovvero un cerchio.



Figura 3-10: Iperpiano visualizzato nello spazio trasformato (a sinistra) e nello spazio originale (a destra)

Il modo con la quale sono stati classificare i dati non lineari di esempio, mappando dunque lo spazio originale a una dimensione tridimensionale, è quello che viene definito metodo Kernel.

Gli algoritmi SVM utilizzano un insieme di funzioni matematiche definite come *funzioni kernel*. Lo scopo è di prendere i dati come input e trasformarli nella forma richiesta qualora non sia possibile determinare un iperpiano linearmente separabile, come avviene nella maggior parte dei casi.

In generale, il Kernel può essere definito come:

$$K(x, y) = \langle f(x), f(y) \rangle$$

dove K è la funzione kernel, x e y sono i vettori di input n-dimensionali, f è usato per mappare l'input dallo spazio n dimensionale a quello m dimensionale, con m > n, e < x, y > indica il prodotto scalare.

Applicare la funzione Kernel all'esempio visto prima consiste nel calcolare il prodotto scalare per la terza dimensione (z):

$$x \cdot y = x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2 + z_1 \cdot z_2$$
$$x \cdot y = x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2 + (x_1^2 + y_1^2) \cdot (x_2^2 + y_2^2)$$

Normalmente, il kernel è lineare e si ottiene un classificatore lineare. Tuttavia, usando un kernel non lineare è possibile ottenere un classificatore non lineare senza trasformare completamente i dati, modificando quindi solo il prodotto scalare a quello dello spazio voluto; in questo modo l'SVM troverà il miglior iperpiano.

A seconda della natura del problema, è possibile che un kernel sia migliore di altri. Esistono diversi tipi di funzioni kernel (15), le più comuni sono:

- 1. Linear Kernel (v. 3.3.1)
- 2. Gaussian Kernel (v. 3.3.2)
- 3. Polynomial Kernel (v. 3.3.4)
- 4. Exponential Kernel
- 5. Laplacian Kernel
- 6. ANOVA Kernel
- 7. Hyperbolic Tangent (Sigmoid) Kernel

3.2.3 Estrazione delle features

L'oggetto Matlab contenente le features delle immagini delle celle che vengono fornite in input al classificatore SVM, è generato dalla funzione "bagOfFeatures". Quest'ultima implementa al suo interno sia l'identificazione dei punti di interesse dell'immagine sia l'estrazione delle features in quei punti.

I punti di interesse, ovvero i punti teoricamente più rilevanti nel fornire informazioni utili per descrivere numericamente le caratteristiche principali di un'immagine, possono essere identificati mediante due approcci: "SURF Detector" e "Grid". L'estrazione delle features è effettuata invece tramite l'algoritmo SURF, il cui obiettivo è fornire una descrizione univoca delle caratteristiche di un'immagine, ad esempio calcolando la distribuzione di intensità luminosa dei pixel intorno al punto d'interesse. In questo modo, ogni feature ha una valenza locale, per cui è necessario ottenere una descrizione per ogni punto di interesse identificato precedentemente.

3.3 Implementazione in Matlab

Lo script in allegato (v. 8.3) che implementa gli algoritmi descritti precedentemente, prevede la preparazione di una cartella al cui interno sono organizzate in classi le immagini delle singole celle ritagliate. Le classi fanno

riferimento alle tipologie di difetti maggiormente riscontrate nei moduli analizzati. Fornendo il percorso della suddetta cartella alla funzione di Matlab "imageDatastore" è stato possibile ottenere un oggetto contenente l'insieme delle immagini delle celle. Tramite opportuni parametri, la funzione si occupa di leggere ricorsivamente le sottocartelle contenute nella cartella di input e di associare alle collezioni di immagini lette una "label" derivante dal nome della sottocartella stessa. "imageDatastore" è una funzione ideale per la lettura di un elevato numero di immagini, come nel caso della classificazione, poiché internamente gestisce in maniera efficiente la RAM, leggendo progressivamente solo la quantità di immagini che, al momento dell'esecuzione, possono essere effettivamente caricate in memoria. All'oggetto ottenuto è stata applicata la funzione "splitEachLabel", la quale permette di dividere randomicamente le immagini delle varie classi nei due insiemi training set e test set, che serviranno rispettivamente ad allenare ed a testare il classificatore. Per le prove si è scelto di suddividere il dataset in 70% e 30% rispettivamente. In particolare, dalle immagini del training set sono state estratte le features tramite la funzione "bagOfFeatures" come indicato in precedenza. Il training set e l'oggetto contenente le features sono stati forniti in input alla funzione "trainImageCategoryClassifier" ottenendo così il classificatore. Quest'ultimo è infine valutato tramite l'utilizzo della funzione "evaluate", che ha l'obiettivo di calcolare la matrice di confusione, basandosi sul test set precedentemente ottenuto.

Per l'implementazione delle prove effettuate, per ottenere un classificatore adeguato alla classificazione di immagini di celle fotovoltaiche a seconda dei difetti, si è scelto di utilizzare come metodo per l'identificazione dei punti più rilevanti nelle immagini, dai quali poi estrarre le feature, il cosiddetto "Grid". Quest'ultimo consiste nella suddivisione dell'immagine da elaborare tramite una griglia equispaziata, le cui intersezioni sono i punti di interesse. È possibile specificare un parametro aggiuntivo per definire le distanze tra le righe e colonne della griglia. Si è scelto di utilizzare il valore di default [8 8], in quanto si è visto che dimezzare le distanze non ha contribuito nell'incremento dell'accuratezza del classificatore. La seconda alternativa "SURF Detector" è stata scartata, poiché, nel caso in analisi, non ha permesso di individuare un numero di punti sufficienti per cui l'algoritmo potesse funzionare correttamente.

Per quanto riguarda il metodo kernel, non avendo nessuna informazione apriori sul tipo di feature delle immagini non è stato possibile ritenere quale fosse il giusto metodo kernel da utilizzare per questa applicazione. Le prove, dunque, sono state effettuate specificando una tra le tre possibili opzioni fornite da Matlab: "Lineare" (v. 3.3.1), "Gaussiana o Radial Basis Function (RBF)" (v. 3.3.2 e 3.3.3) e "Polinomiale" (v. 3.3.4).

Nei paragrafi successivi vengono riportate le prove più significative eseguite in Matlab tramite lo script in allegato (v. 8.4). Esse utilizzano come approccio per la classificazione multiclasse sia "One-to-Rest" sia "One-to-One". Non vengono riportati i risultati delle prove basati su altri approcci disponibili in Matlab ('binarycomplete', 'denserandom', 'ordinal', 'sparserandom', 'ternaryc omplete'), poiché le accuratezze dei classificatori ottenuti non hanno raggiunto livelli soddisfacenti.

3.3.1 Prove con SVM-OvR-Lineare

Il kernel lineare è la funzione kernel più semplice. Esso consiste nel prodotto interno $\langle x_i, x_k \rangle$ più una costante opzionale *c*:

$$G(x_j, x_k) = x_j^T x_k + c$$

Esso è l'elemento (j, k) della *matrice Gram*, dove $x_j e x_k$ sono vettori ndimensionali che rappresentano le osservazioni j e k di uno spazio vettoriale X. L'algoritmo, dopo aver creato tale matrice, sostituisce ogni suo elemento col rispettivo prodotto scalare delle osservazioni; operazione sulla quale si basa il "kernel trick". Il kernel è una misura di similarità decrescente all'aumentare della distanza delle feature nello spazio X. Se $G(x_j, x_k)$ è "grande", allora $x_j e x_k$ sono "simili"; ad esempio, in questo contesto, due vettori di feature sono simili quando sono "allineati", ovvero quando il coseno dell'angolo sotteso è 1.

3.3.1.1 Prova 1

Sono state suddivise le singole celle dei primi 10 moduli (710 immagini) in tre classi:

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi imperfezioni nel materiale e/o macchie scure (v. 1.3.1.1)
- C. Celle aventi microcracking (v. Figura 1-13) e/o crack (v. Figura 1-14)

Nella Tabella 3-11 vengono illustrati alcuni esempi di immagini EL delle singole celle fotovoltaiche utilizzate per la creazione di ciascuna classe.

Il classificatore, ottenuto dopo 47 iterazioni (~7.98 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale dell'81%. La Tabella 3-2 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С
A	0.90	0.06	0.03
В	0.12	0.80	0.08
С	0.19	0.07	0.73

Tabella 3-2: Matrice di confusione della prova 1

I risultati ottenuti da questa prova sono accettabili, ma si è scelto di cercare di trovare soluzioni alternative che prevedessero una divisione in classi più ampia, data la presenza di molteplici tipologie di difetti differenti. Per far ciò è stato necessario ampliare il dataset con immagini di altri moduli, altrimenti non ci sarebbe stato un sufficiente numero di immagini all'interno di ciascuna classe di input necessario per la corretta creazione di un training set adeguato alla classificazione.

3.3.1.2 Prova 2

Sono state suddivise le singole celle dei primi 10 moduli con l'aggiunta di altri moduli 22 moduli (2220 immagini) in sei classi:

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi imperfezioni nel materiale
- C. Celle aventi una luminosità variabile (v. 1.3.2.2)
- D. Celle aventi macchie scure
- E. Celle aventi microcracking e/o finger interrotti (v. 1.3.1.3)
- F. Celle aventi crack

Il classificatore, ottenuto dopo 19 iterazioni (~2.31 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale del 77%. La Tabella 3-3 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С	D	Е	F
А	0.94	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00
В	0.03	0.78	0.03	0.05	0.09	0.02
С	0.00	0.14	0.79	0.00	0.00	0.07
D	0.00	0.00	0.00	0.88	0.09	0.03
E	0.12	0.19	0.02	0.09	0.53	0.05
F	0.01	0.10	0.01	0.10	0.04	0.73

Tabella 3-3: Matrice di confusione della prova 2

L'accuratezza specifica della classe E non è stata ritenuta accettabile.

3.3.1.3 Prova 3

È stato utilizzato lo stesso dataset della prova precedente, ma suddiviso in sei classi diverse rispetto a prima, in maniera tale da rimediare all'errore di classificazione commesso nella prova precedente.

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi imperfezioni nel materiale e/o microcracking
- C. Celle aventi luminosità variabile
- D. Celle aventi macchie scure
- E. Celle aventi finger interrotti
- F. Celle aventi crack

Il classificatore, ottenuto dopo 44 iterazioni (~2.24 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale dell'83%. La Tabella 3-4 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С	D	Е	F
А	0.81	0.03	0.06	0.02	0.07	0.02
В	0.06	0.71	0.05	0.03	0.10	0.05
С	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
D	0.00	0.03	0.03	0.91	0.00	0.03
E	0.02	0.02	0.01	0.02	0.89	0.03
F	0.03	0.08	0.01	0.04	0.16	0.68

Tabella 3-4: Matrice di confusione della prova 3

Nonostante la classe F risulta avere un'accuratezza inferiore al 70%, l'accuratezza globale è ottimale. Si è ritenuto necessario però modificare le classi per tener conto di difetti associabili a classi a sé stante.

3.3.1.4 Prova 4

È stato utilizzato lo stesso dataset della prova precedente, ma è stata aggiunta un ulteriore classe.

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi imperfezioni nel materiale e/o microcracking
- C. Celle aventi luminosità variabile
- D. Celle aventi macchie scure
- E. Celle aventi finger interrotti
- F. Celle aventi crack
- G. Celle spente

Il classificatore, ottenuto dopo 30 iterazioni (~0.40 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale del 73%. La Tabella 3-5 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С	D	Е	F	G
А	0.72	0.05	0.19	0.00	0.04	0.00	0.00
В	0.03	0.60	0.24	0.04	0.10	0.00	0.00
С	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D	0.00	0.00	0.06	0.85	0.09	0.00	0.00
Е	0.00	0.01	0.13	0.00	0.83	0.02	0.00
F	0.01	0.05	0.19	0.03	0.12	0.60	0.00
G	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50

Tabella 3-5: Matrice di confusione della prova 4

L'accuratezza specifica della classe G non è stata ritenuta accettabile.

3.3.1.5 Prova 5

È stato utilizzato lo stesso dataset della prova precedente, ma sono state modificate le classi per cercare di trovare un compromesso tra l'accuratezza globale, quella specifica di ciascuna classe e una opportuna suddivisione in classi.

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile
- C. Celle aventi macchie scure
- D. Celle aventi finger interrotti
- E. Celle aventi crack
- F. Celle spente

Il classificatore, ottenuto dopo 35 iterazioni (~0.24 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale dell'84%. La Tabella 3-6 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С	D	Е	F
А	0.83	0.05	0.01	0.12	0.00	0.00
В	0.04	0.75	0.06	0.13	0.02	0.00
С	0.00	0.00	0.82	0.09	0.09	0.00
D	0.01	0.02	0.01	0.96	0.00	0.00
E	0.01	0.12	0.08	0.13	0.67	0.00
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabella 3-6: Matrice di confusione della prova 5

3.3.1.6 Prova 6

È stato utilizzato lo stesso dataset della prova precedente, ma sono state modificate le classi cercando di dare maggior rilievo alla classificazione delle celle aventi microcracking di vario tipo.

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi imperfezioni nel materiale e/o microcracking singoli
- C. Celle aventi macchie scure
- D. Celle aventi finger interrotti
- E. Celle aventi microcracking multipli
- F. Celle aventi crack
- G. Celle spente

Il classificatore, ottenuto dopo 35 iterazioni (~0.26 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale del 71%. La Tabella 3-7 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С	D	Е	F	G
А	0.75	0.06	0.07	0.09	0.01	0.02	0.00
В	0.02	0.78	0.06	0.11	0.02	0.01	0.00
С	0.00	0.00	0.82	0.18	0.00	0.00	0.00
D	0.00	0.01	0.07	0.91	0.01	0.00	0.00
Е	0.17	0.33	0.14	0.19	0.11	0.06	0.00
F	0.00	0.15	0.06	0.14	0.04	0.60	0.00
G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabella 3-7: Matrice di confusione della prova 6

I risultati di questa prova non sono soddisfacenti, ma evidenziano la difficoltà nella creazione di un classificatore in grado di riconoscere celle aventi microcracking. Ciò è probabilmente dovuto alla vasta diversificazione nelle caratteristiche di tali immagini per via della causalità e imprevedibilità con la quale il difetto in questione può manifestarsi all'interno delle celle.

3.3.2 Prova con SVM-OvR-RBF

Il Radial Basis Function (RBF) è un kernel gaussiano utilizzato quando non vi è alcuna conoscenza preliminare dei dati. Il criterio sulla quale esso si basa è:

$$G(x_j, x_k) = e^{(-\gamma ||x_j - x_k||^2)}$$
$$dove \gamma = \frac{1}{2\sigma^2}$$
Il parametro regolabile σ gioca un ruolo importante nelle prestazioni del kernel. Se sovrastimato, l'esponenziale si comporterà in modo quasi lineare e la proiezione di dimensione superiore inizierà a perdere il suo potere non lineare. D'altra parte, se sottostimato, la funzione mancherà di regolarizzazione e il confine decisionale sarà altamente sensibile al rumore nei dati di addestramento. In Matlab, tale valore è imposto uguale a 1.

In questo caso, la misura di somiglianza è legata a $||x_j - x_k||^2$ ovvero la distanza euclidea al quadrato tra i due vettori di feature considerati nella matrice Gram.

3.3.2.1 Prova 7

È stato utilizzato lo stesso dataset della prova precedente e le stesse classi utilizzate per la prova 5, ovvero la suddivisione in classi migliore trovata.

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile
- C. Celle aventi macchie scure
- D. Celle aventi finger interrotti
- E. Celle aventi crack
- F. Celle spente

Il classificatore, ottenuto dopo 27 iterazioni (~0.24 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale del 76%. La Tabella 3-8 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С	D	Е	F
А	0.89	0.02	0.03	0.06	0.00	0.00
В	0.05	0.71	0.08	0.14	0.02	0.00
С	0.00	0.00	0.85	0.15	0.00	0.00
D	0.02	0.03	0.04	0.89	0.01	0.00

Е	0.01	0.06	0.10	0.09	0.73	0.00
F	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50

1 abella 3-8: Matrice di confusione della prova

L'accuratezza specifica della classe F non è stata ritenuta accettabile. Si è dunque ritenuto opportuno eseguire la medesima prova ma con un diverso approccio di classificazione SVM.

3.3.3 Prova con SVM-OvO-RBF

3.3.3.1 Prova 8

È stato utilizzato lo stesso dataset della prova precedente e le stesse classi utilizzate per la prova 5.

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi mperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile
- C. Celle aventi macchie scure
- D. Celle aventi finger interrotti
- E. Celle aventi crack
- F. Celle spente

Il classificatore, ottenuto dopo 35 iterazioni (~0.24 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale del 77%. La Tabella 3-9 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С	D	Е	F
A	0.87	0.03	0.00	0.10	0.00	0.00
В	0.06	0.78	0.03	0.11	0.02	0.00
С	0.00	0.00	0.82	0.09	0.09	0.00

D	0.02	0.02	0.00	0.94	0.01	0.00
Е	0.01	0.12	0.05	0.10	0.72	0.00
F	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50

Tabella 3-9: Matrice di confusione della prova 8

L'accuratezza specifica della classe F non è stata migliorata. Tale prova conferma l'inadeguatezza nell'utilizzo di un Kernel di tipo gaussiano per il dataset utilizzato.

3.3.4 Prova con SVM-OvR-Polinomiale

Il kernel polinomiale è un kernel non stazionario che utilizza come criterio per determinare la somiglianza quello riportato in (3).

$$G(x_j, x_k) = (a \cdot x_j^T x_k + c)^q$$

I parametri regolabili sono la pendenza "a", il termine costante "c" e il grado polinomiale "q". In Matlab "a" e "c" sono fissati a 1, ovvero i valori più comunemente utilizzato, mentre è possibile scegliere il grado del polinomio.

3.3.4.1 Prova 9

È stato utilizzato lo stesso dataset della prova precedente e le stesse classi utilizzate per la prova 5.

- A. Celle prive di difetti
- B. Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile
- C. Celle aventi macchie scure
- D. Celle aventi finger interrotti
- E. Celle aventi crack
- F. Celle spente

Il classificatore, ottenuto dopo 30 iterazioni (~0.25 secondi/iterazione), ha raggiunto un'accuratezza globale dell'84%. La Tabella 3-10 riporta la rispettiva matrice di confusione.

	А	В	С	D	Е	F
А	0.84	0.03	0.01	0.12	0.00	0.00
В	0.07	0.76	0.04	0.10	0.03	0.00
С	0.00	0.00	0.85	0.12	0.03	0.00
D	0.01	0.02	0.07	0.89	0.01	0.00
Е	0.00	0.15	0.04	0.09	0.72	0.00
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabella 3-10: Matrice di confusione della prova 9

Si è ritenuto che l'accuratezza globale, le singole accuratezze delle classi e la suddivisione in classi di tale prova, eseguita con il polinomio di grado 3, sono ottimali e le migliori ottenute tra tutte le prove effettuate. Si è visto che risultati molto simili sono stati ottenuti scegliendo polinomi di grado 4, 5 e 6. Viceversa, utilizzando polinomi di grado 2, 7, 8 e 9 l'efficienza dei classificatori è notevolmente diminuita ($60 \div 70\%$).

Nella Tabella 3-11 vengono riportati alcuni esempi di immagini EL di celle fotovoltaiche, selezionate dal dataset, che sono state utilizzate per definire le classi con la quale sono stati addestrati i classificatori delle prove sopracitate. Vengono, inoltre, riportati alcuni dei risultati ottenuti dalla classificazione della prova migliore, ovvero la "prova 9". In particolare, sono stati evidenziati i casi in cui tale classificatore ha correttamente etichettato le varie immagini EL con le rispettive classi.

Esempi di immagini EL di celle FV	Caratteristica principale	Classe assegnata dal classificatore	Esito
	Celle prive di difetti	A_Celle prive di difetti	
	Imperfezioni del materiale nel monocristallino o visibilità dei grani nel policristallino	B_Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile	
	Microcracking	B_Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile	
	Luminosità variabile	B_Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile	

Macchie scure	C_Celle aventi macchie scure	0
Finger interrotti	D_Celle aventi finger interrotti	
Crack	E_Celle aventi crack	>
Spente	F_Celle spente	 Image: A start of the start of

Tabella 3-11: Esempi di esiti positivi della classificazione tramite SVM della "prova 9"

La Tabella 3-12 mostra invece alcuni dei casi in cui il classificatore non assegna la corretta classe di appartenenza a celle fotovoltaiche in particolari condizioni e le probabili cause dei rispettivi errori di classificazione.

Esempi di immagini EL di celle FV	Caratteristica principale	Classe assegnata dal classificatore	Esito	Possibili cause d'errore
	Crack	C_Celle aventi macchie scure	\mathbf{X}	La macchia scura ha un peso maggiore nell'estrazione di feature rispetto a piccole porzioni di cella inattive.
A CONTRACT	Crack	B_Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile	8	La cella presenta una frattura localizzata in un angolo, dunque facilmente confondibile con il tipico ritaglio di celle monocristalline; in questo caso la frattura non viene identificata come tale.
	Macchie scure	D_Celle aventi finger interrotti	×	I finger interrotti sono più facilmente riconoscibili rispetto alle macchie scure.
	Macchie scure	E_Celle aventi crack	8	La cella presenta una notevole macchia scura tale per cui l'intensità dei pixel è paragonabile a quella delle celle affette da fratture determinanti l'inattività di porzioni di cella dunque caratterizzate da zone di colore nero
	Microcracking	A_Celle prive di difetti	×	Il microcracking è localizzato in modo tale da confondersi con lo sfondo nero.

Imperfezioni nel materiale	D_Celle aventi finger interrotti	8	La cella non è stata perfettamente ritagliata; il bordo della cella sottostante sembra raffigurare tre finger interrotti perfettamente allineati.
-------------------------------	-------------------------------------	---	---

Tabella 3-12: Esempi di esiti negativi della classificazione tramite SVM della "prova 9"

3.4 Overfitting

I classificatori creati nelle prove precedentemente descritte sono stati realizzati sulla base di un dataset di immagini non perfettamente ottimali. In generale, nei casi di classificazione di immagini, disporre di un numero elevato di immagini, tipicamente maggiore di 10000, permette di ottenere classificatori ottimali. In questo modo è possibile suddividere più facilmente le immagini in maniera tale da ottenere classi, ovvero la tipologia del difetto, costituite da un numero simile di immagini. In questa applicazione, invece, il numero di immagini per classe è risultato essere molto variabile. Ad esempio, la classe "F_Celle spente" è stata realizzata introducendo in input solo una decina di immagini; un numero di immagini decisamente inferiore alle diverse centinaia di immagini delle classi "A Celle prive di difetti" e "E Celle aventi crack". Tale problema è dovuto alla frequenza con la quale i diversi difetti affliggono le celle; è certamente più comune che un modulo fotovoltaico abbia celle prive di difetti piuttosto che celle completamente spente poiché la loro presenza è meno probabile. Il dataset utilizzato, composto da sole 2220 immagini estratte da 32 moduli, ha probabilmente incrementato il problema noto come overfitting.

L'overfitting, adattamento eccessivo o sovradattamento, subentra quando un modello statistico si adatta ai dati osservati perché ha un numero eccessivo di parametri rispetto al numero di osservazioni. Solitamente, nell'apprendimento automatico, l'obiettivo è quello di ottenere un algoritmo allenato che riesca a raggiungere uno stato in cui sia in grado di predire gli output per tutti gli altri esempi che ancora non ha visionato, cioè si assume che il modello di apprendimento sia in grado di *generalizzare*. Tuttavia, soprattutto nei casi in cui l'apprendimento è stato effettuato troppo a lungo o dove c'era uno scarso numero di esempi di allenamento, il modello potrebbe adattarsi a feature specifiche del solo training set, ma che non

hanno riscontro nel resto dei casi. Dunque, in presenza di overfitting, le prestazioni, cioè la capacità di adattarsi e prevedere, sui dati di allenamento aumenteranno, mentre le prestazioni sui dati non ancora visionati saranno peggiori.

Il classificatore ottenuto, dunque, è stato in seguito ritestato ma su campioni estranei al dataset di immagini utilizzato per crearlo, ovvero immagini EL di celle appartenenti a moduli di un impianto reale (v. 5.7). Apparentemente, il problema dell'overfitting non sembra aver avuto un peso decisivo per la classificazione di tali immagini.

4 Correlazione tra le immagini ad elettroluminescenza e curve I-V

4.1 Curve I-V e parametri elettrici

Per monitorare le performance elettriche di un modulo fotovoltaico è necessario misurare i parametri elettrici più significativi tramite test specifici. Uno degli approcci più efficaci per ricavare in modo rapido ed efficiente i principali punti di funzionamento di un impianto fotovoltaico è quello relativo alla determinazione della caratteristica corrente-tensione.

Tipicamente, un sistema per la misurazione della curva I-V è costituito da una sorgente luminosa naturale o artificiale, un banco di prova, un controllo della temperatura del modulo, un sistema di monitoraggio e un sistema di acquisizione dati per misurare i valori costituenti la curva corrente-tensione ottenuti dalla variazione di un carico o un'alimentazione elettronica esterna. Esistono diversi metodi, basati tutti sul controllo della corrente fornita tra il punto a corrente zero e il punto di corto circuito, per eseguire il tracciamento della curva I-V:

- Metodo con carico a resistenza variabile
- Metodo con carico capacitivo
- Metodo con carico elettronico
- Metodo con amplificatore di potenza bipolare
- Metodo con alimentatore a quattro quadranti
- Metodo con convertitore DC-DC

In questo modo è possibile ottenere la caratteristica volt-amperometrica di un modulo, mostrata nella Figura 4-1, e dunque determinare, in maniera indiretta, i principali parametri elettrici: la corrente di cortocircuito (I_{SC}), la tensione a circuito aperto (V_{OC}) e la potenza massima (P_{mpp}) e il punto di potenza virtuale (PT).



Figura 4-1: Curva I-V schematica di una cella fotovoltaica

- V_{OC} : è la tensione a circuito aperto ovvero la tensione massima disponibile ai morsetti del modulo ottenuta quando a questo viene applicato un carico a resistenza infinita (I = 0);
- I_{SC} : è la corrente di cortocircuito ovvero la corrente erogata dal modulo quando a questo viene applicato un carico con resistenza nulla (V = 0);
- *P_{mpp}*: è la potenza massima erogabile da un modulo definito come il punto della curva, in corrispondenza del ginocchio, dove il prodotto di corrente e tensione è massimo;
- I_{mpp} : è la corrente nel punto di massima potenza;
- V_{mpp} : è la tensione nel punto di massima potenza;
- FF: è il fill factor, o fattore di riempimento o fattore di forma, ovvero una misura della qualità della cella solare o del modulo fotovoltaico. È il rapporto che confronta la potenza massima del modulo fotovoltaico con la potenza virtuale (*PT*) che risulterebbe se V_{mpp} fosse la tensione a circuito aperto e I_{mpp} fosse la corrente di cortocircuito.

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{OC} \cdot I_{SC}};$$

- R_S : è la resistenza in serie che rappresenta l'insieme delle resistenze dovute sia al materiale proprio della cella che alla resistenza di contatto catodo-semiconduttore;
- *R_{Sh}*: è la resistenza in parallelo o di "*shunt*" che rappresenta le perdite dovute a tutte le correnti di dispersione (*leakage*) nella giunzione.

 η: è l'efficienza di un modulo definito come il rapporto tra la potenza elettrica erogata dal modulo e la potenza luminosa incidente su di esso:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

In molti casi pratici i valori delle resistenze sopracitate vengono ricavati per approssimazione dalla pendenza di ciascuna delle *intercette* della curva. Queste pendenze indicano l'inverso dei due valori di interesse. La Figura 4-2 mostra come varia la curva I-V al variare delle resistenze.



Figura 4-2: Influenza delle resistenze in serie e in parallelo sulla curva I-V

Per la determinazione della caratteristica I-V, l'accuratezza della misurazione è fondamentale, perciò ogni aspetto del sistema di acquisizione I-V deve essere calibrato in un laboratorio o istituto accreditato per garantire l'adeguatezza del comportamento dinamico. Un irraggiamento non uniforme e una fonte di luce instabile possono influenzare negativamente i risultati ottenuti. Per le misurazioni sia interne che esterne, il monitoraggio dei parametri ambientali è fondamentale per mantenere la temperatura il più possibile omogenea e costante.

In condizioni di luce solare naturale e soprattutto nei casi in cui viene utilizzata luce artificiale come fonte, la misurazione della curva I-V non avviene quasi mai in condizioni standard (STC, 1000 W/m², 25 °C, AM 1.5 e spettro di riferimento IEC 60904-3). La luce solare o l'irradiazione simulata dovrebbero essere misurate mediante un dispositivo solare di riferimento calibrato come descritto in ISO 17020. È necessario, dunque, utilizzare una procedura di correzione, tramite la quale

vengono riportate le curve I-V misurate a condizioni normalizzate STC secondo la norma CEI 82-5, basata sulle seguenti formule:

$$I_{STC} = I_{mis} + I_{SC,mis} \left(\frac{G_{STC}}{G_{mis}} - 1 \right) + \alpha (T_{STC} - T_{int})$$

$$U_{STC} = U_{mis} - R_s (I_{STC} - I_{mis}) - K I_{STC} (T_{STC} - T_{int}) + \beta (T_{STC} - T_{int})$$

dove,

- I_{mis} e U_{mis} coordinate della caratteristica misurata;
- I_{STC} e U_{STC} coordinate della caratteristica corretta;
- *G_{mis}* valore dell'irradianza misurata;
- T_{int} temperatura interna di funzionamento del campione in prova;
- *I_{SC,mis}* corrente di corto circuito misurata del campione in prova;
- G_{STC} e T_{STC} rispettivamente i valori di irradianza e temperatura nelle condizioni normalizzate;
- α e β rispettivamente i coefficienti di temperatura di corrente e tensione del campione in prova;
- R_s resistenza serie interna del campione in prova;
- *K* fattore di correzione della curva.

Per ottenere la curva in condizioni normalizzate è necessario calcolare il valore della temperatura interna di funzionamento della cella (T_{int}) il quale risulta difficile da misurare direttamente e con una buona precisione per via della forte disomogeneità della temperatura. Uno dei possibili metodi utilizzati per calcolare tale parametro è quello basato sulla temperatura nominale di lavoro della cella NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*) ovvero il valore di temperatura a cui si stabilizza il modulo in condizione di:

- Funzionamento a circuito aperto;
- Irradianza di 800 W/m²;
- Velocità del vento pari a 1 m/s;
- Temperatura ambiente di 20 °C.

81

A partire dalla temperatura NOCT, solitamente fornita dal costruttore sul datasheet del modulo, e dalla temperatura ambiente (T_a) , è possibile determinare la temperatura interna di funzionamento della cella in questo modo:

$$T_{int} = T_a + \frac{NOCT - 20}{0.8}G_{mis}$$

Una curva I-V misurata con l'attrezzatura adeguata fornisce informazioni sui possibili difetti che affliggono il modulo. L'interpretazione della curva I-V dipende dai dati disponibili. Il confronto dei valori misurati tramite il test di tracciamento I-V con i dati elettrici specifici del modulo fotovoltaico fornisce una buona indicazione dei potenziali guasti e problemi tecnici, dunque permette di valutare i possibili effetti di una degradazione del modulo. Tipicamente viene calcolato lo scarto percentuale Δ tra le misurazioni di corrente, tensione e potenza rispetto ai valori forniti dal costruttore nel datasheet.

Nei paragrafi successivi vengono proposti diversi tipi di approcci aventi come obiettivo comune quello di correlare i parametri elettrici ricavabili tramite le curve I-V con le immagini ad elettroluminescenza dei rispettivi pannelli.

4.2 Correlazione dei parametri elettrici con media, mediana e deviazione standard di immagini ad elettroluminescenza

Sono stati correlati i parametri elettrici più significativi nella diagnostica di un modulo fotovoltaico con i parametri rappresentativi la distribuzione di luminescenza riscontrabile nelle immagini EL in scala di grigi, ovvero deviazione standard, media e mediana, come proposto in "Correlation of I-V Curve Parameters with Module-Level Electroluminescent Image Data Over 3000 Hours Damp-Heat Exposure" (16).

Sono stati utilizzati i parametri elettrici disponibili dalle recenti misurazioni delle curve I-V dei dieci moduli le cui immagini ad elettroluminescenza originali, opportunatamente ritagliate tramite lo script descritto in 2.2, sono mostrate in Figura 4-3. Per via della bassa luminosità dei primi due moduli, si è optato di modificare i valori di luminosità e contrasto delle foto in maniera tale da uniformare il livello di luminosità delle immagini. La procedura di correlazione proposta è stata

effettuata anche per tali immagini EL modificate, le quali sono mostrati nella Figura 4-4.



Figura 4-3: Immagini ad elettroluminescenza originali dei moduli in esame



Figura 4-4: Immagini ad elettroluminescenza modificate dei moduli in esame

Per ciascun parametro elettrico, si è utilizzato il software Matlab per applicare la funzione di correlazione "corrcoef" in modo tale da ottenere un valore, ovvero il *fattore di correlazione*, che quantificasse la correlazione tra lo specifico parametro elettrico e la deviazione standard, la media e la mediana dei valori dei pixel delle immagini EL dei moduli fotovoltaici, ovvero misurazioni facilmente ottenibili dalle matrici rappresentati le immagini EL. Più il fattore di correlazione, variabile tra -1 e +1, tende ad uno degli estremi più sarà alta la correlazione tra i due parametri di interesse. La Tabella 4-1 mostra tutti i fattori di correlazione ottenuti.

	Deviazione standard (*)	Deviazione standard (**)	Media (*)	Media (**)	Mediana (*)	Mediana (**)
I _{mpp} (STC)	-0.56	-0.16	0.32	0.23	0.30	0.23
V _{mpp} (STC)	0.41	0.79	0.17	0.51	0.31	0.52
$P_{mpp}(STC)$	-0.09	0.69	0.50	0.78	0.62	0.78
ΔΡ	0.49	-0.18	-0.002	-0.32	-0.12	-0.32
ΔI	0.54	-0.03	-0.02	-0.22	-0.11	-0.22
ΔV	0.28	0.25	0.10	0.05	0.15	0.06
η	-0.10	0.70	0.51	0.79	0.62	0.79

Tabella 4-1: Fattori di correlazione tra i parametri elettrici e deviazione standard, media e mediana

* Immagini modificate

**Immagini originali

4.3 Correlazione dei parametri elettrici con il quantitativo di pixel neri

Sono stati correlati i principali parametri elettrici con gli approcci utilizzati nel capitolo 3, ovvero il conteggio dei pixel e la somma dei pixel al di sotto di una certa soglia. Sono state trovate, per ogni caso, le soglie per la quale il fattore di correlazione è massimo; la soglia è calcolata come percentuale del valore di riferimento ovvero il valore del pixel più alto dell'intero modulo. La Tabella 4-2 mostra tutti i fattori di correlazione ottenuti.

	Conteggio pixel neri (modificate)	Conteggio pixel neri (originali)	Somma pixel neri (modificate)	Somma pixel neri (originali)
I _{mpp} (STC)	-0.56 a 3%	-0.40 a 56%	-0.53 a 3%	-0.58 a 17%
V _{mpp} (STC)	-0.73 a 63%	-0.78 a 78%	-0.66 a 59%	-0.51 a 33%
P _{mpp} (STC)	-0.87 a 29%	-0.94 a 60%	-0.88 a 16%	-0.92 a 31%
Δ P	0.85 a 3%	0.60 a 15%	0.86 a 3%	0.93 a 17%
ΔΙ	0.88 a 2%	0.64 a 17%	0.86 a 2%	0.96 a 14%
ΔV	0.42 a 46%	0.36 a 12%	0.48 a 46%	0.78 a 1%
η	0.86 a 28%	0.96 a 62%	0.86 a 19%	0.91 a 35%

Tabella 4-2: Fattori di correlazione tra i parametri elettrici e il quantitativo di pixel neri al di sotto della soglia specificata

La Figura 4-5 mostra il risultato relativo al fattore di correlazione più alto ottenuto, ovvero quello tra lo scarto percentuale di corrente e la somma dei pixel neri al di sotto del 14% del bianco massimo dell'immagine EL originale del rispettivo modulo FV.



Figura 4-5: Visualizzazione grafica della correlazione tra lo scarto di corrente e la somma dei pixel neri

4.4 Correlazione tra potenza e difetti

È stata calcolata l'area di pixel neri per ogni cella e trovata la percentuale di tale area rispetto all'area totale della singola cella. Ipotizzando che il calo della potenza del modulo sia proporzionale alla quantità dei difetti presenti al suo interno e alla loro estensione, dunque alla quantità di "nero", è stato calcolato, tramite uno script Matlab, lo scarto in potenza. Inizialmente si è trovato la potenza massima teorica che dovrebbe avere una cella priva di difetti dividendo il valore della potenza massima, fornita dal costruttore, del modulo intero per il numero delle celle fotovoltaiche che lo compongono. Avendo calcolato la percentuale di "nero" all'interno delle immagini EL rispetto all'area totale, si è stimato la potenza massima per ciascuna delle celle. Sommando i valori di potenza relativi ad ogni cella si è ottenuto quella totale, la quale è stata confrontata con quella del datasheet. Successivamente è stata trovata la soglia, utilizzata per il conteggio dei pixel "neri", ottimale, per ciascun modulo, che permettesse di ottenere uno scarto di potenza paragonabile a quello ottenuto dalle misurazioni eseguite in laboratorio.

La Tabella 4-3 mostra i valori degli scarti di potenza per ciascun modulo, ottenuti dal confronto dei valori di potenza recentemente misurati con quelli forniti dal costruttore. Tali valori vengono confrontati con quelli ottenuti dallo script per una soglia ottimale

	Scarto in potenza	Scarto in potenza calcolato (modificate)	Scarto in potenza calcolato (originali)
Modulo 1	-9,42%	-9.79% a 28%	-9.58% a 19%
Modulo 2	-30,1%	-30.8% a 29%	-32.3% a 16%
Modulo 3	-19,4%	-16.7% a 51%	-20.5% a 67%
Modulo 4	-4,6%	-5% a 25%	-4.47% a 55%
Modulo 5	-11,1%	-10.5 a 58%	-10.9% a 76%
Modulo 6	-3,58%	-3,46 a 44%	-3.57% a 62%
Modulo 7	-12,3%	-12.5% a 28%	-12.4% a 37%
Modulo 8	-37,5%	-38.2% a 28%	-36.8% a 45%
Modulo 9	-10%	-9.73% a 12%	-10.6% a 25%
Modulo 10	-5%	-4.93% a 21%	-5.14% a 36%

Tabella 4-3: Confronto tra lo scarto in potenza reale e quello calcolato

5 Analisi di immagini ad elettroluminescenza su campo

Nel giorno xx-09-2020 sono state svolte prove di elettroluminescenza su tutti i moduli presenti in un impianto fotovoltaico installato nei pressi della periferia di Milano. Nel seguente capitolo viene descritta l'intera procedura utilizzata per organizzare e analizzare il materiale con lo scopo di mappare e conteggiare i diversi difetti presenti nei moduli dell'impianto. La Figura 5-1 riporta i principali step svolti.



Figura 5-1: Flow chart per immagini EL da campo

5.1 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione del test di elettroluminescenza direttamente sul campo e la successiva post-elaborazione delle immagini è stata necessaria la seguente strumentazione:

- N° 1 personal computer per elaborazione immagini;
- Alimentatore in corrente continua da 1000 V e 10 A;
- N° 1 fotocamera da 14.2 Mpixel con sensore CCD e filtro infrarosso da 800 nm per elettroluminescenza.

5.2 Allestimento delle prove di elettroluminescenza

Le prove di elettroluminescenza sono state svolte separatamente su ciascuna delle 52 stringhe analizzate, connesse a 14 inverter e composte da 6, 10, 11 o 12 moduli fotovoltaici. Le stringhe interessate al test sono state temporaneamente disconnesse dall'impianto fotovoltaico. Successivamente è stata applicata una tensione di polarizzazione diretta ai morsetti con generazione di tensione, corrente e potenza DC, in modo tale da far circolare una corrente diffusiva compresa fra l'80 e il 100% della corrente di corto circuito dichiarata dal costruttore dei moduli in condizioni STC (*Standard Test Conditions*, 1000 W/m², T_{cella}= 25°C). È stata utilizzata una fotocamera sensibile ai raggi infrarossi per poter registrare la radiazione emessa durante l'alimentazione di ogni stringa di moduli evitando la disconnessione dei moduli fotovoltaici dalla struttura di supporto. Le immagini ad elettroluminescenza ricavate sono state successivamente elaborate ed analizzate.

Le 52 stringhe fotovoltaiche (per un totale di 532 moduli) sono state analizzate in due giorni consecutivi secondo l'ordine riportato dalla Tabella 5-1 e dalla Tabella 5-2. Per ogni stringa viene anche riportato il range di foto corrispondenti ai rispettivi moduli e i valori dei parametri elettrici utilizzati durante la prova. Data la grande quantità di foto, sono stati utilizzati due rullini.

Poiché la radiazione infrarossa presente nella luce solare è enormemente maggiore di quella emessa dai moduli fotovoltaici durante il test, le prove di elettroluminescenza sono state svolte in ambiente esterno durante le ore notturne affinché le radiazioni infrarosse emesse dal sole non si accavallassero con quelle emesse dal modulo fotovoltaico.

Orario	Inverter	Stringa	Foto	Tensione (V)	Corrente (A)
19:40 - 19:46	6	3	1 ÷ 16	935	7.4
19.50 - 19.55	6	2	17 ÷ 33	938	7 49
19:59 - 20:04	6	1	$34 \div 47$	472	7 49
20:08 - 20:11	6	4	48 ÷ 71	855	7,49
20:15 - 20:12	5	1	$72 \div 84$	470	7 49
20:13 - 20:25	5	2	85 ÷ 119	945	7,49
20:26 - 20:33	5	3	$120 \div 135$	943	7,49
20:20 20:33	5	4	$136 \div 157$	942	7.49
20:34 20:37	3	1	$150 \div 157$ $158 \div 172$	472	7.49
20:46 - 20:54	3	2	$173 \div 193$	9/3	7,19
20:55 - 21:00	3	2	$194 \div 220$	943	7,43
21:01 - 21:04	3	Л	$104 \cdot 220$	942	7,42
21.01 - 21.04	1	4	$221 \div 240$	775	7,49
21.00 -21.10	1	2	$247 \div 200$	014	7,49
21.11 -21.15	1	2	$207 \div 290$	944	7,49
21:17 -21:33	1	3	$291 \div 324$	943	7,49
21:34 -21:40	2	4	$325 \div 351$	940	7,49
21:48 -21:50	2	1	$352 \div 303$	473	7,49
21:52 -21:55	2	2	364 ÷ 389	913	7,49
21:56 -21:59	2	3	390 - 408	913	7,49
22:00 -22:04	2	4	409 ÷ 438	912	7,49
22:10 -22:13	4	2	439 ÷ 464	914	7,49
22:15 -22:20	4	3	465 ÷ 492	912	7,49
22:23 -22:25	4	1	493 ÷ 497	475	7,49
22:26 - 22:30	4	4	498 ÷528	913	7,49
22:36	7	2	529 ÷ 558	960	5,79
22:42 - 22:45	7	3	559 ÷ 583	960	5,97
23:20	7	1	584 ÷ 18	475	7,49
23:30	9	3	19÷41	945	7,49
23:33	9	4	42 ÷ 65	948	7,49
23:38	9	2	66 ÷ 90	945	7,49
23:44	9	1	91 ÷ 101	474	7,49
23:49	8	1	102 ÷ 116	474	7,49
23:55	8	2	117 ÷ 156	830	7,49
00:03 - 00:07	8	3	157 ÷ 187	913	7,49

Tabella 5-1: Test EL del primo giorno

Orario	Inverter	Stringa	Eato	Tensione (V)	Corrente (A)
	niverter	Sungu	F010		
17:36	12	1	190÷195	470	7,49
17:40	12	4	196 ÷ 208	958	4,63
17:45	12	3	209 ÷ 233	958	4,7
18:05 - 18:15	12	2	234 ÷ 256	958	4,68
18:20	10	2	257 ÷ 269	958	4,5
18:26	10	1	270 ÷ 291	958	5,94
18:40	11	1	292 ÷299	472	7,49
18:46	11	2	300 ÷ 308	471	7,49
18:55	11	4	309 ÷ 323	864	7,49
19:01	13	3	324 ÷ 339	867	7,49
19:10	13	2	340 ÷ 349	942	7,49
19:18	13	1	350 ÷ 359	468	7,49
19:25	11	5	360 ÷ 380	474	7,49
19:45	13	4	381 ÷ 392	943	7,49
19:53	14	4	393 ÷ 406	941	7,49
19:58	14	2	407 ÷ 417	474	7,49
20:01	14	1	418 ÷ 425	474	7,49
20:04 - 20:08	14	3	426 ÷ 443	945	7,49

5.3 Mappatura dell'impianto

La disposizione spaziale delle stringhe dell'impianto fotovoltaico è visibile in Figura 5-2.



Figura 5-2: Planimetria dell'impianto fotovoltaico

I moduli appartenenti alla stessa stringa sono stati evidenziati dello stesso colore. Le stringhe collegate allo stesso inverter, invece, sono state contrassegnate da un colore univoco del bordo. La Figura 5-3 riporta la legenda dei colori di ogni stringa, per ogni inverter, e il corrispondente numero di moduli collegati.

Colore stringa	Colore inverter	Stringa	N°moduli	Totale moduli
	11	S1	10	
	11	S2	12	
	11	S3	12	
	11	S4	12	46
	12	S1	6	
	12	S2	11	
	12	S3	11	
	12	S4	11	39
	13	S1	6	
	13	S2	12	
	13	S3	12	
	13	S4	12	42
	14	S1	6	
	14	S2	11	
	14	S3	11	
	14	S4	11	39
	15	S1	6	
	15	S2	12	
	15	S3	12	
	15	S4	12	42
	16	S1	6	
	16	S2	12	
	16	S3	12	
	16	S4	11	41
	17	S1	6	
	17	S2	12	
	17	53	12	
	17	54	11 6	41
	10	51	11	
	18	52	11	28
	10	55 51	6	20
	19	52	12	
	19	53	12	
	19	54	12	42
	110	S1	12	
	110	S2	12	24
	111	S1	6	
	111	S2	6	
	111	S4	11	
	111	S5	11	34
	112	S1	6	
	112	S2	12	
	112	\$3	12	
	112	S4	12	42
	113	S1	6	
	113	S2	6	
	113	53	12	
	113	54	12	36
	114	52	6	
	114	52	12	
	114	S4	12	36

Figura 5-3: Legenda

Le immagini di elettroluminescenza di tutti i moduli sottoposti ad analisi, con risoluzione originale ed estensione ".jpg", sono state suddivise in 14 cartelle corrispondenti ai 14 inverter, ciascuna delle quali contenente le sottocartelle corrispondenti alle rispettive stringhe.

Tra tutte le foto scattate sono state selezionate solo quelle di interesse in modo tale da non avere immagini sfocate e/o con prospettiva inadeguata per la corretta visualizzazione dei difetti eventualmente presenti nelle celle. Al fine di permettere una facile identificazione dei moduli, per ciascuno di esso è stato attribuito lo scatto migliore.

Per poter reperire rapidamente l'immagine di elettroluminescenza migliore per ciascun modulo, ogni immagine è stata identificata da un codice univoco (n° rullino_n° foto) il quale è stata associata al modulo corrispondente come riportato in Figura 5-4, Figura 5-5, Figura 5-6 e Figura 5-7. I moduli fortemente danneggiati sono stati contrassegnati in rosso.

				Lato	nord-ovest				
	2_0282	2_0283							
	2_0280	2_0281							
I10S1	2_0278	2_0279							
	2_0276	2_0277		2_0322	2_0323		2_0294	2_0295	
	2_0274	2_0275		2_0317	2_0319	I11S1	2_0297	2_0296	
	2_0272	2_0273	I11S4		2_0315		2_0299	2_0298	
	2_0267	2_0268		2_0313	2_0314		2_0301	2_0300	
	2_0265	2_0266		2_0311	2_0312	I11S2	2_0303	2_0302	
I10S2	2_0263	2_0264		2_0309	2_0310		2_0305	2_0304	
	2_0261	2_0262			2_0373				
	2_0259	2_0260		2_0368	2_0371		2_0327	2_0326	
	2_0257	2_0258	I11S5	2_0366	2_0367		2_0329	2_0328	
				2_0364	2_0365	11353	2_0331	2_0330	
	2_0244	2_0245		2_0362	2_0363		2_0333	2_0332	
	2_0242	2_0243		2_0360	2_0361		2_0335	2_0334	
I12S2	2_0240	2_0241					2_0338	2_0337	
	2_0238	2_0239		2_0357	2_0358		2_0342	2_0340	
	2_0236	2_0237	I13S1	2_0352	2_0354	I13S2	2_0345	2_0344	
	2_0234	2_0235		2_0350	2_0351		2_0347	2_0346	

Figura 5-4: Mappatura dei moduli fotovoltaici della zona "nord-ovest" dell'impianto con indicazione del codice univoco del modulo

								1	
				Lato	nord-est				
	2_0220	2_0221		2_0440	2_0441		2_0382	2_0381	
	2_0218	2_0219		2_0437	2_0439		2_0384	2_0383	
11253	2_0216	2_0217	I14S3	2_0435	2_0436	I13S4	2_0386	2_0385	
	2_0214	2_0215		2_0433	2_0434		2_0388	2_0387	
	2_0212	2_0213		2_0430	2_0431		2_0390	2_0389	
	2_0210	2_0211		2_0428	2_0429		2_0392	2_0391	
	2_0207	2_0208		2_0415	2_0416				
	2_0205	2_0206	I14S1	2_0413	2_0414		2_0396	2_0395	
I12S4	2_0203	2_0204		2_0408	2_0409		2_0398	2_0397	
	2_0201	2_0202		2_0422	2_0423	I14S4	2_0400	2_0399	
	2_0199	2_0200	I14S2	2_0420	2_0421		2_0402	2_0401	
	2_0197	2_0198		2_0418	2_0419		2_0404	2_0403	
	2_0194	2_0195					2_0406	2_0405	
I12S1	2_0192	2_0193							
	2_0190	2_0191							

Figura 5-5: Mappatura dei moduli fotovoltaici della zona "nord-est" dell'impianto con indicazione del codice univoco del modulo

	Lato	sud-est							
				1_0037	1_0035		2_0134	2_0130	
			I6S1	1_0043	1_0040		2_0136	2_0135	
				1_0045	1_0044	1852	2_0142	2_0139	
								2_0144	
				2_0013	2_0015		2_0146	2_0144	
			I7S1	2_0009	2_0012		2_0152		
				2_0002	2_0007		2_0159		
							2_0166	2_0165	
	2_0022	2_0023		2_0110	2_0114	1853	2_0168	2_0167	
	2_0024	2_0025	I8S1	2_0107	2_0108		2_0172	2_0170	
1953	2_0028	2_0029		2_0102	2_0104		2_0177	2_0176	
	2_0030	2_0034					2_0186	2_0181	
	2_0035	2_0037		2_0069	2_0067				
	2_0039	2_0040		2_0072	2_0071		-	-	
	2_0042	2_0043	1952	2_0075	2_0073		-	-	
	2_0045	2_0046		2_0079	2_0077	1754	-	-	
1954	2_0048	2_0051		2_0084	2_0083		-	-	
	2_0053	2_0056		2_0087	2_0086		-	-	
	2_0057	2_0060		2_0092	2_0091		-		
	2_0061	2_0063	1951	2_0096	2_0094				
				2_0099	2_0098				

Figura 5-6: Mappatura dei moduli fotovoltaici della zona "sud-est" dell'impianto con indicazione del codice univoco del modulo

				lata	and anost				
				LULU	sua-ovest				
	1 0249	1 0240							
	1_0248	1_0249							
1101	1 0256	1 0255					1 0266	1 0264	
1131	1_0250	1_0257					1_0300	1_0304	
	1_0260	1_0262				1252	1_0371	1_0368	
	1_0203	1_0204		1 0200	1 0200	1252	1_0376	1_0376	
	1_0269	1_0270	1004	1_0360	1_0360		1_0380	1_0378	
14.00	1_0271	1_0273	1251	1_0355	1_0357		1_0382	1_0381	
1152	1_0275	1_0276		1_0352	1_0354		1_0384		
	1_0277	1_0279					1_0391		
	1_0282	1_0283		1_0329	1_0327		1_0393	1_0392	
	1_0286	1_0289	1464	1_0333	1_0330	1253	1_0398	1_0396	
	1_0293	1_0295	1154	1_0338	1_0336		1_0401	1_0400	
14.60	1_0297	1_0298		1_0342	1_0340		1_0404	1_0403	
1153	1_0302	1_0305		1_0344	1_0343		1_0406	1_0405	
	1_0313	1_0314		1_0348	1_0347		1_0412	1_0411	
	1_0315	1_0318					1_0415	1_0414	
	1_0320	1_0321		1_0197	1_0196	1254	1_0420	1_0417	
				1_0200	1_0198		1_0429	1_0425	
	1_0174	1_0175	1353	1_0203	1_0202		1_0432	1_0430	
	1_0176	1_0177		1_0206	1_0204		1_0437		
1352	1_0178	1_0180		1_0213	1_0210				
	1_0182	1_0186		1_0219	1_0216		1_0444		
	1_0188	1_0189		1_0223	1_0222		1_0448	1_0447	
	1_0190	1_0192		1_0228	1_0226	1452	1_0452	1_0450	
	1_0159	1_0162	1354	1_0232	1_0231		1_0454	1_0453	
1351	1_0163	1_0165		1_0235	1_0234		1_0457	1_0456	
	1_0168	1_0171		1_0239	1_0238		1_0462	1_0461	
				1_0245	1_0243		1_0468	1_0466	
	1_0090	1_0093					1_0473	1_0470	
	1_0095	1_0097		1_0493	1_0493	1453	1_0476	1_0474	
1552	1_0099	1_0100	1451	1_0495	1_0495		1_0484	1_0480	
	1_0108	1_0109		1_0496	1_0497		1_0487	1_0486	
	1_0111	1_0113					1_0491		
	1_0116	1_0117		1_0074	1_0073		1_0506		
	1_0121	1_0122	1551	1_0080	1_0075		1_0510	1_0509	
	1_0124	1_0125		1_0084	1_0082	1454	1_0514	1_0513	
1553	1_0126	1_0127					1_0519	1_0516	
	1_0128	1_0130		1_0051	1_0049		1_0522	1_0521	
	1_0131	1_0132		1_0054	1_0053		1_0527	1_0524	
	1_0134	1_0135	1654	1_0059	1_0056				
	1_0138	1_0140		1_0062	1_0060		1_0535	1_0531	
	1_0141	1_0142			1_0063		1_0538	1_0536	
1554	1_0145	1_0146		1_0069	1_0067	1752	1_0543	1_0540	
	1_0147	1_0148		1_0016	1_0015		1_0548	1_0544	
	1_0149	1_0150		1_0012	1_0011		1_0551	1_0549	
	1_0152	1_0155	1653	1_0009	1_0008		1_0556	1_0554	
				1_0002	1_0001		1_0562	1_0560	
				1_0004	1_0003		1_0565	1_0563	
				1_0006	1_0005	1753	1_0569	1_0567	
				1_0018	1_0017		1_0574	1_0571	
				1_0022	1_0020		1_0577	1_0576	
			1652	1_0024	1_0023		1_0582	1_0581	
				1_0027	1_0026				
				1_0030	1_0029				
				1_0033	1_0032				

Figura 5-7: Mappatura dei moduli fotovoltaici della zona "sud-ovest" dell'impianto con indicazione del codice univoco del modulo

5.4 Post-elaborazione delle immagini

Gli scatti del primo giorno, ovvero le foto dei moduli collegati ai primi nove inverter, sono stati realizzati con una fotocamera a infrarossi avente una configurazione delle impostazioni non ottimale. La risoluzione di queste immagini, dunque, risulta essere piuttosto bassa. Nella Figura 5-8 vengono riportati alcuni esempi delle foto originali del primo giorno.



Figura 5-8: Foto originali del primo giorno

Per via dell'insufficiente luminosità delle immagini si è ritenuto opportuno elaborare le immagini per poter analizzare e conteggiare i difetti presenti nei moduli in maniera efficiente e veloce. È stato utilizzato il software "Photoshop" per poter regolare la luminosità, il contrasto e la nitidezza in maniera tale da ottenere un risultato visibilmente migliore. Mediante gli strumenti di correzione e grazie alla possibilità di poter automatizzare tale processo di elaborazioni delle immagini, sono stati applicati gli stessi comandi di modifica a tutte le foto scattate durante il primo giorno.

Alcuni dei risultati finali di post-elaborazione sono riportati nella Figura 5-9.



Figura 5-9: Foto modificate del primo giorno

Le foto scattate durante il secondo giorno invece, a seguito del perfezionamento delle impostazioni della camera, risultano avere una luminosità e una risoluzione ideale per l'individuazione dei difetti. Pertanto, non sono state applicate correzioni. La Figura 5-10 riporta alcuni esempi delle foto originali scattate nel secondo giorno.



Figura 5-10: Foto originali del secondo giorno

5.5 Risultati delle prove

Le prove di elettroluminescenza hanno consentito di rilevare la presenza di moduli fotovoltaici con celle danneggiate o inattive. In particolare, sono state individuate le celle aventi le seguenti problematiche:

- 1. Celle con fratture lungo i busbars
- 2. Celle con forte disomogeneità di luminescenza
- 3. Celle con piccole fratture

Sono stati distinti anche i moduli che presentavano caratteristiche di particolare interesse:

- 4. Moduli con celle totalmente scure
- 5. Moduli con altri difetti riconducibili al processo di fabbricazione delle celle

Si riporta, di seguito, una breve descrizione delle categorie con alcuni esempi ottenuti durante il test.

1. Celle con fratture lungo i busbars

In questa categoria sono state inserite le celle che presentano fratture che si sviluppano lungo i busbars laterali (v. 1.3.2.1) e che comportano la disattivazione della porzione di cella fra la frattura e il bordo della cella stessa inducendo un drastico crollo della produzione di energia della cella. In tutti i casi analizzati le fratture avvengono su uno dei due busbars laterali e non su quello centrale. La Figura 5-11 riporta un esempio di frattura con conseguente inattivazione della quasi totalità della porzione di cella fra il busbar corrispondente ed il bordo della cella.



Figura 5-11: Esempio di cella con frattura lungo uno dei due busbars

Nelle celle facenti parti questa categoria, le fratture si possono ricondurre probabilmente a un non appropriato processo di saldatura dei collegamenti elettrici, che ha comportato un danneggiamento della cella solare.

La forma delle fratture e soprattutto la loro totale o quasi totale sovrapposizione con il busbars confermano la tesi secondo cui la causa più probabile sia un non adeguato processo di saldatura, che tramite uno stress termico-meccanico, ha danneggiato la cella. Tale argomento viene discusso in letteratura scientifica, in particolare nel documento dell'International Energy Agency (IEA) "Review of Failures of Photovoltaic Modules" (8) (con particolare attenzione a pag. 82), e negli articoli scientifici (17) e (18).

Non si esclude anche la possibilità che in alcuni casi il danno possa essere stato inizialmente generato durante il processo di fabbricazione, maneggiamento o trasporto delle singole celle.

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di moduli fotovoltaici, facenti parte dell'impianto in analisi, che presentano questa tipologia di difetto.



Figura 5-12: Esempio di cella con frattura lungo uno dei due busbar nell'immagine EL del modulo 2_0373 e relativo ingrandimento



Figura 5-13: Esempio di celle con fratture lungo uno dei due busbar nell'immagine EL del modulo 2_0319 e relativo ingrandimento



Figura 5-14: Esempio di celle con fratture lungo uno dei busbar nelle immagini EL dei moduli 2_0414 (a sinistra) e 2_0305 (a destra)



Figura 5-15: Esempio di celle con fratture lungo uno dei busbar nelle immagini EL dei moduli 1_0348 (a sinistra) e 1_0044 (a destra)

2. Celle con forte disomogeneità di luminescenza

In questa categoria sono state inserite le celle che presentano una forte variazione di luminescenza all'interno delle celle stesse (v. 1.3.2.2 e 1.4.2) con parti molto più chiare, dunque produttive, e parti più scure quindi meno produttive o addirittura inattive. In tutti i casi riscontrati, come anche visibile nell'esempio in Figura 5-16, la luminescenza crea zone chiare e scure parallele ai busbars.

Queste tipologie di difetti sono probabilmente da ricondurre ad un non adeguato processo di saldatura dei contatti metallici con le celle solari, con conseguente disconnessione degli stessi, in maniera parziale o totale.



Figura 5-16: Esempio di celle con disconnessione di uno dei busbars laterali (a sinistra) e di quello centrale (a destra)

In particolare, il difetto, visibile nelle immagini di elettroluminescenza come variazione di luminescenza, si può essere manifestato probabilmente:

- a) durante la fase di fabbricazione a causa del non appropriato processo di saldatura dei collegamenti elettrici fra la cella e i busbars;
- b) durante il funzionamento su campo dei moduli, successivamente al non appropriato processo di saldatura dei collegamenti elettrici, l'esposizione del modulo agli agenti atmosferici e alle conseguenti variazioni giornaliere di temperatura ha comportato una rapida degradazione dei collegamenti elettrici stessi.

La cella, dunque, produce corrente solo nei punti in cui il busbar è correttamente collegato e questo induce una diminuzione di potenza non solo della singola cella ma anche dell'intero modulo di cui fa parte.

Inoltre, in alcuni casi, la porzione di cella correttamente collegata surriscaldandosi, poiché deve sopperire interamente al trasporto di tutta la corrente generata dalla cella la quale percorre una resistenza elettrica più piccola, risulta avere una maggiore luminescenza rispetto al normale (19).

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di moduli fotovoltaici, facenti parte dell'impianto in analisi, che presentano questa tipologia di difetto.



Figura 5-17: Esempio di cella con forte disomogeneità nell'immagine EL del modulo 2_0440 e relativo ingrandimento



Figura 5-18: Esempio di celle con forte disomogeneità nelle immagini EL dei moduli 1_0006 (a sinistra) e 1_0033 (a destra)



Figura 5-19: Esempio di celle con forte disomogeneità nelle immagini EL dei moduli 1_0093 (a sinistra) e 2_0390 (a destra)
3. Celle con piccole fratture

In questa categoria sono state inserite le celle che presentano piccole fratture che si sviluppano fra i busbars laterali e i bordi della cella (v. 1.3.2.1). Tali fratture comportano la disattivazione della porzione di cella fra la frattura e il bordo della cella stessa; generalmente vengono interessati gli spigoli della cella.

In tutti i casi analizzati, tali fratture si trovano fra busbars laterali ed i bordi, mentre non sono stare rilevate rotture nella parte centrale della cella.

Rispetto alla categoria definita precedentemente ovvero "celle con fratture lungo i busbars", con "piccole fratture" si intendono fratture che comportano la disattivazione di una porzione minima (meno di un terzo) dell'area fra il bordo ed il busbar laterale. La Figura 5-20 riporta un esempio di tale tipologia di difetto.



Figura 5-20: Esempio di cella con piccola frattura

In particolare, il difetto, visibile nelle immagini di elettroluminescenza, si può essere manifestato:

- a) durante la fase di fabbricazione a causa del non appropriato processo di saldatura dei collegamenti elettrici fra la cella e i busbars;
- b) durante il funzionamento su campo dei moduli; successivamente al non appropriato processo di saldatura dei collegamenti elettrici, l'esposizione del modulo agli agenti atmosferici e alle conseguenti variazioni giornaliere di temperatura ha comportato una rapida degradazione dei collegamenti elettrici stessi.
- c) durante il processo di fabbricazione, movimentazione o trasporto delle singole celle;

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di moduli fotovoltaici, facenti parte dell'impianto in analisi, che presentano questa tipologia di difetto.



Figura 5-21: Esempio di cella con una piccola frattura nell'immagine EL del modulo 2_{0235} e relativo ingrandimento

(l'immagine in ingrandimento è ruotata per comodità di visualizzazione)



Figura 5-22: Esempio di celle con piccole fratture nelle immagini EL dei moduli 2_0305 (a sinistra) e 2_0414 (a destra)



Figura 5-23: Esempio di celle con piccole fratture nelle immagini EL dei moduli 1_0044 (a sinistra) e 1_0348 (a destra)

4. Moduli con celle totalmente scure

In questa categoria sono stati inseriti i moduli che presentano celle con una bassissima luminescenza. Tali celle risultano essere scure quindi poco o non del tutto produttive rispetto alle celle circostanti più luminescenti.

Queste tipologie di difetti sono probabilmente da ricondurre ad un cortocircuito delle celle solari oppure ad un errato sorting. Si esclude una disconnessione totale delle celle interessate, in quanto ciò implicherebbe il non funzionamento delle altre celle collegate in serie.

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di moduli fotovoltaici, facenti parte dell'impianto in analisi, che presentano questa tipologia di difetto.



Figura 5-24: Esempio di moduli con luminosità disomogenea tra le celle (modulo 1_0113 a sinistra e modulo 2_0207 a destra)



Figura 5-25: Esempio di moduli con luminosità disomogenea tra le celle (modulo 1_0257 a sinistra e modulo 2_0365 a destra)

5. Moduli con altri difetti riconducibili al processo di fabbricazione delle celle fotovoltaiche

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di moduli fotovoltaici, facenti parte dell'impianto in analisi, che presentano un difetto superficiale del materiale probabilmente dovuto ad una errato processo di cottura delle celle durante la fase di produzione.



Figura 5-26: Esempio di modulo con celle aventi difetti di fabbricazione e relativo ingrandimento (modulo 2_0371)



Figura 5-27: Esempio di moduli con celle aventi difetti di fabbricazione (modulo 2_0305 a sinistra e modulo 2_0354 a destra)

5.6 Conteggio dei difetti

Nella Tabella 5-3 viene riportato il conteggio dettagliato per ogni categoria di difetto, descritta nel paragrafo precedente, per la stringa 1 dell'inverter 1.

Inverter	Stringa	ID modulo	Celle con fratture lungo i busbars	Celle con forte disomogeneità di luminescenza	Celle con piccole fratture	Moduli con altri difetti	Moduli con celle totalmente scure
I1	S1	1_0248	1	1	0	no	sì
I1	S 1	1_0249	0	2	1	no	sì
I1	S 1	1_0252	0	0	0	no	no
I1	S1	1 0253	0	0	0	no	no
I1	S 1	1_0256	0	0	0	no	no
I1	S 1	1_0257	1	1	0	no	sì
I1	S1	1_0260	0	0	0	no	no
I1	S1	1_0262	0	1	0	no	no
I1	S 1	1_0263	0	0	0	no	no
I1	S1	1_0264	0	0	0	no	no

Tabella 5-3: Conteggio difetti per I1S1

Questo approccio è stato adoperato per analizzare ciascun modulo appartenente all'impianto. Durante il conteggio, in alcuni dei moduli analizzati è stata riscontrata la presenza di elementi estranei come foglie, escrementi animali o generica sporcizia che nelle immagini EL possono, in modo fuorviante, essere confusi con generici difetti. La Figura 5-28 ne mostra un esempio.



Figura 5-28: Foglia osservata nello spettro dell'infrarosso (a sinistra) e nel visibile (a destra)

Nella Tabella 5-4 viene riportato il conteggio di celle e moduli per ciascuno inverter.

Inverter	Celle con fratture lungo i busbars	Celle con forte disomogeneità di luminescenza	Celle con piccole fratture	Moduli con altri difetti	Moduli con celle totalmente scure
11	4	6	4	0	16
<i>I2</i>	1	1	5	0	11
<i>I3</i>	1	6	1	0	13
<i>I4</i>	5	5	5	0	9
<i>I5</i>	3	12	1	0	11
16	3	13	5	0	6
17	0	0	0	0	1
18	5	1	6	0	4
19	1	4	2	0	2
110	2	1	1	3	0
<i>I11</i>	9	2	6	3	1
<i>I12</i>	3	2	4	10	4
<i>I13</i>	2	3	4	4	0
<i>I14</i>	22	5	20	6	0

Tabella 5-4: Conteggio difetti per inverter

La Tabella 5-5 riporta invece il conteggio di celle e moduli con problematiche in relazione alla zona spaziale dell'impianto.

Zona	Celle con fratture lungo i busbars	Celle con forte disomogeneità di luminescenza	Celle con piccole fratture	Moduli con altri difetti	Moduli con celle totalmente scure
Lato sud-ovest	14	43	19	0	65
Lato sud-est	9	5	10	0	8
Lato nord-ovest	15	4	13	13	1
Lato nord-est	23	9	22	13	4
TOTALE	61	61	64	26	78

5.7 Applicazione del classificatore sulle foto dell'impianto reale

Tra tutte le foto relative ai moduli appartenenti all'impianto fotovoltaico, oggetto del caso studio analizzato in questo capitolo, sono state selezionate le immagini EL con la più alta risoluzione grafica, dunque riconducibili al secondo giorno di attività. Dei moduli selezionati, sono stati scelti quelli aventi celle rappresentative dei difetti maggiormente riscontrabili in tale impianto fotovoltaico. A causa della non centrata angolazione della camera rispetto all'asse di simmetria dei moduli, è stato necessario correggere l'errore di prospettiva creatosi durante gli scatti. Non è stata possibile applicare la procedura di tale correzione, proposta nel paragrafo 2.1, per via del fatto che la modalità automatica del software utilizzato, ovvero ShiftN, non è compatibile con immagini troppo distorte, come nel caso in questione (v. Figura 5-29).



Figura 5-29: Esempi di immagini troppo distorte

Pertanto, è stato corretto l'errore di prospettiva manualmente tramite l'app in Matlab chiamata "*KeystoneCorrector*". In tal modo è stato possibile raddrizzare i moduli selezionando quattro punti di riferimento, ad esempio gli angoli di un modulo, per la correzione.

Una volta ottenute le immagini corrette dei moduli, sono state ritagliate le sole celle di interesse e ne sono stati modificati i parametri di luminosità e contrasto in modo tale da ottenere immagini di celle FV visivamente confrontabili con quelle costituenti il dataset utilizzato per la costruzione dei classificatori in 3.3. In particolare, sono state scelte 15 celle e ad esse è stata applicata la procedura di classificazione presentata nella "prova 9" (v. 3.3.4), ovvero la migliore soluzione ottenuta.

La Tabella 5-6 mostra i risultati ottenuti dall'applicazione del classificatore SVM a tali immagini EL, ovvero non appartenenti al Training Set con la quale tale classificatore è stato allenato, specificando le probabili cause di non corretta classificazione quando necessario.

Esempi di immagini EL di celle FV	Caratteristica principale	Classe assegnata dal classificatore	Esito	Possibili cause d'errore
	Imperfezioni nel materiale	B_Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile	8	
	Crack	E_Celle aventi crack	$\mathbf{>}$	
	Crack	E_Celle aventi crack		
	Crack	E_Celle aventi crack		
	Crack	E_Celle aventi crack	0	
	Cella priva di difetti	A_Celle prive di difetti		
	Luminosità variabile	B_Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile	>	

	Crack	E_Celle aventi crack		
	Crack	E_Celle aventi crack	0	
	Crack	E_Celle aventi crack	0	
	Crack	E_Celle aventi crack	0	
	Crack	B_Celle aventi imperfezioni nel materiale, microcracking e/o luminosità variabile		La cella presenta una frattura localizzata in un angolo, dunque facilmente confondibile con il tipico ritaglio di celle monocristalline; in questo caso la frattura non viene identificata come tale.
- 1.	Imperfezioni nel materiale	E_Celle aventi crack	×	Il difetto di fabbricazione (v. Figura 5-26 e Figura 5-27) si presenta con piccole macchie di una tonalità di nero simile a quella delle porzioni di celle inattive tipiche delle celle aventi crack rilevanti.

	Cella priva di difetti	E_Celle aventi crack	×	La foglia posata sulla superficie della cella appare nell'immagine EL come una porzione di cella inattiva.
6	Cella priva di difetti	E_Celle aventi crack	×	La foglia posata sulla superficie della cella appare nell'immagine EL come una porzione di cella inattiva.

Tabella 5-6: Risultati dell'applicazione del classificatore della "prova 9" alle immagini di un impianto reale

6 Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi sono state proposte due diverse procedure, basate dell'elettroluminescenza, sulla tecnica diagnostica per l'identificazione parzialmente automatizzata dei difetti presenti nei moduli fotovoltaici. Nella prima parte, avendo a disposizione immagini ad elettroluminescenza di 32 moduli fotovoltaici con un'alta risoluzione, essendo foto scattate con una strumentazione da laboratorio adeguata, è stato possibile automatizzare gli step principali per un'accurata diagnostica dei moduli. Dopo il pre-processing delle immagini, ovvero la regolazione di luminosità e contrasto e la correzione della prospettiva, è stato creato uno script in Matlab avente lo scopo di suddividere le immagini EL in quelle relative a ciascuna singola cella costituente il modulo stesso. In seguito, sono stati proposti due metodi per la realizzazione di una classifica delle celle costituenti un dato modulo; dalla cella con una maggior presenza di difetti/fratture alla cella più sana. Gli approcci sono basati rispettivamente sul conteggio dei pixel e sulla somma dei valori dei pixel al di sotto di una soglia, ovvero i pixel rappresentativi delle zone più scure associabili ad eventuali difetti. Per riuscire ad ottenere un'adeguata classificazione delle immagini delle celle fotovoltaiche, distinguendole in base alla tipologia di difetto presente, svincolata dalla variabilità inter- ed intra-operatore legata alla scelta delle soglie più adatte ai casi, si è optato per l'implementazione di un classificatore. È stato presentato il metodo con la quale creare, allenare e testare, tramite il software Matlab, una macchina a vettori di supporto (SVM, dall'inglese Support-Vector Machines); il più utilizzato algoritmo di apprendimento supervisionato utilizzato per la classificazione. È stato utilizzato un dataset di immagini ricavato dalla suddivisione in singole celle di 32 moduli attraverso lo script precedentemente citato (2220 immagini EL totali). Sono stati riportati i risultati di simulazioni diverse tra loro per via del criterio di ripartizione delle immagini nelle diverse classi di esempio relative alla tipologia di difetto con la quale allenare il classificatore. È stato possibile variare sia il tipo di approccio da utilizzare per la classificazione multiclasse (One-to-Rest oppure One-To-One), sia le funzioni Kernel (Lineare, Gaussiana RBF, Polinomiale) ovvero funzioni di similarità tramite la quale l'algoritmo riesce a identificare feature simili tra immagini appartenenti alla stessa classe. I risultati ottenuti dalla "prova 9" dimostrano che il classificatore identifica correttamente le celle con un'accuratezza

globale dell'84% rispetto alle celle totali. In questo caso, per tutte le classi proposte, ovvero le tipologie di difetti, si ha sempre un'accuratezza maggiore del 72%. Tali risultati, relativi ad un classificatore SVM One-to-Rest con Kernel polinomiale di grado 3, sono i migliori ottenuti tra tutte le simulazioni effettuate. Tale classificatore è stato successivamente testato con immagini estranee al dataset utilizzato per il training Set, ovvero immagini EL di celle, opportunatamente ritagliate, appartenenti a moduli di un impianto reale. Un miglioramento futuro potrebbe essere quello di riuscire a perfezionare il classificatore in maniera tale da riconoscere contemporaneamente più difetti; per far ciò il dataset dovrà sicuramente essere ampliato. Sono stati proposti approcci per la correlazione dei principali parametri elettrici ottenibili dalle curve I-V con le immagini ad elettroluminescenza. Si è visto che parametri come la potenza massima, l'efficienza e lo scarto percentuale tra i valori misurati e quelli forniti dal costruttore sia di corrente che di potenza potrebbero essere correlati con la bassa luminescenza caratteristica di fratture e difetti significativi in termini di performance. Nella seconda parte del presente lavoro, è stata presentata la procedura per la diagnostica di un impianto fotovoltaico reale istallato a Milano. Rispetto alle immagini EL da laboratorio, le problematiche che si presentano sul campo possono essere una scarsa risoluzione dell'immagine dovuti a fattori esterni e l'impossibilità di effettuare gli scatti in maniera perpendicolare al soggetto; immagini troppo distorte non facilitano il riconoscimento delle stesse. Infatti, la bassa risoluzione e l'errore di prospettiva troppo elevato delle immagini EL a disposizione, relative ai 532 moduli costituenti l'impianto, non hanno permesso l'implementazione della procedura di ritaglio e classificazione proposta nella prima parte. È consigliabile l'utilizzo di un drone assemblato con una camera idonea per effettuare gli scatti, poiché diventa più fattibile lavorare su terreni difficili e con progetti non standard, come per questa attività. Una volta selezionate le foto migliori per ciascun modulo, è stata effettuata una mappatura dell'impianto in modo tale da localizzare facilmente i moduli con difetti. Per una migliore visualizzazione delle immagini è stata applicata una procedura semiautomatica per la correzione di parametri come luminosità e contrasto delle immagini maggiormente sfocate. È stata svolta, in seguito, un'attività manuale di identificazione e conteggio dei difetti maggiormente riscontrati nei moduli dell'impianto descrivendo le diverse tipologie e analizzando le loro possibili cause.

7 Bibliografia

- 1. Weber T, Berghold J, Ag PIPB. Outdoor electroluminescence imaging of crystalline photovoltaic modules: comparative study between manual ground-level inspections and drone-based aerial surveys. 2016;(September).
- Ciocia A, Carullo A, DI Leo P, Malgaroli G, Spertino F. Realization and Use of an IR Camera for Laboratory and On-field Electroluminescence Inspections of Silicon Photovoltaic Modules. Conf Rec IEEE Photovolt Spec Conf. 2019;2734–9.
- Frazão M, Silva JA, Lobato K, Serra JM. Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera. Meas J Int Meas Confed. 2017;99(December):7–12.
- 4. Lockridge BP, Lavrova O, Hobbs WB, Equipment A. Comparison of Electroluminescence Image Capture Methods. 2016;876–9.
- 5. Parlani M. Tesi di laurea magistrale. "Analisi sperimentale della degradazione di moduli fotovoltaici su un impianto di grande potenza." 2014.
- Yang H, Chang J, Wang H, Song D. Power degradation caused by snail trails in urban photovoltaic energy systems. Energy Procedia [Internet]. 2016;88:422–8. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.018
- Abdellatif B, Charaf H, Ahmed AM, Abdellatif G, Messaoudi C, Houssain Z, et al. Experimental evaluation of performance drop for crystalline photovoltaic modules affected by snail trails defect. PVCon 2018 - Int Conf Photovolt Sci Technol. 2018;
- 8. Köntges M, Kurtz S, Packard CE, Jahn U, Berger K, Kato K, et al. Review of Failures of Photovoltaic Modules. IEA-Photovoltaic Power Systems Programme. 2014. 1–140 p.
- Oh J, Dahal S, Dauksher B, Bowden S, Tamizhmani G, Hacke P. A novel technique for performing PID susceptibility screening during the solar cell fabrication process. 2017 IEEE 44th Photovolt Spec Conf PVSC 2017. 2017;1–4.

- 10. Multiclass Classification Using Support Vector Machines [Internet]. Available from: https://www.baeldung.com/cs/svm-multiclass-classification
- 11. Algoritmo Support Vector Machine | Lorenzo Govoni [Internet]. Available from: https://lorenzogovoni.com/support-vector-machine/
- Brownlee J. One-vs-Rest and One-vs-One for Multi-Class Classification [Internet]. Machinelearningmastery. 2020. Available from: https://machinelearningmastery.com/one-vs-rest-and-one-vs-one-for-multiclass-classification/
- Valentini G. Introduzione ai metodi kernel. DSI Università degli Studi di Milano. p. 1–13.
- 14. Data Flair. Kernel Functions-Introduction to SVM Kernel & Examples [Internet]. Data Flair. 2021. Available from: https://data-flair.training/blogs/svm-kernel-functions/
- 15. Souza C. Kernel Functions for Machine Learning Applications | Cesar Souza [Internet]. 2010. p. 1–23. Available from: http://crsouza.com/2010/03/kernel-functions-for-machine-learningapplications/
- 16. Fada JS, Loach AJ, Curran AJ, Braid JL, Yang S, Peshek TJ, et al. Correlation of I-V Curve Parameters with Module-Level Electroluminescent Image Data Over 3000 Hours Damp-Heat Exposure. 2018;2697–701.
- Wendt J, Träger M, Mette M, Pfennig A, Jaeckel B. The Link Between Mechanical Stress Induced By Soldering And Micro Damages In Silicon Solar Cells. 24th EU Photovolt Spec Conf. 2009;3420–3.
- Spertino F, Ciocia A, Di Leo P, Tommasini R, Berardone I, Corrado M, et al. A power and energy procedure in operating photovoltaic systems to quantify the losses according to the causes. Sol Energy [Internet]. 2015;118. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.033
- 19. Murgia D. Tesi di laurea magistrale. "Tecniche per l'identificazione dei difetti e per l'analisi delle performance nei moduli fotovoltaici." 2018.

8 Appendice

8.1 Script per il ritaglio in Matlab

Questo script prende in input una foto di un pannello fotovoltaico scattata in laboratorio la cui prospettiva è stata precedentemente corretta (è consigliato utilizzare ShiftN come nel caso di esempio). Lo script divide il pannello nelle singole celle che lo compongono e ne calcola un diagramma delle frequenze della scala di grigi. L'output è costituito da una prima cartella contenente le immagini delle singole celle e da una seconda cartella contenente i relativi istogrammi.

```
%% Input
numeroModulo=1;
interesse
```

```
%numero del modulo di
interesse
%cambiare percorso in base al modulo di interesse
I=imread('Moduli con prospettiva corretta/modulo1 ShiftN.jpg');
Righe= 10;
                   %numero di righe di celle del pannello
Colonne= 6;
                   %numero di colonne di celle del pannello
mkdir Celle Singole Modulo 1
                                     %cambiare numero del modulo
per creare cartella contenente le singole celle
mkdir Istogrammi Modulo 1
                                     %cambiare numero del modulo
per creare cartella contenente gli istogrammi di ciascuna cella
pixelConnessi = 4300;
                                     %soglia di pixel bianchi
connessi da eliminare sullo sfondo
percentualeAreaTagliataCella = 0.86; %soglia massima di ritaglio
della cella (se l'algoritmo taglia eccessivamente, restituisce
l'immagine originale)
                                     %valore di riduzione della
valoreScurimento = 30;
luminosità nel caso l'immagine originale della cella non venga
tagliata
%% Eliminazione sfondo
%Trasforma immagine in scala di grigi
grayImage = rgb2gray(I);
 %Chiama la funzione personalizzata cropImage che ritaglia il
pannello dall'immagine originale
panel = cropImage(grayImage, pixelConnessi);
```

```
%Mostra confronto tra immagine originale e pannello ritagliato
figure
subplot(1,2,1)
imshow(I)
title('Immagine originale')
subplot(1,2,2)
imshow(panel)
title('Immagine ritagliata')
hold on
%% Divisione in celle
%La divisione viene effettuata dividendo l'immagine per il numero
di riqhe
%e colonne del pannello specificate in input
[altezza, larghezza] = size(panel); %Ottiene le dimensioni
dell'immagine
cellSizeR = ceil(altezza/Righe);
                                       %Calcola l'altezza della
singola cella
cellSizeC = ceil(larghezza/Colonne);
                                       %Calcola la larghezza della
singola cella
%Calcola i vettori contenenti il numero di righe e colonne di ogni
cella
%per dividere il pannello.
%Il numero di pixel di altezza e larghezza dell'immagine originale
non è
%necessariamente divisibile per il numero di righe e colonne di
celle
%specificate in input, dunque l'ultimo blocco viene calcolato come
resto
%della divisione tra il numero di righe totali e quello della
singola cella
numeroCelleCompleteR = floor(altezza / cellSizeR);
vettoreRigheCelle = [cellSizeR * ones(1, numeroCelleCompleteR),
rem(altezza, cellSizeR)];
numeroCelleCompleteC = floor(larghezza / cellSizeC);
vettoreColonneCelle = [cellSizeC * ones(1, numeroCelleCompleteC),
rem(larghezza, cellSizeC)];
%Divide il pannello in una matrice contenente sotto-matrici
corrispondenti
%ad ogni singola cella del modulo
matriceSingoleCelle = mat2cell(panel, vettoreRigheCelle,
vettoreColonneCelle);
figure('Name', 'Pannello diviso in celle')
plotIndex = 1; %indice per la visualizzazione delle celle su
matlab e per i nomi da salvare
```

```
for r = 1 : Righe
    for c = 1 : Colonne
        cell = matriceSingoleCelle{r,c}; %estrae la matrice di una
cella
        %Rimuove i bordi in eccesso della cella
        %l'operazione viene eseguita più volte per aumentare la
precisione
        croppedCell = findCroppedImage(cell,
percentualeAreaTagliataCella, pixelConnessi, valoreScurimento);
        croppedCell = findCroppedImage(croppedCell,
percentualeAreaTagliataCella, pixelConnessi, valoreScurimento);
        croppedCell = findCroppedImage(croppedCell,
percentualeAreaTagliataCella, pixelConnessi, valoreScurimento);
        %Determina il percorso ed il nome dell'immagine della
cella da salvare
        filename=sprintf('Celle Singole/Modulo %d/Cell %02d.jpg',
numeroModulo, plotIndex);
        imwrite(croppedCell,filename) %salva l'immagine della
cella
        subplot(Righe, Colonne, plotIndex); %mostra le celle
        imshow(croppedCell);
        drawnow;
        plotIndex = plotIndex + 1;
    end
end
%% Diagramma delle frequenze della scala dei grigi
%Ricava il percorso della cartella in cui sono state salvate le
immagini
%delle singole celle
cartellaImmaginiCelle = sprintf('/Celle Singole/Modulo %d/',
numeroModulo);
percorsoImmaginiCelle = strcat(pwd, cartellaImmaginiCelle);
%Ottiene una lista di tutti i file nella cartella che
corrispondono
% al pattern specificato
filePattern = fullfile(percorsoImmaginiCelle, '*.jpg');
theFiles = dir(filePattern);
figure(3)
for k = 1 : length(theFiles)
    %Ricava il percorso dell'immagine da leggere
    baseFileName = theFiles(k).name;
    fullFileName = fullfile(theFiles(k).folder, baseFileName);
```

```
%Visualizza nella console quale immagine sta leggendo
    fprintf(1, 'Now reading %s\n', fullFileName);
    %Apre l'immagine
    cellImage = imread(fullFileName);
    %Crea il percorso e il nome con cui salvare l'istogramma di
ogni cella
    fileName = sprintf('Istogrammi/Modulo %d/Istogramma %02d.jpg',
numeroModulo, k);
    %Calcola e visualizza l'istogramma
    figure(3)
     fig =
histogram(cellImage, 'Normalization', 'probability', 'BinWidth', 1);
     xlabel('Scala di grigi')
     ylabel ('Area percentuale')
     title('Diagramma delle frequenze')
     saveas(fig, fileName);
end
%% Funzioni
% findCroppedImage chiama la funzione che effettua il ritaglio e
ne
% controlla il risultato: se il ritaglio è eccessivo (soglia
determinata
% dall'utente tramite percentualeAreaTagliata) allora restituisce
% l'immagine di partenza; se non viene effettuato alcun ritaglio,
procede
% scurendo l'immagine della cella e provando nuovamente a
ritagliare
% (perché questa procedura migliora il riconoscimento di alcune
celle).
function [croppedImageFinal] = findCroppedImage(grayImage,
percentualeAreaTagliata, pixelConnessi, valoreScurimento)
    %Ottiene immagine tagliata
    croppedImageFinal = cropImage(grayImage, pixelConnessi);
    %Se l'immagine tagliata risulta avere dimensioni troppo
inferiori
    %rispetto all'originale allora mantiene quest'ultima
    if size(croppedImageFinal,1) <</pre>
(percentualeAreaTagliata*size(grayImage,1)) ||
size(croppedImageFinal,2) <</pre>
(percentualeAreaTagliata*size(grayImage,2))
        croppedImageFinal = grayImage;
    end
```

```
%Se l'immagine non è stata tagliata la scurisce e prova
nuovamente.
    Scurendo l'immagine è possibile che i pixel più scuri
saturino a O
    %rendendo impossibile un successivo ritorno alla luminosità
originale,
    %pertanto è necessario passare come parametro anche l'immagine
di
    %partenza su cui verrà effettuato il ritaglio basato
sull'immagine scura.
    if size(croppedImageFinal,1) == size(grayImage,1) &&
size(croppedImageFinal,2) == size(grayImage,2)
        grayImageDark = grayImage - valoreScurimento;
        croppedImageFinal = cropImageDark(grayImage,
grayImageDark, pixelConnessi);
        if size(croppedImageFinal,1) <</pre>
(percentualeAreaTagliata*size(grayImage,1)) ||
size(croppedImageFinal,2) <</pre>
(percentualeAreaTagliata*size(grayImage,2))
            croppedImageFinal = grayImage;
        end
    end
end
%Funzione che elimina lo sfondo dal soggetto
function [croppedImage] = cropImage(grayImage, pixelConnessi)
    %Trasforma immagine in binaria (0 e 1)
   binaryImage=imbinarize(grayImage);
    %Migliora il riconoscimento dell'immagine riempendo eventuali
aree di pixel
    %neri all'interno della stessa
   binaryImage noHoles=imfill(binaryImage, 'holes');
    %Elimina eventuali pixel bianchi sullo sfondo
   binaryImage final=bwareaopen(binaryImage noHoles,
pixelConnessi);
    %Trova le prime e le ultime righe e colonne contenenti pixel
bianchi,
    %ovvero i bordi del soggetto
    [r,c]=find(binaryImage final);
    topRow = min(r(:));
   bottomRow = max(r(:));
    leftColumn = min(c(:));
    rightColumn = max(c(:));
    %Utilizza le righe e le colonne calcolate sopra per ritagliare
```

```
124
```

il soggetto

```
%dall'immagine originale
    croppedImage = grayImage(topRow:bottomRow,
leftColumn:rightColumn);
end
% cropImageDark è identica nel funzionamento a cropImage ma viene
% utilizzata per le immagini scurite.
function [croppedImage] = cropImageDark(grayImage, grayImageDark,
pixelConnessi)
    %Trasforma immagine in binaria (0 e 1)
   binaryImage=imbinarize(grayImageDark);
    %Migliora il riconoscimento dell'immagine riempendo eventuali
aree di pixel
    %neri all'interno dello stesso
    binaryImage noHoles=imfill(binaryImage, 'holes');
    %Elimina eventuali pixel bianchi sullo sfondo
    binaryImage final=bwareaopen(binaryImage noHoles,
pixelConnessi);
    %Trova le prime e le ultime righe e colonne contenenti pixel
bianchi,
    %ovvero i bordi del soggetto
    [r,c]=find(binaryImage final);
    topRow = min(r(:));
    bottomRow = max(r(:));
    leftColumn = min(c(:));
    rightColumn = max(c(:));
    %Utilizza le righe e le colonne calcolate sopra per ritagliare
il soggetto
    %dall'immagine originale
    croppedImage = grayImage(topRow:bottomRow,
leftColumn:rightColumn);
end
```

8.2 Script per la classificazione binaria

Questo script permette di classificare le celle all'interno della cartella specificata suddividendole in celle rotte e celle prive di difetti. In output si ottiene una matrice, chiamata "Classifica" la quale riporta al suo interno tutte le sottomatrici relative alla classificazione delle celle ordinate in maniera decrescente in termini di efficienza per ogni valore di soglia possibile. La soglia è calcolata come la percentuale, variabile tra lo 0% e il 100%, del valore di riferimento. In questo modo, è possibile scegliere la classifica più idonea in base alle caratteristiche di luminescenza del modulo analizzato.

```
numModulo = input ('inserire numero modulo: ');
modulo = sprintf('Moduli ritagliati/Modulo%d.jpg', numModulo);
I=imread(modulo);
biancomassimo=double(max(max(I)));
for j=1:100
percentuale=double(j);
cellPath = sprintf('Celle Singole/Modulo %d', numModulo);
setDir = fullfile(pwd, cellPath);
filePattern = fullfile(setDir, '*.jpg');
theFiles = dir(filePattern);
    for k = 1 : length(theFiles)
        %Ricava il percorso dell'immagine da leggere
        baseFileName = theFiles(k).name;
        fullFileName = fullfile(theFiles(k).folder, baseFileName);
        %Apre l'immagine
        cellImage = imread(fullFileName);
        %Trasforma l'immagine della cella in scala di grigi nel
caso in cui fosse a colori
        if ndims(cellImage) == 3
            cellImage=rgb2gray(cellImage);
        end
        [r1,c1]=size(cellImage);
        grandezzaCella=r1*c1;
        cellCount(k)=0;
        soglia=percentuale*biancomassimo/100;
        for z=1:r1
           for s=1:c1
                if cellImage(z,s)<= soglia</pre>
                   %cellCount(k) = 1 + cellCount(k); %Conteggio
dei pixel neri al di sotto della soglia
                   cellCount(k) = int32(cellImage(z,s)) +
cellCount(k);
                %Somma dei pixel neri al di sotto della soglia
                end
           end
        end
        cellCount(k)=cellCount(k)*1000/grandezzaCella;
%Uniformazione tra le celle
        elenco= cellCount;
    end
    elenco=elenco';
    c=1;
```

```
for i=1:k
        elenco(c,2)=elenco(i);
        elenco(c,1)=i;
        c=c+1;
    end
    Classifica{j}=sortrows(elenco, 2, 'descend');
end
```

8.3 Script per la creazione del classificatore SVM in Matlab

Questo script permette di ottenere in output un classificatore SVM allenato sul 70% delle immagini contenute nel dataset ovvero il 'Test Set', in maniera randomica. Inoltre, fornisce la "confusion matrix" del classificatore ottenuta testando il classificatore sul restante 30% delle immagini.

```
testDir = fullfile(pwd, 'Test Set');
                                           %Variabile contenente
il percorso della cartella con le immagini
imds =
imageDatastore(testDir,'IncludeSubfolders',true,'LabelSource',...
    'foldernames');
                                             %Apertura della
cartella e lettura dei file
[trainingSet,testSet] = splitEachLabel(imds,0.7,'randomize');
 %Divisione randomica dei file in TrainingSet e TestSet
bag = bagOfFeatures(trainingSet);
%Estrazione delle features dal TrainingSet
categoryClassifier =
trainImageCategoryClassifier(trainingSet,bag); %Training del
classificatore
confMatrix = evaluate(categoryClassifier,testSet); Stampa in
output la matrice di confusione
```

8.4 Script per l'Implementazione del classificatore su Matlab

Questo script fornisce in output gli esiti del classificatore che si vuole implementare per ciascuna immagine contenuta nella specifica cartella; ogni cella viene etichettata con una classe a seconda del criterio di classificazione fornito.

```
load categoryClassifier.mat
setDir = fullfile(pwd, 'testModulo_1');
filePattern = fullfile(setDir, '*.jpg');
theFiles = dir(filePattern);
cellEvaluation = cell(length(theFiles),1);
for k = 1 : length(theFiles)
    %Ricava il percorso dell'immagine da leggere
    baseFileName = theFiles(k).name;
    fullFileName = fullfile(theFiles(k).folder, baseFileName);
    %Apre l'immagine
    cellImage = imread(fullFileName);
    [labelIdx, score] = predict(categoryClassifier,cellImage);
    cellEvaluation(k,1) = categoryClassifier.Labels(labelIdx);
end
```

Ringraziamenti

Vorrei dedicare queste ultime righe per ringraziare tutte le persone che in questi anni hanno sempre creduto in me e che mi hanno sostenuto in ogni momento.

Inizio col ringraziare il Prof. Paolo Di Leo per avermi dato l'opportunità di svolgere questo impegnativo ma interessante lavoro di tesi sperimentale permettendo di immergermi nell'affascinante mondo dell'elettroluminescenza.

Ringrazio l'Ing. Alessandro Ciocia per la sua fiducia, professionalità, disponibilità, e pazienza; elementi indispensabili per il corretto conseguimento del lavoro svolto in questi mesi.

Vorrei soprattutto ringraziare la mia famiglia, per avermi permesso di intraprendere la carriera dei miei sogni, per gli estenuanti sacrifici compiuti durante questi lunghi e difficili anni che non mi hanno fatto mai mancare un adeguato sostegno economico, per avermi regalato tutto l'amore possibile, per essere stata la mia roccia di appoggio nei momenti difficili, per avermi fatto sentire sempre a Casa, per tutti gli abbracci, gli sfoghi, le chiamate, i rimproveri, i regali, e per avermi reso quello che sono oggi.

Un grazie speciale va a te, Sofia, per credere sempre in me più di chiunque altro, per l'esagerato amore e l'entusiasmo che mi dimostri nello starmi accanto ogni giorno, per sostenermi e accettarmi come solo tu sei in grado di fare, per tutto il tuo aiuto in tutto, per essere ed essere stata la mia vera forza.

Desidero inoltre ringraziare tutti gli amici con cui ho trascorso gli "anni più belli", ognuno dei quali ha dato il suo unico e prezioso contributo per la mia crescita personale. Sono fiero e fortunato ad aver avuto accanto persone come voi. In particolare, ringrazio Alessandro e Nicola, ormai fratelli, per avermi sempre aiutato, per avermi regalato un sorriso nei momenti giusti, per essere stati la mia seconda casa.