# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e nucleare

# Tesi di Laurea Magistrale

Utilizzo di droni e robot negli impianti di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile



**Relatore**Prof. Filippo Spertino

**Candidato**Dario Matranga

Anno accademico 2018/2019

#### **Presentazione**

Il seguente elaborato è stato sviluppato presso gli uffici di Enel Green Power, azienda leader nella produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

I notevoli progressi compiuti negli ultimi anni dall'industria della robotica hanno dato un forte impulso alla diffusione di droni e robot, con un conseguente aumento delle applicazioni di tali tecnologie nei più svariati ambiti, sia industriali che civili. Tutte le indagini compiute su tale settore prevedono che il trend sia confermato nei prossimi anni grazie a tassi di crescita previsti a doppia cifra per il prossimo decennio e investimenti sempre più ingenti da parte dei principali fondi mondiali e delle industrie leader nel settore.

Tra le applicazioni più interessanti di droni e robot si riconosce la possibilità di inserire tali tecnologie a supporto delle fasi di progettazione, costruzione, esercizio e manutenzione degli impianti di produzione di energia elettrica. A tal proposito, in Enel Green Power è stato intrapreso un lungo processo di 'robotizzazione' al fine di sfruttare i vantaggi che queste tecnologie offrono in termini economici, di efficienza operativa, rapidità di esecuzione e sicurezza.

Nel seguente studio è stata concentrata l'attenzione sull'utilizzo delle suddette tecnologie nelle principali operazioni di Operation&Maintenance condotte negli impianti di produzione di potenza da fonte rinnovabile, ponendo l'accento sulla tecnologia solare, sui sistemi eolici e sugli impianti idroelettrici.

Nella prima parte si sono riportati brevi cenni storici sulla nascita dei robot e le tendenze previste per gli anni futuri per quanto riguarda la crescita di tali tecnologie e la sempre più capillare diffusione dei sistemi di generazione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

Sono stati discussi i principi di funzionamento e gli elementi costruttivi delle tecnologie analizzate, riportando inoltre alcune tra le principali attività svolte durante l'esercizio e la manutenzione degli impianti e le possibili soluzioni robotizzate che possono essere introdotte in sostituzione delle metodologie tradizionali.

In seguito, sono state eseguite delle valutazioni economiche riguardanti l'introduzione di droni e robot in alcune operazioni del settore O&M.

Dall'analisi preliminare si è quindi passati al monitoraggio delle prestazioni in campo delle soluzioni proposte, constatando i risultati ottenuti grazie ad un approccio di tipo strategico e centralizzato della gestione del processo di automazione e digitalizzazione delle attività svolte.

# Indice

1	Sce	enario	8
	1.1	Nascita e sviluppo dei robot	8
	1.2	Produzione di energia da fonte rinnovabile	11
2	Dro	oni e robot nelle operazioni di O&M in impianti di produzione da fonte rinnovabil	le. 14
	2.1	Impianti fotovoltaici	14
	2.1	.1 Principio di funzionamento	14
	2.1	.2 Moduli e impianti fotovoltaici	16
	2.1	.3 O&M nei sistemi fotovoltaici	18
	2	2.1.3.1 Ispezioni visive	18
	2	2.1.3.2 Caratteristica I-U	20
	2	2.1.3.3 Elettroluminescenza	22
	2	2.1.3.4 Termografia	22
	2.1	.4 Droni e robot negli impianti fotovoltaici	25
	2	2.1.4.1 Droni	25
	2	2.1.4.2 Cleaning machine	28
	2	2.1.4.3 Robot tagliaerba	31
	2.2	Impianti eolici	32
	2.2	.1 Principio di funzionamento	32
	2.2	.2 Cenni di aerodinamica della pala	36
	2.2	.3 Elementi costitutivi degli aerogeneratori	38
	2.2	.4 O&M negli impianti eolici	40
	2.2	.5 Principali anomalie e modalità di ispezione delle pale eoliche	42
	2.2	.6 Droni e robot negli impianti eolici	46
	2.3	Impianti idroelettrici	52

	2.3	3.1	Principio di funzionamento e cenni sulle turbine utilizzate	. 52
	2.3	3.2	Classificazione degli impianti ed elementi costitutivi	. 57
	2.3	3.3	Droni e robot negli impianti idroelettrici	. 60
3	Va	lutaz	ioni economiche	. 65
	3.1	Me	todologia	. 65
	3.2	Inse	ourcing vs outsourcing	. 67
	3.3	Ispo	ezioni manuali vs ispezioni robotizzate	. 69
	3.4	Ну	dro	. 70
	3.4	<b>l</b> .1	Droni	. 70
	3.4	1.2	Robot subacquei	. 74
	3.5	Wi	nd	. 79
	3.5	5.1	Droni	. 79
	3.5	5.2	Robot scalatore per aerogeneratori	. 82
	3.6	Sol	ar	. 83
	3.6	5.1	Droni	. 83
	3.6	5.2	Cleaning machine	. 85
	3.7	Val	utazioni complessive	. 86
4	Il p	orogr	amma RoBoost	. 88
	4.1	Obi	ettivi	. 89
	4.2	Mo	nitoraggio dei risultati ottenuti	. 90
	4.3	Evo	oluzioni future	. 92
5	Co	nalu	sioni	94

# Indice delle figure

Figura 1-1 Unimate robot	8
Figura 1-2 - Braccia meccaniche Comau. Stabilimento Maserati. Grugliasco, TO	9
Figura 1-3 - Incremento mercato della robotica	10
Figura 1-4 - Market forecast	10
Figura 1-5 - Crescita nelle diverse aree del globo	11
Figura 1-6 - Generazione di potenza per tecnologia. Bloomberg New Energy Outlook 2019	9 12
Figura 1-7 - Produzione da solare ed eolico	13
Figura 2-1 - Struttura cella solare in silicio cristallino	15
Figura 2-2 - Circuito equivalente cella solare	16
Figura 2-3 - Composizione generatore PV	17
Figura 2-4 - Diodi di protezione	17
Figura 2-5 - Esempio di hot spot	19
Figura 2-6 - Cella in condizioni ottimali vs cella con problema di delamination	19
Figura 2-7 - Esempi di junction failures	19
Figura 2-8 - Funzionamento cella fotovoltaica	20
Figura 2-9 - Caratteristiche I(U) e P(U)	21
Figura 2-10 - Cricche individuate con elettroluminescenza	22
Figura 2-11 - Esempio di termografia in celle con vetro frontale rotto	23
Figura 2-12 - Esempio di termografia in celle con difetti interni	24
Figura 2-13 - Esempio di termografia in cella con ombreggiamento locale	24
Figura 2-14 - Esempio di termografia su junction box affetta da surriscaldamento	24
Figura 2-15 - Immagine RGB vs Immagine LWIR	27
Figura 2-16 - Linee di flusso ispezione con droni	27
Figura 2-17 - Differenza tra moduli affetti da soiling e moduli puliti	29
Figura 2-18 - Esempi di sistemi di pulizia di pannelli fotovoltaici	30

Figura 2-19 - Esempio di 'cleaning machine'	31
Figura 2-20 - Esempio di robot tagliaerba	31
Figura 2-21 - Modello della teoria del disco attuatore	33
Figura 2-22 - Andamento di velocità e pressione nel tubo di flusso	34
Figura 2-23 - Esempio di curva caratteristica	35
Figura 2-24 - Famiglia di curve di potenza meccanica in funzione della velocità angol pale	
Figura 2-25 - Schematizzazione profilo alare pala eolica	36
Figura 2-26 - Esempio di aerogeneratore ad asse orizzontale	38
Figura 2-27 - Principali componenti di un impianto di produzione da fonte eolica	40
Figura 2-28 - Principali difetti riscontrabili in una pala eolica	43
Figura 2-29 - Rappresentazione processo di rilevamento acustico	44
Figura 2-30 - Esempio di termografia di una pala eolica	45
Figura 2-31 - Esempio di tecnica di acquisizione immagini	46
Figura 2-32 - Esempio di ispezione su corda	47
Figura 2-33 - Ispezione turbina eolica con drone	48
Figura 2-34 - Esempio di classificazione delle anomalie riscontrate	50
Figura 2-35 - Esempio di visuale con identificazione dell'anomalia	50
Figura 2-36 - Esempi di robot per applicazioni eoliche	51
Figura 2-37 - Schema semplificato di un sistema idroelettrico	53
Figura 2-38 - Turbina Pelton	56
Figura 2-39 - Turbina Francis	56
Figura 2-40 - Turbina Kaplan	57
Figura 2-41 - Impianto ad acqua fluente	58
Figura 2-42 - Impianto a serbatoio	59
Figura 2-43 - Modello BlueROV2	61

Figura 2-44 - Immagine catturata da un robot ROV. Fonte: ROV Innovations	61
Figura 2-45 - Esempio di immagine ottenuta con radar SONAR	62
Figura 2-46 - Ispezione diga con drone e ricostruzione digitale. Fonte:Italdrone	63
Figura 3-1 - Da sx a dx: DJI Matrice 600 Pro e Zenmuse Z30	71
Figura 3-2 - Andamento VAN droni Hydro	73
Figura 3-3 - Studio parametrico su IRR droni Hydro	74
Figura 3-4 - Andamento VAN caso 1	76
Figura 3-5 - Andamento VAN caso 2	77
Figura 3-6 - Parametrizzazione blueROV	78
Figura 3-7 - Andamento VAN wind	80
Figura 3-8 - Parametrizzazione wind	81
Figura 3-9 - Robot scalatore	82
Figura 3-10 - Andamento VAN droni Solar	84
Figura 3-11 - Esempio cleaning machine	85
Figura 3-12 - Ripartizione per tecnologia	86
Figura 4-1 - Capacità installata EGP	88
Figura 4-2 - Esempio di smart glasses	92

# Indice delle tabelle

Tabella 2-1 - Difetti riscontrabili attraverso ispezione visiva	18
Tabella 3-1 - Riassunto CapEX droni Hydro	72
Tabella 3-2 - Riassunto OpEX – droni Hydro	72
Tabella 3-3 - Riassunto CapEX BlueROV	75
Tabella 3-4 - Riassunto OpEX caso 1	75
Tabella 3-5 - Riassunto OpEX caso 2	76
Tabella 3-6 - Riassunto CapEX wind	79
Tabella 3-7 - Riassunto OpEX Wind	80
Tabella 3-8 - Riassunto savings	86

#### 1 Scenario

In questo capitolo sono state riportate le tendenze dei valori di mercato, degli investimenti e della diffusione riguardanti le due tecnologie oggetto dell'elaborato.

I dati dimostrano come sia i robot che gli impianti di produzione di energia da fonte rinnovabile siano tecnologie in forte ascesa e le cui previsioni di crescita non sembrano, al momento, conoscere soluzioni di discontinuità. Ciò porta inevitabilmente alla nascita di nuove applicazioni che, sotto svariati aspetti, si traducono nello sfruttamento di robot e droni nel settore della produzione di energia cosiddetta 'pulita'.

#### 1.1 Nascita e sviluppo dei robot

Il termine robot viene utilizzato per la prima volta nel 1920 dallo scrittore ceco Karel Capek nella sua opera teatrale RUR. L'autore conia il neologismo con riferimento al termine ceco *robota*, che significa letteralmente lavoro, per indicare gli automi di forma umanoide che si ribellano al padrone per rivendicare la propria libertà.

L'uomo che però viene considerato il 'padre' o 'profeta' della robotica è il romanziere Isaac Asimov, il quale con i suoi racconti impone il paradigma del robot umanoide, programmato per servire e proteggere l'uomo, e se si guarda alla definizione che, ai giorni nostri, viene data al termine robot si riconosce la 'profezia' di Asimov. Un robot è infatti "una macchina programmabile, autonoma o semi autonoma, capace di svolgere una serie di compiti al fianco o in sostituzione dell'uomo. Può eseguire mansioni esclusivamente meccaniche e ripetitive oppure adeguare il proprio comportamento all'ambiente circostante, imparando dall'esperienza quasi come un essere umano."

Il primo robot dell'era moderna viene introdotto in ambito industriale all'inizio degli anni Sessanta. Si tratta di Unimate, un braccio meccanico specializzato nella saldatura delle scocche delle automobili.



Figura 1-1 Unimate robot

Lo sviluppo tecnologico ha inevitabilmente aperto le porte a soluzioni e applicazioni inimmaginabili negli anni Sessanta del secolo scorso e, probabilmente, impensabili anche per la fervida immaginazione di Asimov. Ad oggi molti robot sono in grado di svolgere compiti i

più svariati e meglio di quanto l'uomo non sia in grado di fare, assicurando maggiore precisione e accuratezza. Essi sono in grado di operare in ambienti estremi a basse o alte temperature, in assenza di luce o aria pulita. Milioni di braccia meccaniche, come quelle riportate in Figura 1-2, 'pronipoti' più evoluti di Unimate, sono state costruite e adottate come parte integrante della catena di produzione nei più svariati campi industriali.



Figura 1-2 - Braccia meccaniche Comau. Stabilimento Maserati. Grugliasco, TO

L'utilizzo di robot garantisce benefici in un ampio campo di applicazioni, garantendo un incremento di produttività ed efficienza. I principali vantaggi che si riscontrano sono:

- 1. Riduzione dei costi operativi;
- 2. Migliore qualità del prodotto;
- 3. Migliore qualità del lavoro per gli operai;
- 4. Maggiore produttività;
- 5. Maggiore flessibilità;
- 6. Riduzione degli scarti di produzione;
- 7. Maggiore sicurezza;
- 8. Minori costi capitali.

I punti appena elencati e lo sviluppo di applicazioni in diversi campi industriali, sono le motivazioni alla base del crescente interesse verso questo genere di tecnologie traducibile in un incremento di investimenti e valori di mercato del settore.

Secondo uno studio condotto dalla società Mordor Intelligence, il mercato della robotica si attestava a un valore di 31,78 miliardi di dollari nel 2018 con un CAGR (tasso annuale di crescita) previsto pari al 25% nel periodo 2019-2024.

#### Robotics Market Summary

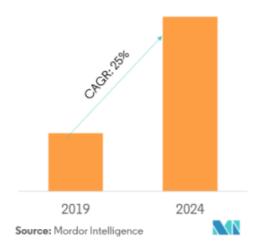


Figura 1-3 - Incremento mercato della robotica

La richiesta di robot per applicazioni industriali ha subito una considerevole accelerazione a partire dal 2010 grazie ai continui sviluppi in termini di soluzioni proposte dalle case produttrici. Non si parla più soltanto di braccia meccaniche ma trovano sempre maggiori applicazioni soluzioni come droni, robot subacquei, esoscheletri, veicoli autonomi ecc.

Una previsione di mercato per quanto riguarda lo sviluppo delle diverse tipologie di robot è stata condotta da IDTechEx con riferimento al lasso temporale 2018 – 2038 e prendendo in considerazione 46 diverse categorie:

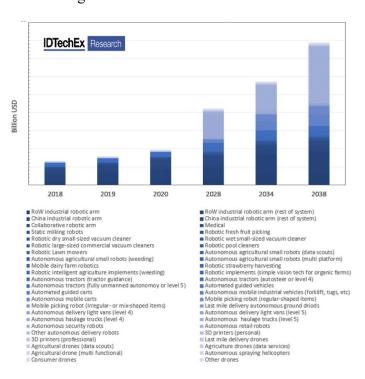


Figura 1-4 - Market forecast

Il dato sicuramente più interessante che può essere estrapolato dal precedente grafico riguarda la decisa crescita prevista per i droni nei prossimi anni, dovuto principalmente alla possibilità di potere utilizzare tale tecnologia nei più svariati campi, dall'agricoltura alla sicurezza, dal settore energy all'immobiliare.

Le previsioni fatte da Mordor Intelligence dimostrano inoltre come lo sviluppo di tali tecnologie interesserà in misura maggiore l'area asiatica, con una notevole crescita in paesi come India, Cina e Australia.

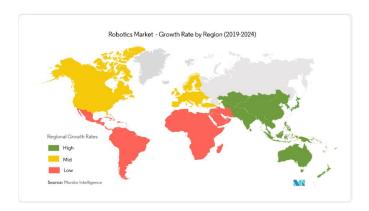


Figura 1-5 - Crescita nelle diverse aree del globo

Puntando invece la lente di ingrandimento sui confini europei, secondo le ultime statistiche Eurostat, il ricorso all'utilizzo di robot industriali o di servizio è in continua crescita nelle imprese. Ricorrono all'automazione industriale l'11% delle aziende in Spagna, il 10% in Danimarca e Finlandia e il 9% in Italia. A trainare la rivoluzione nell'UE sono le grandi imprese, quelle cioè con più di 250 impiegati: una su quattro infatti utilizza robot industriali o di servizio.

I dati e le previsioni appena riportate dimostrano quindi come un forte incremento e una diffusione capillare di robot è prevista per i prossimi anni e in svariati ambiti industriali e non, senza esclusione per quanto riguarda il settore Energy&Utilities.

# 1.2 Produzione di energia da fonte rinnovabile

La riduzione delle emissioni di gas 'clima alteranti' al fine di potere limitare gli impatti negativi sull'ambiente è ormai una necessità più che un tema di attualità. A tal proposito il rapporto presentato 1'8 ottobre 2018 al summit di Incheon-Songdo, in Corea del sud dall'IPCC (Intergovernal Panel On Climate Change), principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici, rappresenta un monito per tutte le nazioni del pianeta.

Il rapporto mostra, da un lato, come le conseguenze sul nostro ecosistema dovute alle eccessive emissioni di  $CO_2$  siano ormai evidenti ma anche che limitare il riscaldamento globale a un

aumento di 1,5 gradi Celsius, al fine di evitare conseguenze irreversibili sul pianeta, sia ancora possibile. Per fare ciò, come riportato nello studio, le emissioni globali devono diminuire di circa il 45% entro il 2030 rispetto ai livelli del 2010, per poi essere totalmente azzerate entro il 2050.

Un tassello fondamentale per potere raggiungere tale obiettivo è sicuramente la conversione del parco mondiale di generazione di energia elettrica da metodi tradizionali, basati sullo sfruttamento di combustibile fossile, alla produzione da fonte rinnovabile e 'carbon free'. Per potere capire, da questo punto di vista, quale direzione è prevista per i prossimi anni si può fare riferimento al 'New Energy Outlook 2019', report redatto dalla società Bloomberg nel quale vengono fatte previsioni sull'andamento della domanda di energia elettrica e della ripartizione delle tecnologie utilizzate per produrla nel periodo 2019-2050.

Secondo lo studio della società americana, le tecnologie a zero emissioni garantiranno entro il 2030 più della metà del fabbisogno mondiale di energia elettrica, superando per la prima volta gli impianti di produzione da fonte fossile. Le emissioni dovute a questi ultimi potrebbero aver raggiunto il loro picco nel 2018, attestandosi a 13,666 Mt. La previsione è che esse rimangano circa costanti nei prossimi 8 anni, iniziando a diminuire con un tasso annuo del 2% a partire dal 2026 e raggiungendo le 8,724 Mt nel 2050 (circa il 36% in meno rispetto al valore attuale).

Tali risultati saranno ottenuti grazie all'incremento della produzione di potenza da fonte rinnovabile. Fino a pochi anni fa gas naturale e carbone erano le principali risorse utilizzate per la generazione di energia elettrica, mentre per il 2050 si prevede un'incidenza degli impianti alimentati da fonte rinnovabile pari al 62%.

#### Global power generation mix

(Source: BloombergNEF)

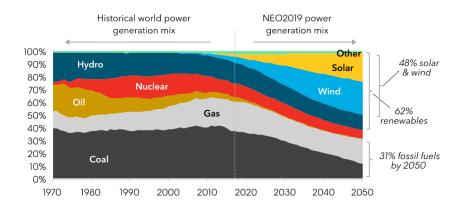


Figura 1-6 - Generazione di potenza per tecnologia. Bloomberg New Energy Outlook 2019

Come si nota l'energia prodotta da solare ed eolico, in particolare, rappresenteranno il 50% della produzione totale. La suddivisione per area geografica è riportata nella figura seguente:

(Source: BloombergNEF)

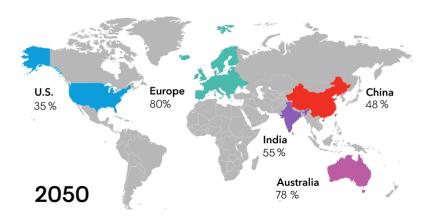


Figura 1-7 - Produzione da solare ed eolico

Parallelamente a quanto appena visto, vi sarà un forte incremento degli investimenti nel settore delle rinnovabili. Da qui al 2050, come riportato nello studio sopra citato, dei 13.3 trilioni di euro di investimenti previsti per nuovi impianti per la produzione di potenza, il 77% sarà destinato agli impianti alimentati da fonte rinnovabile.

I dati fino ad ora riportati dimostrano come nei prossimi anni l'interesse verso robot e tecnologie rinnovabili sarà caratterizzato da una crescita esponenziale e i due settori non potranno che essere convergenti, portando a soluzioni di utilizzo di robot nel settore delle rinnovabili sempre più frequenti e consolidati.

Più precisamente, nei prossimi capitoli sarà dimostrato come, in realtà, tale convergenza in alcuni ambiti sia una realtà consolidata o in imminente affermazione.

# 2 Droni e robot nelle operazioni di O&M in impianti di produzione da fonte rinnovabile.

Le tipologie di robot maggiormente utilizzate nel settore dell'energia rinnovabile sono due:

- *Industrial manipulators*: manipolatori programmabili e multifunzionali progettati per la movimentazione di materiali e componenti o dispositivi programmati per eseguire movimenti e compiti precisi al fine di acquisire informazioni dall'ambiente in cui si trovano e reagire di conseguenza in maniera 'intelligente';
- *Droni*: si tratta di velivoli senza pilota. Essi possono essere controllati da remoto oppure volare in maniera autonoma grazie ad applicazioni di intelligenza artificiale e software di controllo del volo.

I campi in cui trovano applicazione i robot nel settore degli impianti di produzione da rinnovabile riguardano ispezioni complesse o operate in ambienti pericolosi o di difficile accesso, produzione di componenti ad alta precisione, scelta ottimale del sito in cui costruire l'impianto, manutenzione efficiente.

In questo capitolo verranno analizzate le principali tecnologie di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile e alcune tra le principali operazioni di O&M realizzabili attraverso l'utilizzo di robot e droni.

### 2.1 Impianti fotovoltaici

In tale paragrafo verrà riportata una breve descrizione dei principi di funzionamento dei sistemi fotovoltaici e delle principali operazioni di conduzione ed esercizio svolte sugli impianti.

Una volta comprese le logiche di Operation&Maintenance verranno dunque presentate le principali soluzioni robotizzate utilizzate in tale tecnologia.

## 2.1.1 Principio di funzionamento

Il funzionamento degli impianti fotovoltaici è basato sulla conversione dell'energia contenuta nei fotoni costituenti la radiazione solare in energia elettrica che prende il nome di *effetto fotovoltaico*.

L'elemento base di un generatore di questo tipo è la "cella solare"; le celle utilizzabili per le applicazioni di produzione di potenza sono le celle al silicio monocristallino o policristallino (rispettivamente "m-Si" e "p-Si") e le celle a film sottile. Si tratta fondamentalmente di un diodo a semiconduttore posto tra due elettrodi.

In riferimento al silicio cristallino, il diodo è costituito da uno strato inferiore in cui è presente un drogaggio di tipo "P" (impurità del III gruppo come il Boro) sul quale viene deposto uno strato di tipo "N" (impurità del V gruppo come il Fosforo).

Gli elettroni della regione N e le lacune della regione P iniziano un processo di *diffusione* spostandosi da una regione a concentrazione elevata a una a concentrazione minore.

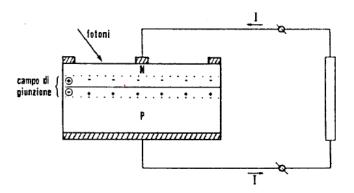


Figura 2-1 - Struttura cella solare in silicio cristallino

In corrispondenza della giunzione si crea una barriera di potenziale che si oppone a un ulteriore flusso di elettroni e lacune. L'equilibrio viene alterato quando è applicata una tensione in corrispondenza della giunzione.

La conversione fotovoltaica dell'energia solare si basa sulla natura della luce considerata come un flusso di particelle, dette *fotoni*, caratterizzate da un'energia:

$$E_{ph}(\lambda) = hc/\lambda \tag{1}$$

Con:

h =costante di Planck;

c = velocità della luce;

 $\lambda$  = lunghezza d'onda della luce;

Soltanto i fotoni aventi energia in eccesso rispetto al salto di energia tra banda di *valenza* e banda di *conduzione* possono essere convertiti in elettricità dalla cella. L'assorbimento del fotone genera coppie *elettrone-lacuna* e il movimento di elettroni indotto dalla luce attraverso la banda interdetta si interpreta come una corrente di elettroni, detta *corrente di generazione*:

$$I_{nh} = qNA$$
 2)

Il comportamento elettrico reale della cella può invece essere descritto dal circuito equivalente in cui vengono inserite la resistenza  $R_{sh}$  in parallelo che rappresenta la dispersione superficiale

tra piastra e griglia e la resistenza in serie  $R_s$  somma della resistenza volumica del semiconduttore e delle resistenze di contatto degli elettrodi.

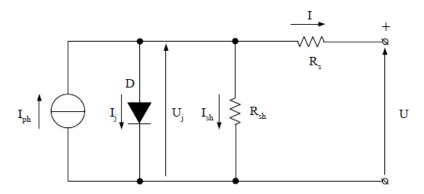


Figura 2-2 - Circuito equivalente cella solare

La risoluzione del circuito attraverso le leggi di Kirchoff permette di individuare tutti i parametri caratteristi di una cella solare.

#### 2.1.2 Moduli e impianti fotovoltaici

Il modulo fotovoltaico è un insieme di celle interconnesse e opportunamente protette dall'ambiente esterno; in genere esso è costituito da più celle connesse in serie (ad es. 36 o 72).

Per quanto riguarda i moduli in *silicio cristallino* le celle vengono saldate e racchiuse tra due pannelli, di cui quello superiore è costituito da un vetro ad alta trasmittanza e trasparente per potere permettere il passaggio della luce solare. Un polimero termoplastico, trasparente alla luce (EVA), avvolge le celle e salda i due pannelli (*laminazione*), rendendo compatta ed ermetica la struttura. L'EVA garantisce l'isolamento elettrico tra le celle, impedisce la penetrazione di umidità ma non sopporta temperature troppo elevate. La copertura posteriore è costituita da una lamina di *tedlar*.

Tutte le grandezze caratteristiche del modulo vengono riferite a condizioni di prova standard STC (Standard Test Conditions): irradianza  $G = 1000 \text{ W/}m^2$ , massa d'aria AM = 1,5 e temperatura di cella 25°C.

I parametri solitamente dichiarati sono la potenza di picco (Wp) che rappresenta la potenza massima in STC, la corrente di corto circuito ( $I_{sc}$ ), la tensione a circuito aperto ( $U_{oc}$ ) e i valori di tensione e corrente di massima potenza  $U_M$  e  $I_M$ .

Nel piano tensione-corrente continua un modulo FV presenta una caratteristica simile a quella delle celle componenti (caratteristica che verrà in seguito descritta), salvo un cambiamento di scala sull'asse delle U per le celle in serie e sull'asse delle I per le eventuali stringhe in parallelo.

Per ottenere una data potenza è necessario collegare tra loro più moduli FV. Esiste una precisa terminologia per indicare le sezioni dell'impianto.

- "Stringa": gruppo di moduli o celle collegati in serie o parallelo;

- "Array": insieme di pannelli assemblati con la struttura di supporto;
- "Campo fotovoltaico": insieme di tutti gli array che costituiscono il generatore completo.

Nella maggior parte dei casi, il generatore è realizzato collegando in parallelo stringhe costituite da moduli connessi in serie tra loro.

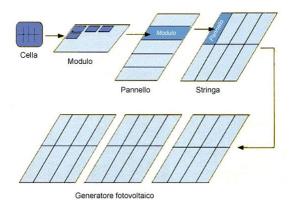


Figura 2-3 - Composizione generatore PV

I componenti che svolgono una funzione di protezione e garanzia di producibilità ottimale nel caso di malfunzionamenti o ombreggiamenti sono il diodo di protezione o bypass  $D_p$ , connesso in antiparallelo a ciascun modulo o a un gruppo di celle (18 o 24) del modulo, e il diodo di protezione in serie  $D_s$ , connesso in serie al modulo o alla stringa di moduli in serie.

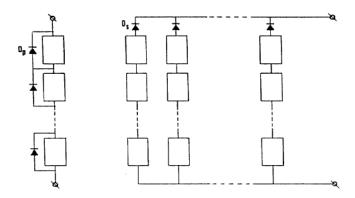


Figura 2-4 - Diodi di protezione

Altri componenti che completano la composizione di un impianto fotovoltaico sono il convertitore DC/AC o *inverter*, avente la funzione di convertire l'energia elettrica prodotta sotto forma continua in energia sotto forma alternata per la trasmissione, la distribuzione e l'uso finale, il convertitore DC/DC *MPPT* (*Maximum Power Point Tracker*), il quale permette di estrarre sempre la massima potenza dall'impianto, la strumentazione per il monitoraggio ecc.

#### 2.1.3 **O&M** nei sistemi fotovoltaici

Vengono definiti malfunzionamenti di un modulo fotovoltaico tutti quei fenomeni che ne riducono la potenza prodotta o che creano problemi in termini di sicurezza.

Durante le operazioni di O&M di impianti fotovoltaici vengono messe in atto misure aventi lo scopo di:

- individuare quanto più tempestivamente possibile tutti i malfunzionamenti degli impianti in esercizio;
- garantire il corretto esercizio e lo stato di salute degli impianti.

## 2.1.3.1 Ispezioni visive

Il metodo più rapido per l'identificazione di difetti o malfunzionamenti di un impianto fotovoltaico è l'ispezione visiva. Si distingue tra ispezione condotta in laboratorio secondo le prescrizioni delle norme *IEC61215* e *IEC61646* ed ispezione condotta durante l'esercizio.

La prima viene eseguita prima e dopo che i moduli siano sottoposti ai test meccanici, elettrici e ambientali in laboratorio; di seguito viene riportata una tabella riassuntiva dei principali malfunzionamenti riscontrabili grazie a tale metodologia e proposta all'interno della 'Review on Failures of Photovoltaic Modules' redatta da IEA:

PV module component	PV module failures		
Front of PV module	Bubbles, delamination, yellowing, browning,		
PV Cells	Broken cell, cracked cell, discolored anti reflection		
Cell metallization / cell and	Burned, oxidized		
Frame	Bend, broken, scratched, misaligned		
Back of module	Delaminated, bubbles, yellowing, scratches, burn		
Junction box	Loose, oxidation, corrosion		
Wires - connectors	Detachment, brittle, exposed electrical parts		

Tabella 2-1 - Difetti riscontrabili attraverso ispezione visiva

La seconda riguarda invece l'ispezione di moduli e impianti durante l'effettivo esercizio in campo con cui è possibile individuare problemi di *hot spots, delamination, junction box failures* ecc.

Con il termine *hotspot* si intende un surriscaldamento anomalo di una o più celle all'interno del modulo fotovoltaico causato da ombreggiamento o presenza di particelle solide come polvere o sabbia, danneggiamento meccanico o problemi intrinseci con conseguente significativa riduzione delle prestazioni elettriche dell'impianto.

Per *delamination* si intende invece la perdita di adesione tra materiale incapsulante, vetro, strato attivo (materiale in cui si manifesta l'effetto fotovoltaico) e superficie posteriore; tale fenomeno, scaturito da una non corretta pulizia dei moduli o da fattori ambientali, è seguito dall'ingresso di umidità all'interno della cella con conseguente riduzione delle proprietà ottiche

e diminuzione della corrente generata (potenza prodotta) che causano l'abbassamento delle prestazioni del sistema. Grazie alla natura del fenomeno i problemi di *delamination* sono di facile individuazione anche ad occhio nudo.

I *junction box failures* sono tutti quei difetti che interessano la scatola posta nella parte posteriore dei moduli avente la funzione di protezione per i collegamenti tra le diverse stringhe e in cui è posto il diodo di *by-pass*. Tra i problemi riscontrabili si hanno scarso fissaggio, apertura dovuta difetti di fabbrica, intrusione di umidità ecc.

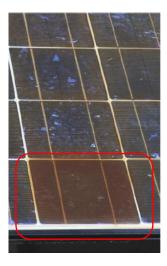


Figura 2-5 - Esempio di hot spot

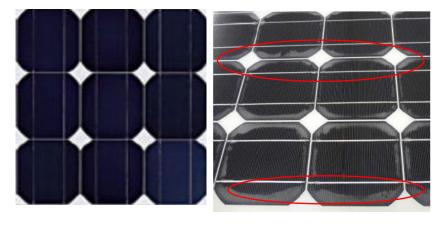


Figura 2-6 - Cella in condizioni ottimali vs cella con problema di delamination



Figura 2-7 - Esempi di junction failures

#### 2.1.3.2 Caratteristica I-U

Risolvendo il circuito equivalente riportato in *figura 2-2* è possibile ricavare la tensione U tra i morsetti del carico e la corrente I che lo attraversa:

$$I = I_{ph} - I_i - U_i / R_{sh}$$
 3)

$$U = U_i - R_s I 4)$$

E' inoltre possibile ricavare la relazione implicita U (I, U) propria della cella fotovoltaica:

$$U = \frac{mkT}{q} \cdot \ln(\frac{Iph - I(1 + R_s/R_h) - U/R_{sh} + I_0}{I_0}) - R_s I$$
 5)

Fissate l'irradianza e la temperatura si individua una curva I(U) le coordinate dei punti che la costituiscono forniscono la potenza elettrica erogabile  $P = U \times I$ .

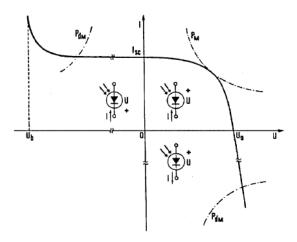


Figura 2-8 - Funzionamento cella fotovoltaica

Come si può notare dalla precedente figura la caratteristica completa corrente - tensione della cella si estende nei quadranti II e IV; in essi la cella funziona rispettivamente a tensione inversa (U<0, I>0) e a corrente inversa (U>0, I<0) e tale funzionamento risulta accettabile soltanto se i punti di lavoro cadono dentro l'iperbole di massima potenza dissipabile dalla cella ( $P_{dM}$ ).

Nel caso in cui la tensione inversa superi la tensione di breakdown  $U_b$  la cella è danneggiata.

Quando si collegano celle in serie e parallelo al fine di potere ottenere moduli e impianti fotovoltaici la curva caratteristica tensione-corrente viene opportunamente scalata nei valori di corrente e tensione mantenendo lo stesso andamento.

Considerando la caratteristica nel I quadrante è possibile individuare 5 parametri fondamentali:

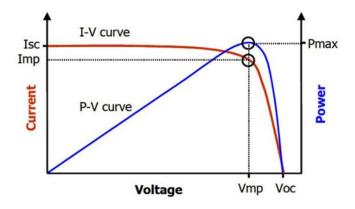


Figura 2-9 - Caratteristiche I(U) e P(U)

- La corrente di corto circuito  $I_{sc}$  che rappresenta la corrente per cui si ha una tensione nulla ai capi della cella;
- La tensione a circuito aperto  $U_{oc}$  pari alla massima tensione ottenibile da una cella fotovoltaica e corrispondente a una corrente nulla;
- La tensione  $U_{mpp}$  e la corrente  $I_{mpp}$  pari alla tensione e alla corrente per cui si ha la potenza massima erogata dalla cella;
- Il *fill factor FF* o *fattore di riempimento* pari al rapporto tra la massima potenza erogabile dalla cella e la potenza fittizia in condizioni di tensione pari alla tensione di circuito aperto e corrente pari alla corrente di corto circuito.

L'analisi e il monitoraggio della caratteristica tensione corrente di una cella/modulo/impianto fotovoltaico permette di ottenere informazioni circa il suo 'stato di salute' ed eventuali guasti. L'interpretazione della curva I-U dipende ovviamente dai dati disponibili:

- Nel caso in cui si disponga soltanto della curva I-U senza informazioni circa i parametri elettrici è possibile verificare che i valori di  $I_{sc}$  e  $U_{oc}$  siano consistenti con l'area, la tecnologia, il numero e il tipo di connessione delle celle all'interno del modulo esaminato, che il *fill factor* sia conforme al valore atteso dalla tecnologia in esame o la forma della curva restituisca informazioni circa l'eventuale presenza di difetti.
- Se si hanno a disposizione i parametri elettrici è possibile confrontare i valori ottenuti dalla caratteristica con i precedenti;
- Conoscendo le precedenti curve I-U per lo stesso modulo è possibile operare un confronto al fine di rilevare difetti o malfunzionamenti. Una riduzione della corrente di corto circuito, ad esempio, può essere sintomo di corrosione del vetro o *delamination*

delle celle, così come una riduzione della tensione a circuito aperto può indicare corto circuiti tra le celle o malfunzionamento del diodo di by-pass.

#### 2.1.3.3 Elettroluminescenza

L'elettroluminescenza è il fenomeno opposto rispetto all'effetto fotovoltaico per cui un materiale semiconduttore, se attraversato da corrente, emette radiazione luminosa a una determinata lunghezza d'onda. Utilizzando opportune camere si nota come le celle o moduli funzionanti correttamente risultino più luminose rispetto a quelle danneggiate.

Attraverso questo metodo è possibile individuare cricche nelle celle, caratterizzate da linee di colore nero o comunque molto più scure rispetto alle sezioni in corretto funzionamento.

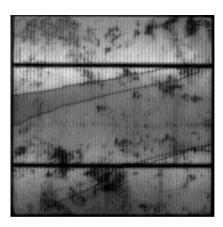


Figura 2-10 - Cricche individuate con elettroluminescenza

Tale tecnica può essere utilizzata, in linea teorica, sia nel caso di moduli non ancora sottoposti a radiazione solare che per impianti in produzione. Il problema è che è necessario che i sistemi da analizzare si trovino in camere scure, per cui risulta impossibile operare l'elettroluminescenza mentre il modulo è in produzione. L'interpretazione delle immagini ottenute e l'individuazione dei difetti cui il modulo è affetto richiede inoltre l'intervento di tecnici altamente specializzati.

I due aspetti precedentemente citati rendono tale metodo d'ispezione non particolarmente conveniente e diffuso.

# 2.1.3.4 Termografia

La termografia è una tecnica che viene ormai utilizzata con regolarità nelle operazioni di O&M di impianti fotovoltaici in aggiunta alle tradizionali ispezioni visive e di analisi delle caratteristiche corrente tensione. Essa fornisce evidenti vantaggi in termini di incremento della sicurezza ed efficienza degli impianti, fornendo uno strumento attraverso il quale è possibile identificare tempestivamente un grande numero di difetti o fuori servizio cui un impianto fotovoltaico può essere affetto.

Essa consiste nell'esecuzione di fotografie attraverso speciali camere, chiamate appunto 'termo-camere', che restituiscono la distribuzione di temperatura nella sezione di impianto ispezionata.

Durante il corretto funzionamento la temperatura delle celle varia di pochi gradi; nel caso in cui invece si manifestino malfunzionamenti come rottura di una cella, ombreggiamento, difetti intrinseci ecc. si possono avere differenze di temperatura a partire dai 10 gradi tra le celle funzionanti correttamente e quelle affette da hotspot.

L'utilizzo delle termocamere permette di individuare anomalie termiche non solo nel modulo o nelle celle ma anche in tutti i componenti ausiliari che completano l'impianto fotovoltaico. Tali anomalie si suddividono in:

- 1. Hot spots dovuti a:
  - Rottura del rivestimento in vetro;
  - Ombreggiamento di una porzione di impianto o modulo<sup>1</sup>;
  - Difetti interni.
- 2. Surriscaldamento dei diodi di by-pass presenti all'interno della junction box;
- 3. Surriscaldamento dei fusibili;
- 4. Surriscaldamento dell'inverter.



Figura 2-11 - Esempio di termografia in celle con vetro frontale rotto

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Quando la corrente di funzionamento delle celle connesse in serie raggiunge il valore di corrente di corto circuito della cella in ombra, la corrente complessivamente prodotta dalla stringa viene limitata dalla cella ombreggiata. Se si manifesta una condizione di corto circuito nella stringa, la cella in ombra si porta nella configurazione di *forward bias* venendo attraversata dalla corrente complessivamente prodotta dalle celle non in ombra e dissipando la potenza termica per effetto Joule. Tale meccanismo provoca il surriscaldamento della cella con conseguente potenziale crisi termica della stessa e consistente riduzione della potenza prodotta dall'impianto.

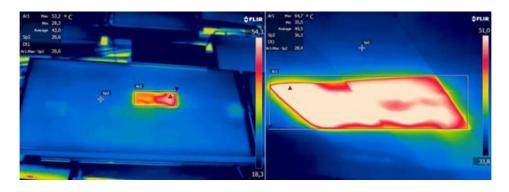


Figura 2-12 - Esempio di termografia in celle con difetti interni

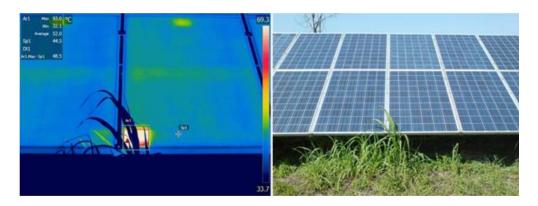


Figura 2-13 - Esempio di termografia in cella con ombreggiamento locale

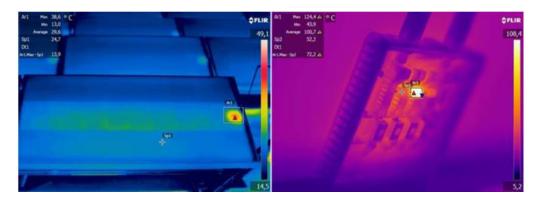


Figura 2-14 - Esempio di termografia su junction box affetta da surriscaldamento

Oltre alle attività di ispezione volte a verificare il corretto funzionamento degli impianti fotovoltaici, tra le mansioni di O&M si riconoscono operazioni aventi lo scopo di prevenire l'insorgere di condizioni che possano ridurre la producibilità dei generatori.

Tra le opere di manutenzione, in particolare, è possibile riconoscere le attività di pulizia dei moduli e il taglio erba, di cui sarà in seguito analizzata la 'versione robotizzata'.

La prima viene eseguita al fine di contrastare il problema che in gergo tecnico viene denominato 'soiling'; esso consiste nell'accumulo sulla superficie dei pannelli fotovoltaici di neve, sporcizia, polvere, foglie, polline ed escrementi, tra le principali cause della riduzione di energia prodotta dai moduli. Tale riduzione è dovuta dal fatto che tutti i contaminanti sopra citati operano da ostacolo per la radiazione solare e possono causare il parziale ombreggiamento delle celle costituenti il modulo che, come precedentemente descritto, si comportano da resistenza per la corrente prodotta dalle sezioni irraggiate.

L'impatto che tale fenomeno ha sulla produzione dei pannelli dipende dalla quantità di *soiling* accumulato sulla superficie che a sua volta risulta essere funzione di fattori ambientali, tipologia di detrito accumulato e fattori tipici dell'installazione considerata. Tutti gli studi condotti in merito hanno dunque dimostrato come tale fenomeno generi perdite in termini di efficienza che non possono essere trascurate; la pulizia dei moduli risulta quindi un'attività di fondamentale importanza nelle operazioni di O&M degli impianti fotovoltaici.

La crescita incontrollata di vegetazione in prossimità di moduli fotovoltaici può generare diverse problematiche in termini di efficienza degli impianti e sicurezza degli operatori che svolgono le operazioni di manutenzione. Essa può infatti essere causa di:

- Ombreggiamento con conseguente riduzione dell'energia prodotta;
- Generazione di hotspot a causa della dissipazione della corrente prodotta dalle celle in normale funzionamento sulla cella in ombra con possibile perdita di integrità;
- Infestazione da parte di insetti o serpenti che possono minacciare la salute degli operatori;
- Incendi.

Al fine di prevenire tali effetti il taglio erba rientra tra le attività di manutenzione dei campi fotovoltaici, contribuendo in media fino al 4% dei costi totali di manutenzione.

## 2.1.4 Droni e robot negli impianti fotovoltaici

Di seguito vengono riportate le principali applicazioni di droni e robot negli impianti di produzione fotovoltaica.

#### 2.1.4.1 **Droni**

Con il termine drone si fa riferimento a velivoli senza pilota a bordo e comandati a distanza attraverso radiocomandi da operatori specializzati.

Generalmente si fa riferimento ai droni utilizzando l'acronimo UAS (in riferimento all'inglese Unmanned Aircraft System) e in base alle caratteristiche costruttive possono essere suddivisi in due tipologie:

a) Droni con rotore e classificati anche in base al numero di rotori. Essi risultano piccoli, leggeri e facili da controllare.

b) Ad ali fisse. Più veloci rispetto ai precedenti, capaci di sostenere carichi più pesanti e di volare a maggiori altitudini.

I primi sono i più diffusi grazie al costo inferiore e alla loro versatilità che li rende utilizzabili in diverse applicazioni nel settore delle ispezioni degli impianti fotovoltaici: dalle ispezioni visive di moduli e componenti costituenti l'impianto alle ispezioni termografiche o al monitoraggio della vegetazione.

L'utilizzo di droni si sta sempre di più diffondendo nelle operazioni di Operation&Maintenance di impianti fotovoltaici grazie ai numerosi vantaggi che ne conseguono. Essi consistono in:

- 1. Maggiore velocità di ispezione. Considerando un impianto di 100 MW confrontando la soluzione manuale con quella eseguita con drone si passa da 43 a 5 giorni richiesti per completare l'ispezione.
- 2. Incremento dell'efficienza di ispezione. La drastica riduzione del tempo richiesto e la possibilità di operare l'ispezione dall'alto permette di monitorare la totalità degli impianti anche di grossa taglia e non solo di campioni rappresentativi come nel caso di ispezioni manuali. Ciò ovviamente provoca una più efficace capacità di rilevare guasti o malfunzionamenti.
- 3. Riduzione dei costi di ispezione e delle perdite di energia. La diminuzione del tempo richiesto per l'ispezione si traduce inevitabilmente in un minor costo necessario per condurre l'ispezione grazie al minor tempo di lavoro richiesto per gli operatori. A ciò si aggiunge il fatto che grazie alla possibilità di eseguire ispezioni più accurate vi è una maggiore possibilità di identificare guasti che riducono la producibilità dell'impianto, con un conseguente recupero di energia prodotta che si traduce in maggiori ricavi rispetto al caso tradizionale.
- 4. Possibilità di ispezione di zone di difficile raggiungimento.
- 5. Riduzione del rischio per la salute degli operatori associato all'esposizione verso componenti in tensione o alla prolungata esposizione ai raggi solari in ambienti in cui le temperature possono raggiungere valori elevati (35-40 °C).

L'utilizzo di droni per le ispezioni è possibile grazie all'accoppiamento con opportune fotocamere che permettono l'acquisizione di immagini dall'alto dei moduli, la cui analisi permette l'individuazione di eventuali guasti. I dispositivi secondari che possono essere installati sui droni sono:

- Fotocamere LWIR (long-wave infrared), meglio note come termocamere, che permettono di ottenere immagini termografiche dell'impianto per l'individuazione di punti più caldi, sintomatici di malfunzionamenti, come descritto nel paragrafo relativo all'analisi termografica.
- Fotocamere RGB (red green blue), ossia normali fotocamere digitali, utilizzate per l'individuazione di problemi di natura non elettrica come soiling, ombreggiamento, nidi d'uccello sulla superficie ecc. Senza la presenza di queste fotocamere si incorrerebbe il

rischio di cattiva interpretazione dei risultati, imputando a problemi di tipo elettrico o intrinseci comportamenti causati da fattori esterni e di facile risoluzione.



Figura 2-15 - Immagine RGB vs Immagine LWIR

Il processo che viene seguito per potere operare le ispezioni attraverso l'utilizzo di droni è riassunto nei diagrammi di flusso riportati di seguito:

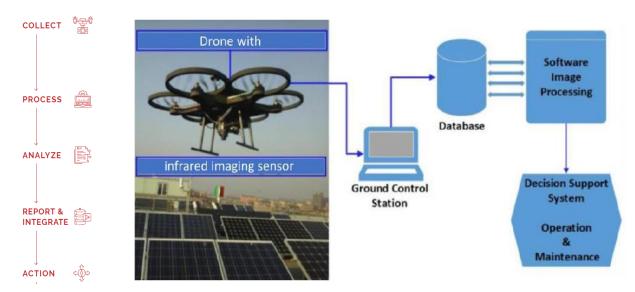


Figura 2-16 - Linee di flusso ispezione con droni

Dopo una prima fase di pianificazione del volo del drone ed eventuale richiesta delle autorizzazioni necessarie, inizia l'ispezione aerea. Le immagini catturate vengono inviate ad una stazione di controllo (PC) o con trasferimento wireless o USB e quindi conservate all'interno di un opportuno database per il processamento attraverso opportuni software. Essi svolgono il compito di ricevere, conservare ed analizzare le immagini ottenute dal drone al fine di generare report in cui vengono individuati tutti i difetti riscontrati. Tali report vengono infine analizzati dal personale specializzato al fine di decidere le attività di O&M da svolgere sull'impianto sottoposto all'ispezione.

Quando si eseguono termografie aeree bisogna considerare con attenzione i tre principali fattori che influenzano il risultato dell'ispezione:

- 1. Condizioni dell'ambiente circostante. Umidità, vento, distanza dall'obiettivo e temperatura dell'aria influenzano la capacità dell'aria di trasmettere la radiazione infrarossa e modificano le performance del sensore e l'accuratezza della misura. Condizioni ideali sono cielo sereno e bassa velocità del vento. In generale, affinché l'ispezione possa garantire risultati soddisfacenti si deve avere:
  - Irradianza minima di  $600 \text{ W/}m^2$  sul piano del modulo PV
  - Velocità del vento massima di 8 m/s
  - Nuvolosità massima pari a 2 okta<sup>2</sup>.
- 2. Caratteristiche delle termocamere utilizzate. Esse consistono nelle caratteristiche che il drone, il volo e le fotocamere utilizzate devono avere affinché le immagini ottenute garantiscano una qualità tale da ottenere un processamento ottimale. Riguardano principalmente la velocità di percorrenza o l'altezza di volo del drone e le caratteristiche della fotocamera (risoluzione, capacità radiometrica, frequenza di acquisizione dei fotogrammi ecc.).
- 3. Accuratezza dei dati. Essa è principalmente condizionata dall'emissività del pannello su cui è eseguita la termografia e dalla capacità del software di elaborazione di non introdurre ulteriori errori durante il processamento delle immagini.

Nonostante le difficoltà tecniche che si possono riscontrare, l'utilizzo di droni per le ispezioni di impianti fotovoltaici sta ormai diventando una pratica standard per le operazioni di O&M di grandi impianti di produzione di energia elettrica e i vantaggi che da essi ne derivano verranno illustrati 'numeri alla mano' nei capitoli successivi.

## 2.1.4.2 Cleaning machine

Come discusso precedentemente il fenomeno del 'soiling' rappresenta una delle principali cause di riduzione di efficienza degli impianti fotovoltaici.

Secondo una stima condotta da Enel Green Power le perdite annuali dovute a tale fenomeno oscillano tra il 5% e il 40%.

Il fattore che principalmente influenza tali perdite è la collocazione geografica degli impianti e, di conseguenza, l'angolo di inclinazione dei moduli: con latitudini e inclinazioni decrescenti (zone desertiche e in prossimità dell'equatore) sabbia e polvere giocano un ruolo più significativo e le perdite giornaliere dovute al soiling raggiungono valori che variano dallo 0.3% al 1%; nel caso di climi moderati, invece, grazie a angoli di tilt superiori ai 12° e precipitazioni frequenti si ha una soddisfacente capacità di 'auto-pulizia' degli impianti.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Unità di misura che restituisce un parametro di nuvolosità. Essa assume il significato di 1/8 di nuvolosità, per cui 8 okta corrispondono a cielo completamente coperto mentre 1 okta equivale a cielo terso.



Figura 2-17 - Differenza tra moduli affetti da soiling e moduli puliti

Esistono diverse modalità di pulizia degli impianti ma nel caso di installazioni di grande potenza la soluzione che prevede l'utilizzo di acqua non è adottata a causa dell'elevata quantità di risorsa necessaria, preferendo la soluzione 'a secco', in cui si sfrutta l'aria come mezzo per potere trasportare le particelle via dalla superficie dei moduli.

Uno dei problemi associati alla modalità di pulizia a secco riguarda il maggiore rischio di danneggiamento della superficie dei moduli a causa dell'attrito generato tra particelle e superficie stessa. Durante l'operazione di pulizia bisogna inoltre fare attenzione a non applicare una pressione eccedente la resistenza meccanica del modulo stesso con il rischio di conseguente rottura o fratture delle celle.

Tra le metodologie di pulizia si distingue tra:

- 1. Pulizia manuale. Essa consiste nella pulizia manuale delle superfici dei pannelli per mezzo di opportune spazzole. Questa soluzione è perseguibile nel caso di piccoli impianti, mentre non risulta sostenibile nel caso di impianti di potenza di centinaia di MW. Se si fa infatti riferimento all'impianto fotovoltaico di Villanueva in Mexico di EGP costituito da 2.5 milioni di pannelli risulta evidente come tale strada non sia percorribile.
- 2. Installazioni su veicoli. Si tratta di camion o veicoli in cui vengono installati i sistemi di pulizia per i pannelli, così da potere raggiungere i moduli più interni attraverso l'ausilio di braccia meccaniche. Il principale svantaggio di tale soluzione riguarda l'ingombro dei camion e la necessità di sufficienti distanze tra i moduli.
- 3. Soluzioni semi automatizzate. Sistemi di pulizia che installati su un lato del modulo procedono in maniera automatica fino alla completa copertura della superficie da pulire. Richiedono l'azione di operatori che trasferiscono il sistema da un modulo al successivo. Un vantaggio di tali sistemi è che quando non utilizzati possono essere conservati in ambienti chiusi.

4. Soluzioni totalmente automatizzate. Si tratta di sistemi installati su ciascuna riga degli impianti in opportune 'stazioni'. Essi sono in grado di operare su una singola riga e dotati di un sistema di individuazione dei difetti. Presentano inoltre sistemi di regolazione in funzione delle condizioni metereologiche e, come suggerito dal nome, non richiedono la presenza di operatori.



Figura 2-18 - Esempi di sistemi di pulizia di pannelli fotovoltaici

Nella figura precedente sono riportati alcuni esempi di sistemi di pulizia di impianti fotovoltaici. A sinistra si ha un esempio di attività svolta con camion dall'azienda *BP Metalmeccanica S.r.l.*, sulla destra invece sono riportati *Geva -Bot di G.S.I.* in alto e un sistema completamente automatico di *Ecoppia*.

La scelta tra uno dei metodi precedentemente descritti è strettamente legata a una serie di parametri come i livelli di soiling previsti, la frequenza di pulizia, tipologia di impianto, disponibilità di lavoro a basso costo, tipologia di moduli, ecc.

Nel caso di impianti di grande taglia però la conversione da tecniche manuali a metodologie automatizzate che prevedono l'utilizzo di robot sta prendendo sempre più piede grazie alla migliore efficienza garantita da tali sistemi, ai minori costi di pulizia rispetto alle soluzioni manuali nel caso di operazioni frequenti e alla maggiore sostenibilità del processo grazie al mancato utilizzo di grandi quantità di acqua.

Esistono diverse macchine utilizzate; in funzione della tecnologia su cui esse si basano si può riconoscere tra:

- Sistemi ad aria compressa;
- Sistemi ad aspirazione;
- Sistemi con spazzole mobili;
- Sistemi con spazzole rotanti;
- Sistemi ad aria compressa + spazzole mobili;
- Sistemi ad aria compressa + spazzole fisse;
- Sistemi ad aspirazione + spazzole mobili;
- Sistemi ad aspirazione + spazzole fisse.



Figura 2-19 - Esempio di 'cleaning machine'

## 2.1.4.3 Robot tagliaerba

Si tratta di prototipi consistenti in robot aventi la funzione di controllare in maniera automatizzata la vegetazione in corrispondenza dei moduli fotovoltaici che, come precedentemente descritto, rappresentano un fattore di riduzione di efficienza degli impianti di produzione fotovoltaica. Anche tali soluzioni presentano il vantaggio di garantire il raggiungimento di zone di difficile accesso nel caso di operazioni manuali ottenendo maggiori efficienze e riduzione dei tempi e costi richiesti.

Le principali difficoltà ad oggi riguardano l'effettiva capacità di tali sistemi di tagliare con efficacia tutti i tipi di vegetazione e di raggiungere in completa autonomia tutte le zone in prossimità dell'impianto adattandosi a tutti i tipi di percorsi incontrati (pendenze significative, buche ecc.)



Figura 2-20 - Esempio di robot tagliaerba

## 2.2 Impianti eolici

Una turbina eolica è una macchina in grado di convertire l'energia posseduta dal vento in energia elettrica.

Trattandosi di generatori elettrici questi impianti sono connessi alla rete elettrica; il principale inconveniente, come tutti i sistemi di produzione da fonte rinnovabile, riguarda la forte variabilità della fonte primaria e la possibilità di produrre solo quando essa risulta disponibile. La producibilità di tali impianti risulta quindi difficilmente prevedibile con accuratezza e di conseguenza altamente fluttuante.

In questo capitolo verrà riportata una breve descrizione dei principi di funzionamento, della struttura e delle principali operazioni di O&M riguardanti le turbine eoliche.

Verranno infine illustrate alcune applicazioni di droni e robot sulla gestione, esercizio e manutenzione dei sistemi descritti.

## 2.2.1 Principio di funzionamento

Nelle moderne turbine eoliche il processo di conversione si basa su concetti di aerodinamica e sulla capacità di una forza che si esplica sulle pale del generatore, che prende il nome di portanza, di produrre un momento in grado di mettere in rotazione il rotore della macchina con la conseguente produzione, in primis, di energia meccanica e successiva conversione in energia elettrica grazie all'azione del generatore elettrico.

Al fine di potere comprendere il funzionamento di tali macchine risulta necessario fare riferimento alle leggi della meccanica dei fluidi e alla conseguente teoria semplificata di Betz (1926) utilizzata per determinare la potenza estraibile da una turbina ideale.

La trattazione teorica prevede l'applicazione dell'equazione di conservazione della quantità di moto su un volume di controllo delimitato dalla superficie laterale e dalle due superfici di base di un flusso d'aria che investe una turbina ideale avente spessore infinitesimo lungo la direzione del vento (*teoria del disco attuatore*), rappresentato dal flusso d'aria. Le ipotesi semplificative che vengono prese in considerazione sono:

- Fluido omogeneo e incomprimibile e in regime di moto stazionario;
- Assenza di attrito;
- Numero infinito di pale;
- La porzione di flusso che attraversa lo specchio dell'attuatore non ha alcuna interazione con la restante parte di fluido che lo circonda e che non interagisce con l'attuatore;
- Ad eccezione del rotore, non sono presenti altri ostacoli all'interno delle vene fluide che possano alterarne il moto;
- Nelle sezioni a monte e a valle la pressione statica dell'aria è pari alla pressione statica indisturbata dell'ambiente;

- La forza risultante risulta uniforme sulla superficie dell'attuatore.

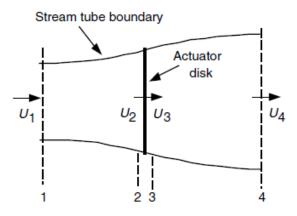


Figura 2-21 - Modello della teoria del disco attuatore

Dalla conservazione della quantità di moto si riesce a ricavare la forza che il vento esercita sull'attuatore:

$$T = U_1(\rho A U)_1 - U_4(\rho A U)_4 \tag{6}$$

Dove  $\rho$  è la densità dell'aria, A è l'area della sezione trasversale, U è la velocità dell'aria e i pedici indicano i punti in cui l'equazione è applicata.

Nel caso di moto stazionario  $(\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 = \dot{m}$ , con  $\dot{m}$  che rappresenta la portata del fluido nel volume di controllo, da cui:

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \tag{7}$$

La forza T è una quantità positiva da cui si deduce che spostandosi dalla sezione 1 alla sezione 4 si ha una riduzione della velocità.

A questo punto si fa riferimento alla conservazione del trinomio di Bernoulli, dato dalla somma di energia potenziale gravitazionale (mgh), energia cinetica (0,5 $u^2$ ) ed energia di pressione (pV) e considerando che la conversione avviene a energia potenziale costante, al fine di ricavare l'andamento della velocità e della pressione del fluido tra le sezioni 1-2 e 3-4. Il trinomio non può però essere applicato in corrispondenza del punto di contatto con la turbina (attuatore), in cui si ha una discontinuità della pressione con una brusca diminuzione della stessa, a cui corrisponde la generazione di energia meccanica attraverso le pale della turbina. Dopo aver oltrepassato la turbina, la pressione riprende a salire e si riporta al valore indisturbato di partenza ( $p_1 = p_4$ ). Le equazioni da risolvere sono:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2$$
 8)

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2$$
 9)

In cui  $U_2 = U_3$ . In aggiunta si riscrive anche la forza T trasmessa al rotore:

$$T = A_2(p_2 - p_3) 10)$$

In figura seguente si riporta quindi l'andamento di pressione e velocità nel volume di controllo lungo la direzione di avanzamento del vento.

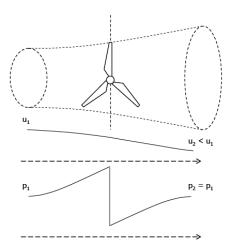


Figura 2-22 - Andamento di velocità e pressione nel tubo di flusso

La forza esplicata può essere espressa come:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2 (U_1^2 - U_4^2)$$
 11)

Da cui moltiplicando per la velocità in corrispondenza dell'attuatore è possibile ricava la potenza meccanica trasmessa al rotore.

Al fine di potere definire le prestazioni di una turbina si definisce il coefficiente di potenza  $C_p$  definito come il rapporto tra la potenza meccanica generata dalle pale  $P_{mecc}$  e la potenza del vento (espressione dedotta dalla derivata dell'energia cinetica di una massa d'aria in moto), incidente con velocità costante U:

$$C_p = \frac{P_{mecc}}{\frac{1}{2}\rho AU^3}$$
 12)

Dove  $\rho$  rappresenta la densità dell'aria (circa 1,225 kg/ $m^3$  a livello del mare e temperatura 15°C) ed A area spazzata dalle pale.

Il valore massimo ottenibile, ottenuto dalla teoria di Betz, è pari a 16/27; esso si ottiene quando la velocità nella sezione di attraversamento della turbina vale il 67% della velocità iniziale U e la velocità finale è invece pari al 33% di U.

Per ogni turbina si ha una curva caratteristica del coefficiente di potenza in funzione della velocità di avanzamento delle pale V e della velocità del vento (rapporto definito 'tip speed ratio'):

$$\lambda = \frac{V}{U} = \frac{\omega R}{U} \tag{13}$$

Dove  $\omega$  è la velocità angolare ed R la lunghezza della pala.

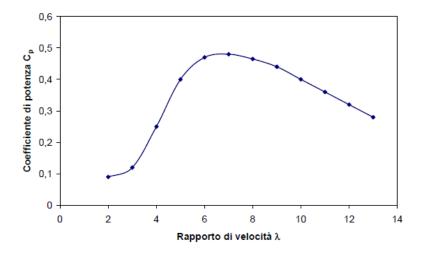


Figura 2-23 - Esempio di curva caratteristica

Come si nota dalla curva caratteristica riportata in figura per valori di  $\lambda$  < 5, per cui si hanno velocità del vento elevate, si ottengono perdite in termini di efficienza dovute principalmente al fenomeno dello stallo, dovuto ad elevati angoli di attacco lungo il profilo delle pale (cfr. paragrafo 2.2.2), mentre per elevati valori di  $\lambda$  si hanno perdite per bassa potenza con bassi angoli di attacco (cfr. ibidem).

Come si può notare per tale curva è presente un punto di massimo per valori tipici di  $\lambda$  che nel caso di turbine a velocità costante sono definiti per valori caratteristici di velocità del vento.

Nel caso in cui si abbiano turbine a velocità variabile è possibile mantenere valori di  $\lambda$  prossimi a quello ottimale grazie ad opportune logiche di regolazione della velocità angolare delle pale al variare della velocità del vento.

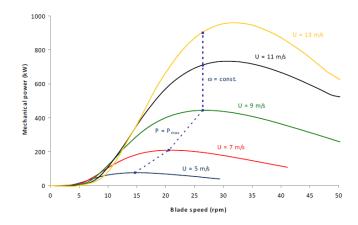


Figura 2-24 - Famiglia di curve di potenza meccanica in funzione della velocità angolare delle pale

Come si può notare dall'esempio riportato in figura la regolazione ottimale è quella che segue il luogo di punti tratteggiato. Al variare della velocità del vento è possibile variare la velocità di rotazione attraverso opportuni sistemi di controllo al fine di mantenere la potenza meccanica in output in prossimità del massimo estraibile; tale massimo è dato da:

$$P_{max} = C_{p,max} \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{\omega^3}{\lambda_{max}^3}$$
 14)

### 2.2.2 Cenni di aerodinamica della pala

Come accennato nel paragrafo precedente, l'efficienza di funzionamento di un aerogeneratore dipende fortemente dagli angoli di attacco lungo il profilo delle pale. Per potere capire quale sia l'orientazione delle pale che ne permetta un funzionamento ottimale e le logiche di regolazione che vengono attutate per massimizzare la potenza prodotta bisogna fare riferimento alle velocità e alle forze che entrano in gioco su di esse.

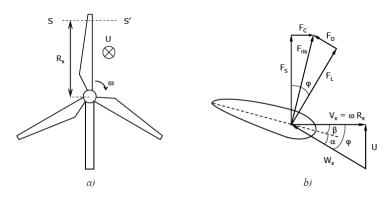


Figura 2-25 - Schematizzazione profilo alare pala eolica

Facendo riferimento alla figura precedente si consideri la sezione s-s' di una pala eolica in cui la velocità del vento U risulta avere una direzione perpendicolare alla lunghezza  $R_x$  ed entrante sul piano del foglio.

Come si nota dal focus sul profilo alare è possibile distinguere diverse componenti di velocità (cinematica della pala eolica), di forze (dinamica della pala eolica) e diversi angoli caratteristici:

- $V_x = \omega R_x$  = velocità periferica della sezione della pala;
- $W_x$  = velocità relativa del vento;
- $\varphi$  = angolo tra velocità periferica della pala e velocità relativa del vento;

In riferimento al centro di pressione della pala:

- $\alpha$  = angolo di attacco formato tra la direzione della corda alare e dalla direzione del
- $\beta$  = angolo di passo formato dalla direzione della corda alare e dalla direzione del vettore
- F<sub>L</sub>= forza di lift o portanza, normale al vettore W<sub>x</sub>;
   F<sub>D</sub>= forza di drag o resistenza, normale al vettore W<sub>x</sub>;

Le relazioni che intercorrono tra le grandezze individuate sono:

$$\overrightarrow{W_x} = \overrightarrow{U} - \overrightarrow{V_x} \tag{15}$$

$$\varphi = \alpha + \beta \tag{16}$$

$$ctg(\varphi) = \frac{V_x}{U} = \lambda \tag{17}$$

Si possono anche introdurre delle relazioni di proporzionalità per cui  $F_L \propto C_L(\alpha) \cdot W_{\chi}^2$  e  $F_D \propto$  $C_D(\alpha) \cdot W_x^2$  con  $C_L$  e  $C_D$  dipendenti dall'angolo di attacco, ma il coefficiente di portanza, di valore molto maggiore, presenta un andamento crescente all'aumentare di α solo fino a circa 15°, oltre il quale diminuisce bruscamente per il fenomeno di stallo, mentre il coefficiente di resistenza è sempre crescente all'aumentare di  $\alpha$ , con valori di un ordine di grandezza in meno.

Il funzionamento di una turbina eolica per la produzione di energia elettrica avviene in un intervallo di velocità del vento tipicamente tra 4 e 25 m/s, con potenza crescente fino alla situazione in corrispondenza del valore nominale intorno a 12-16 m/s: dal punto di vista aerodinamico, al di sotto della velocità nominale si ha l'esigenza di massimizzare l'efficienza e quindi la potenza generata, mentre al di sopra della velocità nominale l'esigenza è di mantenere costante la potenza. Tali regolazioni vengono eseguite modificando gli angoli di attacco e di passo.

### 2.2.3 Elementi costitutivi degli aerogeneratori

Le tipologie di aerogeneratori maggiormente diffusi sono i sistemi ad asse orizzontale o HAWT (horizontal axis wind turbine), consistenti in macchine in cui l'asse di rotazione del rotore risulta parallelo al terreno.



Figura 2-26 - Esempio di aerogeneratore ad asse orizzontale

La struttura più utilizzata prevede una disposizione 'sopravento' della turbina, ossia con direzione uscente dal mozzo del rotore contraria alla direzione del vento incidente (il vento giunge sul rotore dal davanti); per disposizione 'sottovento' si intende la casistica opposta, in cui cioè il vento incide sulla parte posteriore della turbina. I componenti principali di un sistema di generazione di energia elettrica di tipo eolico sono:

- Rotore. Esso è costituito dalle pale e dal mozzo da cui esse si diramano. Le turbine più diffuse sono costituite da 3 pale e, come detto, disposte in direzione sopravento. Esistono anche soluzioni più rare con disposizione sottovento o costituite da due pale. Le pale sono generalmente costituite da fibre di vetro o fibre di carbonio rinforzate con materiale plastico. La progettazione del rotore risulta una delle fasi più delicate in termini di prestazioni e fattibilità economica della macchina.
- Organi di trasmissione. Essi tipicamente includono un albero che ruota a basso numero di giri posto sul lato del rotore, un moltiplicatore di giri e un albero ad alto numero di giri posto sul lato del generatore. Ad essi si aggiungono i cuscinetti di supporto, un freno e le parti rotanti del generatore. La funzione del moltiplicatore di giri all'interno degli aerogeneratori consiste nell'innalzare la bassa velocità di rotazione dell'albero posto sul lato del rotore e dipendente dall'intensità del vento (decine di giri al minuto) ai valori

standard richiesti dal generatore elettrico (centinaia o migliaia di giri al minuto). Nonostante la progettazione di tali componenti segua pratiche ben consolidate, la variabilità introdotta dal carico esercitato dal vento richiede particolari accortezze nelle fasi preliminari del progetto della macchina.

- Generatore. Nella quasi totalità delle turbine eoliche installate vengono utilizzate macchine ad induzione o generatori elettrici di tipo sincrono. Essi prevedono un funzionamento a velocità di rotazione costante o quasi costante nel caso in cui il generatore sia direttamente collegato alla rete elettrica. Le turbine possono però operare in regime di velocità variabile nel caso in cui vengano installati dei convertitori elettronici. Tra le turbine connesse con la rete elettrica sono molto diffusi i generatori di tipo a gabbia di scoiattolo grazie alla loro affidabilità, robustezza, economicità e facilità di connessione con la rete; essi operano in un range di velocità di rotazione molto ristretto e prossimo alla velocità sincrona. Una soluzione che sta diventando sempre più diffusa è quella dei generatori DFIG (doubly fed induction generator): si tratta di generatori di tipo asincrono a doppia alimentazione, ossia di una macchina asincrona che viene allacciata alla rete sia con lo statore che con il rotore. La statore può essere connesso direttamente alla rete di alimentazione mentre il rotore necessita di un convertitore di frequenza o CEB (convertitore elettronico bidirezionale) a causa delle differenti frequenze tra correnti di fase e rete elettrica. Tale soluzione permette di ampliare notevolmente il range di velocità del vento ammissibili per il funzionamento della macchina, abolendo la necessità che queste siano praticamente costanti al fine di mantenere condizioni di sincronismo. Sono quindi sempre più diffuse installazioni con turbine a velocità variabile che permettono di ottenere valori di efficienza di conversione molto elevati anche con significative variazioni di velocità del vento, ottimizzando così l'energia prodotta.
- Navicella e sistema di imbardata. Qui sono compresi la copertura in cui vengono installati tutti i componenti per la conversione e avente funzione di protezione, tutti i componenti di supporto e il sistema di orientamento del rotore avente il compito di seguire la direzione di incidenza del vento. Tale meccanismo di è controllato grazie all'utilizzo di sensori in grado di modificare la posizione del rotore al variare della direzione del vento.
- Torre e fondazioni. L'altezza della torre è tipicamente pari a 1,5 volte il diametro del rotore e generalmente non scende mai al di sotto dei 20 m. La rigidezza della torre è il principale parametro da tenere in considerazione nella valutazione della dinamica delle turbine eoliche a causa della possibilità di vibrazioni accoppiate tra torre e rotore. Quando si progetta la disposizione dei diversi sistemi nel caso in cui si realizzino impianti costituiti da più aerogeneratori (in gergo tecnico wind farm) bisogna tenere conto della mutua interferenza tra le turbine in termini di dinamica, fluttuazioni di potenza e generazione di rumore al fine di evitare effetti indesiderati.
- Sistemi di controllo. Essi sono strumenti di fondamentale importanza al fine di garantire un corretto esercizio dell'impianto e una ottimale produzione di potenza. Fanno parte di

questa famiglia: i sensori di velocità, posizione, temperatura, tensione ecc., i controllori di tipo meccanico o elettrico, gli attuatori, le valvole, gli interruttori, i microprocessori ecc. Le funzioni principali di tali componenti riguardano la limitazione degli sforzi esercitati sul sistema di trasmissione, la massimizzazione della vita d'impianto garantendo la limitazione della fatica di tutti i componenti presenti in seguito a variazioni di velocità e direzione del vento, presenza di turbolenza, cicli di fermata e avvio della turbina. Tali sistemi contribuiscono, inoltre, alla massimizzazione dell'energia prodotta e alla riduzione della probabilità di guasti e malfunzionamenti.

- Componenti secondari. Essi sono tutti quei componenti che permettono una corretta trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica in rete come trasformatori, cabine elettriche, convertitori elettronici ecc.

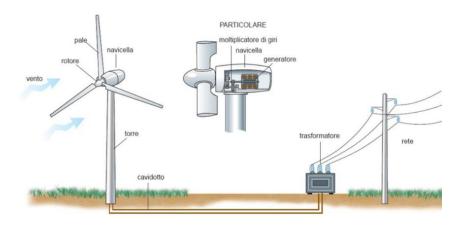


Figura 2-27 - Principali componenti di un impianto di produzione da fonte eolica

# 2.2.4 O&M negli impianti eolici

La definizione di manutenzione viene fornita dalla norma tecnica CEI 56-50,1997 secondo cui 'la manutenzione è la combinazione di tutte le azioni tecniche e amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o riportare un'entità in uno stato in cui possa svolgere la funzione richiesta'.

Se si fa riferimento a un impianto eolico, la cui durata di vita si attesta in media sui 25-30 anni, il sistema di manutenzione ricopre un ruolo fondamentale al fine di garantire un corretto funzionamento dell'aerogeneratore, ridurre i tempi di mancata produzione dell'impianto a causa di guasti o fermi, diminuire la probabilità che si verifichino malfunzionamenti al fine, da un lato, di massimizzare la producibilità e i corrispondenti ricavi, dall'altro di ridurre al minimo il rischio di incidenti.

La progettazione esecutiva di tale tipologia di impianti prevede dunque la programmazione dei lavori di manutenzione diviso secondo i seguenti punti:

- Manutenzione programmata;
- Manutenzione ordinaria;
- Manutenzione straordinaria.

Quando si parla di manutenzione programma si fa riferimento a una manutenzione di tipo preventivo eseguita in data ed intervalli di tempo fissati al fine di prevenire la manifestazione di gusti dell'impianto. Per i sistemi eolici essa può essere suddivisa in macroaree riguardanti la struttura impiantistica, le strutture-infrastrutture edili o gli spazi esterni.

La manutenzione ordinaria comprende gli interventi finalizzati a contenere il degrado in seguito al normale funzionamento dell'impianto, al fine di garantire la vita utile prevista.

Per manutenzione straordinaria si intendono invece tutti gli interventi che non possono essere programmati a priori e il cui scopo è il ripristino delle normali condizioni operative dei componenti che presentano guasti e/o anomalie.

Le attività che vengono eseguite durante le operazioni di manutenzione degli impianti eolici sono svariate e interessano tutti i principali elementi costitutivi la turbina:

- Ispezioni sul sistema di trasmissione;
- Ispezioni sul generatore;
- Ispezioni sui sistemi elettrici (trasformatore, cabine elettriche, ecc.);
- Ispezioni sulla struttura di sostegno;
- Ispezioni sulle pale del rotore.

I malfunzionamenti all'interno di una turbina eolica posso essere molto critici dal punto di vista delle conseguenze economiche e dell'impatto ambientale che ne può derivare.

I guasti nei sistemi di trasmissione risultano tra i malfunzionamenti più frequenti in questo tipo di impianti, pregiudicando la possibilità da parte della turbina di produrre energia elettrica e richiedendo periodi di fermo per garantire la sostituzione dei componenti danneggiati. Anche i danni strutturali a pale o alla torre sono abbastanza frequenti. Le prime possono infatti essere soggette ad alti carichi generati da forti venti o impatto di uccelli che ne possono provocare la rottura; anche la forte variabilità degli sforzi cui gli elementi strutturali di un sistema eolico sono sottoposti rappresentano un punto di criticità non indifferente. I componenti elettrici presenti nel generatore sono ulteriori elementi che posso essere causa di incidenti come incendi all'interno della navicella, i quali risultano di difficile estinzione a causa delle elevate altezze.

Tra le anomalie che con maggiore frequenza si riscontrano negli aerogeneratori si riconoscono guasti ai cuscinetti presenti nel sistema di trasmissione o nel generatore dovuti alle più svariate cause, disallineamento tra sistema di trasmissione e generatore, contaminazione o scelta non corretta dell'olio lubrificante, sbilanciamento del rotore, cricche o rotture nelle pale ecc.

Al fine di rilevare tali guasti e intervenire per riparare possibili anomalie esistono svariate tipologie di ispezione che vengono condotte sulle turbine eoliche. Tra queste è possibile riconoscere:

- Ispezioni visive condotte su diversi componenti del sistema al fine di redigere check list in cui vengono annotate tutte le anomalie riscontrate. Esse possono essere condotte sulle pale o possono riguardare il controllo del livello dell'olio lubrificante o dello stato dei ventilatori di raffreddamento;
- Analisi acustiche. Esse permettono di individuare eventuali funzionamenti non corretti del sistema di trasmissione o del generatore nel caso in cui vengano riscontrate deviazioni rispetto alle emissioni tipiche del corretto funzionamento;
- Analisi delle vibrazioni. Esse fanno parte delle attività svolte in regime di manutenzione sotto condizione, ossia di quel sistema di monitoraggio di parametri caratteristici al fine di prevedere, durante l'esercizio, il degrado dei componenti e prevenire l'insorgere di guasti, ottimizzando così gli interventi di manutenzione. L'analisi delle vibrazioni riguarda principali i cuscinetti presenti all'interno del sistema che sono soggetti a maggiore stress meccanico all'aumentare della velocità di rotazione. Analizzando le vibrazioni è infatti possibile identificare possibili cause di guasto conoscendo le frequenze caratteristiche dei componenti (cuscinetti nel caso in esame) in funzione della loro velocità di rotazione.
- Analisi degli oli lubrificanti. Analisi condotta al fine di valutare che le condizioni del fluido, la presenza di contaminanti, il livello di acidità, il contenuto d'acqua ecc. siano accettabili e non provochino il danneggiamento dei componenti meccanici posti all'interno della navicella.
- Diagnosi elettriche di generatori, trasformatori ecc.
- Termografie e misure di temperatura. Esse vengono utilizzate per verificare le condizioni dei sistemi ad alta tensione presenti nell'impianto, in cui i picchi di temperatura rappresentano sintomo di anomalie, o per verificare la presenza di stress meccanico nel rotore o nella torre di sostegno, cricche, presenza di ghiaccio ecc.

L'analisi svolta nel seguente studio ha riguardato principalmente le attività di ispezione svolte sulle pale delle turbine eoliche, trattandosi al momento delle operazioni maggiormente coinvolte dal passaggio da ispezioni di tipo tradizionale a ispezioni robotizzate e per cui si sono riscontrati i maggiori vantaggi in termini di efficienza, risparmio economico e incremento della sicurezza di ispezione.

# 2.2.5 Principali anomalie e modalità di ispezione delle pale eoliche

Le pale del rotore di un aerogeneratore rappresentano uno dei componenti chiave per una efficiente produzione di energia elettrica a partire dall'energia cinetica posseduta dal vento; esse hanno un impatto rilevante in termini di costo globale di costruzione dell'impianto (15/20%) e di manutenzione. A causa del loro ruolo chiave nel processo di conversione, eventuali malfunzionamenti o guasti hanno un conseguenze rilevanti in termini di capacità di produzione dell'aerogeneratore; la tipica costruzione in ambienti isolati e di difficile raggiungimento delle turbine e la elevata altezza a cui le pale si trovano, fanno sì che, in caso

di manifestazione di anomalie, i tempi richiesti per le riparazioni e i tempi di fuori servizio siano considerevoli, con conseguenti elevate perdite economiche dovute alla mancata produzione. Non trascurabili risultano, inoltre, le possibili conseguenze in termini di sicurezza per gli operatori e l'impatto ambientale dovute alla rottura delle pale. Per i motivi appena citati, il corretto riconoscimento delle anomalie e la loro rapida risoluzione risulta una pratica fondamentale nelle attività di O&M dei sistemi eolici.

Le cause che possono scaturire rotture nelle pale degli aerogeneratori sono svariate: vento, forti tempeste, caduta di fulmini, accumulo di ghiaccio, fatica dei materiali, difetti di produzione o installazione ecc. In particolare, l'effetto dei fulmini riguarda la parte più esterna della pala potendo causare fenomeni di 'delaminazione' del materiale, scollamento o distaccamento di componenti; il forte vento può provocare la rottura della pala; l'accumulo di ghiaccio porta a fenomeni di instabilità nella rotazione della pala, perdite aerodinamiche, fermi non programmati e rischi in termini di sicurezza ecc.

Tipiche anomalie che possono manifestarsi sulla pala sono:

- Cricche con conseguente aumento della rugosità della superficie;
- Distaccamento del rivestimento;
- Delaminazione con conseguente riduzione della rigidezza del componente;
- Rottura delle fibre;
- Perdite di adesione tra i vari strati;
- Altro

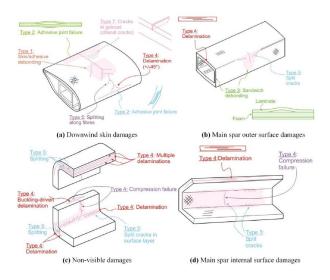


Figura 2-28 - Principali difetti riscontrabili in una pala eolica

Al fine di evitare che tali anomalie si manifestino o che portino al collasso dell'intera struttura esistono diversi metodi di rilevazione dei difetti.

Il primo metodo cui si può fare riferimento è la rilevazione di danni o condizioni di elevato stress meccanico della pala attraverso l'analisi dello stato di deformazione per mezzo di estensimetri posti sulla superficie o tra gli strati costituenti il componente. Dalla valutazione delle deformazioni assiali o trasversali è infatti possibile identificare espansioni o contrazioni

anomale dovute ad eccessivi stress termici o meccanici che possono portare alla rottura del materiale. Il principale vantaggio di tale metodo è costituito dalla possibilità di operare un monitoraggio in continuo della pala durante il funzionamento. Dall'altro lato però l'accuratezza della misura è strettamente dipendente dalla distanza tra il sensore e il punto danneggiato e per tale motivo per riuscire a coprire tutta la pala è necessario un elevato numero di sensori.

Il secondo metodo che può essere utilizzato per monitorare lo stato di salute della pala si basa sulla rivelazione di onde sonore. L'insorgere di un danno e la conseguente propagazione della cricca o la deformazione plastica provocano il rilascio di energia all'interno della struttura con conseguente emissione di onde acustiche ad alta frequenza; attraverso l'utilizzo di opportuni sensori è possibile rilevare tali onde e convertirle in segnali elettrici con lo scopo di studiarne i parametri caratteristici come ampiezza, periodo, frequenza, ecc.

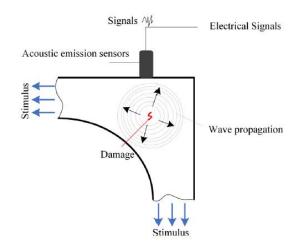


Figura 2-29 - Rappresentazione processo di rilevamento acustico

Il confronto della caratteristica rilevata con la forma d'onda tipica del materiale in condizioni di corretto funzionamento permette di identificare eventuali danni, permettendo di definire il momento e il punto in cui essi si manifestano, così come la loro criticità. I principali svantaggi riguardano la necessità di installare un elevato numero di sensori al fine di permettere una sufficiente vicinanza con i punti in cui si manifesta il danno, la necessità di un sistema di acquisizione dati e la capacità di riuscire a distinguere le onde di interesse all'interno di ambienti rumorosi che generano significativi disturbi di fondo.

Due ulteriori metodologie che vengono applicati sono il sistema ad ultrasuoni e l'analisi delle vibrazioni. Il primo sfrutta una tecnica ampiamente utilizzata in ambito industriale per il monitoraggio dello stato di salute di componenti; il principio di funzionamento sfrutta i fenomeni di propagazione, riflessione e rifrazione delle onde elastiche nei mezzi interposti. Attraverso un generatore di onde (trasduttore) gli ultrasuoni vengono trasferiti direttamente nel materiale da controllare grazie al contatto o semplice accostamento del generatore. Quando il fascio di onde incontra il componente verrà riflesso, assorbito o deviato secondo le leggi di propagazione delle onde. Il segnale di partenza degli ultrasuoni e quello riflesso dalla superficie opposto a quella d'entrata vengono quindi riportati su uno schermo sottoforma di picchi e se tra essi ne compaiono altri si è in presenza di discontinuità intermedie e anomalie che hanno operato da riflettori. Il principale vantaggio di questo metodo riguarda la capacità di operare

ispezioni precise e di rilevare anche difetti interni. Gli svantaggi riguardando invece le complicazioni riguardanti il processamento del segnale, il prolungato tempo di acquisizione e la necessità di contatto tra lo strumento e la superficie.

L'analisi delle vibrazioni consiste invece nella rivelazione di malfunzionamenti grazie all'individuazione di vibrazioni anomale causate da oscillazioni irregolari, deformazioni ecc. Essa può essere condotta grazie all'utilizzo di sensori di velocità o accelerometri. Negli ultimi anni si stanno compiendo anche studi relativi all'utilizzo di laser al fine di sviluppare tecniche di ispezione a distanza. Le principali difficoltà relative all'analisi delle vibrazioni riguardano l'influenza delle condizioni ambiente e la difficile distinzione tra vibrazioni causate da anomalie e vibrazioni dovute a fenomeni esterni o al normale funzionamento del rotore.

Le ultime due tecniche che possono essere utilizzate per l'ispezione delle pale sono l'analisi termografica e l'analisi *machine vision*.

L'utilizzo delle termocamere o dei sensori di temperatura viene utilizzato per identificare i punti all'interno della pala in cui si registrano picchi di temperatura dovuti all'insorgere di difetti o malfunzionamenti. Il processo di utilizzo delle immagini termografiche prevede una ricostruzione dell'intera pala attraverso la sovrapposizione di diversi fotogrammi in cui è riportata la distribuzione di temperatura come riportato nella figura seguente;

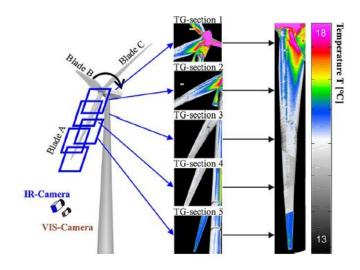


Figura 2-30 - Esempio di termografia di una pala eolica

Come si può facilmente intuire in questo caso risulta vitale operare un corretto processamento delle immagini ma soprattutto riuscire a eliminare gli effetti provocati da fenomeni esterni. Se da un lato il monitoraggio a distanza e la velocità di esecuzione sono punti di forza di tale metodo, d'altro canto attraverso l'indagine termografica non è possibile rilevare difetti allo stato embrionale e l'interpretazione delle immagini è fortemente influenzata dalla temperatura e dall'umidità dell'aria circostante.

Con il termine *machine vision*, invece, si fa riferimento all'esecuzione ed interpretazione di ricostruzioni 2D o 3D dell'aerogeneratore. Tale ricostruzione viene ottenuta ancora una volta grazie alla sovrapposizione di più fotogrammi, questa volta ottenuti da semplici fotocamere operanti da diverse prospettive; le immagini ottenute vengono quindi processate attraverso algoritmi che svolgono quindi un ruolo fondamentale per l'identificazione dei difetti.

Attraverso tale metodologia è possibile operare ispezioni di tipo non distruttivo e a distanza; l'efficacia della tecnica è fortemente dipendente dall'esperienza e dalle conoscenze dell'operatore che ispeziona le immagini; esse infatti riportano lo status quo della pala senza ulteriori modifiche o variazioni. I recenti passi in avanti in materia di machine vision, algoritmi di machine learning ecc. rendono tale tecnica sempre più interessante, aprendo le porte ad applicazioni sempre più diffuse ed attraenti in termini di sicurezza per gli operatori e competitività economica.

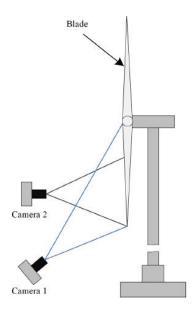


Figura 2-31 - Esempio di tecnica di acquisizione immagini

# 2.2.6 Droni e robot negli impianti eolici

Con il progressivo aumento della taglia degli aerogeneratori costruiti e il conseguente aumento delle dimensioni del rotore, l'importanza di una corretta manutenzione delle pale eoliche diventa sempre più significativa in termini di efficienza d'impianto e di costi ad esso associati.

Tra le attività di manutenzione maggiormente eseguite si riconoscono le ispezioni visive delle pale eoliche; i metodi tradizionali con cui tali operazioni vengono eseguite consistono in ispezioni con corda in cui gli operatori si arrampicano lungo l'aerogeneratore, ispezioni eseguite mediante l'utilizzo di gru o attività fatte da terra attraverso fotocamere ad alta risoluzione. Come si può intuire, tali metodologie risultano altamente pericolose nei primi due casi o non eccessivamente efficienti nell'ultimo a causa della cattiva risoluzione delle immagini o di angoli di presa limitati. Dati relativi al Regno Unito riportano, ad esempio, che nel 2016 sono stati registrati 163 incidenti nell'industri eolica di cui 5 fatali. In aggiunta, la scarsa propensione alla standardizzazione dei risultati e dei dati ottenuti in seguito all'ispezione possono provocare non poche difficoltà nella corretta previsione di rotture, nell'identificazione delle anomalie e nella capacità di compiere analisi critiche dello stato di salute dell'impianto.



Figura 2-32 - Esempio di ispezione su corda

L'utilizzo di droni e robot rappresenta la principale soluzione per superare le difficoltà associate all'ispezione di pale eoliche.

Le ispezioni eseguite attraverso droni permettono di ottenere significativi vantaggi rispetto alle operazioni tradizionali in termini di:

- Sicurezza. Decade la necessità di avere operatori che svolgono attività a centinaia di metri di altezza.
- Rapidità di esecuzione. Come dichiarato dagli operatori di Enel Green Power si passa da un tasso di 4/5 turbine ispezionate al giorno utilizzando la tecnica tradizionale a 18/20 attraverso l'uso dei droni.
- Efficienza di ispezione e risparmi economici. L'utilizzo di questa nuova tecnologia permette di ottenere una migliore qualità delle immagini ottenute e di rilevare punti non raggiungibili con i metodi tradizionali. Se si confrontano le ispezioni operate da terra con le ispezioni operate da droni, secondo una stima dell'azienda *Measure*, nel primo caso si rileva tipicamente il 15/20% di danni in meno con maggiori probabilità di fuori servizio e perdite di energia. L'utilizzo di droni permette quindi di rilevare in maniera più efficace anomalie nelle pale, con la conseguente capacità di intervenire in maniera tempestiva ed evitare danni più critici che possono portare a significative perdite di energia e mancati introiti o alla necessità di costosi interventi di manutenzione e prolungati fermi dell'impianto.

Esistono tre tipologie di ispezione con drone: manuale, semi-autonoma, autonoma. Le ispezioni manuali sono quelli ispezioni in cui il drone viene comandato da un pilota esperto da remoto. Nell'ispezione semi-autonoma si ha una combinazione tra la manipolazione della posizione delle pale in posizioni prestabilite e l'identificazione manuale del percorso compiuto dal drone. Nel caso interamente autonomo, che risulta ad oggi la soluzione commercialmente meno diffusa a causa delle complicazioni previste, il drone è in grado di percepire in maniera autonoma la presenza della pala e di modificare, attraverso algoritmi di intelligenza artificiale, il percorso di

volo eseguito in maniera tale da ottenere il maggior numero di informazioni e il percorso più breve.



Figura 2-33 - Ispezione turbina eolica con drone

I vantaggi che si ottengono grazie all'utilizzo di droni sono principalmente dovuti al valore posseduto dal dato acquisito. Le caratteristiche principali riguardano:

- La precisione dei dati. L'utilizzo dei droni consente di ottenere dati molto precisi se paragonati ad un'ispezione condotta con metodi tradizionali. Con tale tecnologia è possibile ottenere con precisione le medesime informazioni senza però interrompere la produzione o impiegando meno tempo per compiere la stessa ispezione.
- Il dettaglio dei dati. Attraverso l'integrazione di camere ad alta risoluzione e di ultima generazione è possibile portare alla luce anche i minimi dettagli che ad occhio nudo potrebbero sfuggire. I droni, inoltre, permettono di catturare immagini da diverse angolazioni, cosa che molto spesso non è possibile con gli altri metodi.
- La capacità di creare storici. Una delle caratteristiche principali del dato digitale è la tracciabilità e potenzialmente la vita infinita. Ciò consente agli operatori di paragonare i risultati delle ispezioni di anno in anno, creando un database in cui viene riportata la storia dello stato di degrado dei vari componenti col passare del tempo.
- La trasferibilità dei dati. Nonostante la grande quantità di informazioni registrate, queste sono comunque facilmente modificabili e trasferibili così da essere sempre disponibili.
- La possibilità di analisi ed elaborazione dei dati. I dati ottenuti dal drone possono essere analizzati ed elaborati in totale libertà al fine di ottenere le informazioni necessarie.

A questo punto bisogna capire come effettivamente vengono eseguite le ispezioni delle pale eoliche con droni, come è costituita la catena del valore e quali attività è necessario svolgere.

Oltre all'ispezione vera e propria eseguita col drone risulta infatti fondamentale una corretta gestione e un adeguato processamento dei dati ottenuti al fine di rendere effettivamente

vantaggiosa e più efficiente l'attività di controllo. Tali attività aggiuntive vengono svolte grazie all'ausilio di software e piattaforme in grado di controllare l'ispezione dall'inizio alla fine.

Le fasi che vengono seguite sono: fase preliminare, fase di collezione dati e immagini, fase di processamento dei dati raccolti, fase di analisi dati, fase di generazione di report e visualizzazione delle informazioni ottenute, fase di intervento.

La fase preliminare risulta fondamentale al fine di definire il tipo di attività da voler svolgere e gli obiettivi che si vogliono raggiungere. In funzione delle scelte fatte viene definito il programma di ispezione più adeguato e impostate le linee guida da seguire.

Dal punto di vista tecnico è in questa fase che, in funzione delle condizioni ambientali del sito in cui l'aerogeneratore è costruito, viene operata la scelta del drone da utilizzare. L'ispezione delle pale eoliche richiede caratteristiche ben definite del drone a causa delle condizioni a contorno estreme da dovere affrontare. Il dispositivo deve risultare leggero ma allo stesso tempo robusto per potere volare agilmente anche in presenza di forti venti; deve essere dotato di protezioni che permettano di resistere e non provocare danni nel caso di collisioni accidentali; presenta rotori in numero ridondante; è dotato di fotocamere ad altissima risoluzione al fine di ottenere informazioni di alta qualità.

Dal punto di vista gestionale, prima che il drone si alzi in volo, è necessario che venga eseguita una corretta gestione del pilota, assicurandosi che sia munito della licenza di volo obbligatoria per legge e che essa non sia scaduta. In questa fase ci si assicura inoltre che il percorso scelto durante il piano di volo non presenti delle restrizioni dal punto di vista normativo e che siano stati rilasciati da parte delle autorità preposte tutti i permessi di volo necessari. Viene infine operato un controllo sullo stato di salute del drone, al fine di evitare malfunzionamenti indesiderati durante il volo.

Durante la fase di collezione dati l'operatore svolge, in ordine, le seguenti attività:

- 1. Definisce il piano di volo;
- 2. Al fine di evitare potenziali problemi, viene simulato il volo aggiungendo, se necessario, condizioni al contorno aggiuntive;
- 3. Una volta sul sito l'operatore carica il piano di volo e lo esegue;
- 4. Inizia la raccolta di tutte le informazioni necessarie attraverso l'esecuzione di fotografie alle sezioni da volere ispezionare;
- 5. Eseguita la missione di volo, l'operatore può decidere se ripetere l'attività nel caso in cui sia richiesta una ispezione più dettagliata di determinate zone.

Durante la fase di processamento e analisi dei dati le immagini o vengono scaricate dall'operatore, scelte le più adeguate e analizzate manualmente da personale esperto oppure si possono utilizzare opportuni software e piattaforme il cui scopo è di operare il processamento delle immagini, selezionando soltanto quelle di buona qualità, e di generare visuali in cui vengono riportati i dettagli dello stato di salute della pala, gli eventuali guasti o danni presenti e classificati in funzione della loro gravità. Questo processo fornisce agli ingegneri di manutenzione uno strumento di grande supporto durante la decisione delle attività da svolgere.

Good Condition
 Superficial Damage
 Functional Damage
 Structural Damage
 Substantial Structural Damage

Figura 2-34 - Esempio di classificazione delle anomalie riscontrate

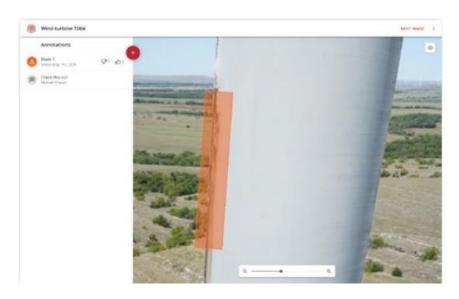


Figura 2-35 - Esempio di visuale con identificazione dell'anomalia

Nella fase finale vengono generati dei report riassuntivi dell'ispezione condotta. Tali report vengono salvati e conservati all'interno della piattaforma, permettendo di costruire uno storico dello stato di salute dei componenti monitorati.

Una ulteriore applicazione nell'utilizzo di droni per le ispezioni delle pale riguarda l'utilizzo di termocamere installate nei velivoli. Il modus operandi è del tutto simile a quanto visto fino adesso, con la differenza che come output si ottengono immagini termografiche attraverso le quali è possibile rilevare i difetti presenti nella pala analizzando gli hotspot identificati.

Esistono e si stanno sviluppando anche diverse soluzioni che prevedono l'utilizzo di robot in grado di scalare le torri degli impianti eolici. Questi robot sono dotati di ruote magnetiche in grado di aderire alla superficie metallica della torre e scalarla, al fine di raggiungere le pale.

Lo scopo di queste macchine è la pulizia delle pale nel caso in cui siano equipaggiati con opportune spazzole, ottenere foto ad alta risoluzione nel caso siano accompagnati da fotocamere oppure operare ispezioni sugli strati interni della pala grazie all'utilizzo dei sistemi ad ultrasuono precedentemente descritti; in questo modo è possibile individuare in maniera

completamente automatizzata eventuali danni interni prima che essi sfocino in cedimenti catastrofici e che attraverso l'analisi di semplici fotografie non potrebbero essere rilevati.



Figura 2-36 - Esempi di robot per applicazioni eoliche

## 2.3 Impianti idroelettrici

La terza e ultima tecnologia di produzione di energia elettrica che verrà analizzata nel seguente elaborato è la tecnologia idroelettrica. Anche questo comparto negli ultimi anni sta conoscendo una profonda trasformazione, trainata da un processo di digitalizzazione e robotizzazione che interessa le fasi di progettazione, costruzione, esercizio e manutenzione degli impianti.

Negli impianti che hanno affrontato tale processo è sempre più frequente trovare modelli digitali dell'intero sistema, i cosiddetti 'digital twin', attraverso cui è possibile simulare diversi scenari e configurazioni di esercizio.

Anche l'utilizzo di droni e robot sta cominciando a prendere sempre più piede nelle operazioni di ispezione o manutenzione delle opere idroelettriche, risultando uno strumento fondamentale al fine di incrementare l'efficienza operativa di alcune tra le attività di Operation&Maintenance tipicamente svolte per questa tipologia di impianti.

In questo capitolo, dopo una presentazione generale dei principi di funzionamento dei sistemi di produzione di potenza, verranno descritti alcuni dei processi di ispezione o manutenzione che stanno affrontando il passaggio da metodi tradizionali a metodi 'robotizzati', sottolineando i vantaggi che tale trasformazione sta apportando.

### 2.3.1 Principio di funzionamento e cenni sulle turbine utilizzate

Gli impianti idroelettrici operano la trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale posseduta da una determinata massa d'acqua in energia meccanica attraverso una turbina e in energia elettrica attraverso un alternatore.

Per potere valutare la potenza che può essere estratta dalla massa d'acqua e quanto di essa può essere convertita in energia elettrica si fa riferimento alle leggi della meccanica dei fluidi e ai rendimenti delle macchine che entrano in gioco nel processo di conversione. Si applichi, in particolare, il primo principio della termodinamica in forma euleriana meccanica tra una sezione di monte 1 e una sezione di valle 2 per un fluido incomprimibile (a densità costante) con lo scopo di ottenere il lavoro estraibile per mezzo di una macchina operatrice:

$$L_{i,ott} = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{{v_1}^2 - {v_2}^2}{2} + g(z_1 - z_2) - L_w$$
 18)

Con:

 $L_{i.ott}$  = lavoro ideale ottenuto dalla turbina;

 $p_1 e p_2$  = pressioni rispettivamente di monte e di valle;

 $v_1 e v_2$  = velocità rispettivamente di monte e di valle;

 $z_1 e z_2$  = quote rispettivamente di monte e di valle;

g = accelerazione gravitazionale;

 $L_w$  = lavoro perso per a causa di fenomeni di attrito lungo le condotte e nella turbina;

Dividendo tutti i termini per l'accelerazione gravitazionale g è possibile ottenere un'equazione in cui tutti i termini rappresentano delle quote. Si definiscono allora l'altezza piezometrica  $(\frac{p}{\rho a})$ ,

l'altezza cinetica ( $\frac{v^2}{2g}$ ) e l'altezza geodetica (z); la somma tra altezza piezometrica e altezza geodetica restituisce la quota piezometrica (H) che sommata all'altezza cinetica fornisce il carico totale ( $H^0$ ):

$$H^{0} = H + \frac{v^{2}}{2g} = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^{2}}{2g} + z$$
 19)

E' possibile allora riformulare il bilancio descritto dall'eq.18 introducendo le grandezze appena espresse e definendo la *caduta disponibile*  $(H_d)$ , come la differenza tra i carichi totali nelle sezioni di monte e di valle, la *caduta utile o salto motore*  $(H_u)$  come la differenza tra la caduta disponibile e le *perdite di carico*  $(Y_c)$ , presenti nel collegamento tra il bacino di monte e la turbina e dovute alla eventuale presenza di condotte forzate o perdite di imbocco nel distributore:

$$H_u = H_d - Y_c 20)$$

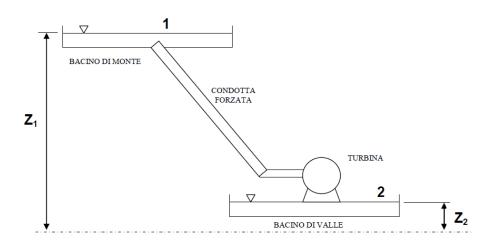


Figura 2-37 - Schema semplificato di un sistema idroelettrico

Al fine di potere individuare la potenza ricavabile dalla conversione e riformulare la trattazione in maniera più compatta, è importante introdurre alcuni rendimenti. Si definisce *rendimento della condotta*  $\eta_c$  il rapporto tra la caduta utile e quella disponibile:

$$\eta_c = \frac{H_u}{H_d} = \frac{H_d - Y}{H_d}$$
 21)

Esso indica le perdite incontrate dal fluido all'interno della condotta forzata e dovute alla presenza delle resistenze distribuite e concentrate. Da esso capiamo che la caduta disponibile è quella messa a disposizione dal fluido in funzione delle condizioni di altezza, velocità e pressione a cui esso si trova nelle sezioni di monte e valle, mentre la caduta utile tiene conto delle perdite introdotte dal tubo all'interno del quale la portata scorre. A sua volta, però, non tutta la caduta utile viene convertita in lavoro a causa delle perdite incontrante in turbina ed in particolare nel distributore, nella girante e nel diffusore; si definiscono allora il *rendimento idraulico della turbina*  $\eta_y$  e il *rendimento volumetrico*  $\eta_v$ . Il primo tiene in considerazione la somma delle perdite che si manifestano nel distributore, nella girante e nel diffusore, mentre il secondo fa riferimento alle perdite di portata che si manifestano in corrispondenza dei giochi della turbina  $\Delta G$ :

$$\eta_{\mathcal{Y}} = \frac{H_u - \sum h_w}{H_u} \tag{22}$$

Con

 $\sum h_w$  = somma delle perdite nei componenti della turbina

$$\eta_v = \frac{G - \Delta G}{G}$$
 23)

Dove

G = portata trattata dalla turbina ed espressa in  $m^3/s$ ;

 $\Delta G$  = portata persa attraverso i giochi;

Parte della potenza interna che il fluido è in grado di trasferire alle palette della turbina viene però persa per attrito meccanico o impiegata per azionare eventuali sistemi ausiliari. Un nuovo rendimento, chiamato rendimento meccanico  $\eta_m$  permette di identificare tali perdite:

$$\eta_m = \frac{P_u}{P_i} \tag{24}$$

In cui

 $P_i$  è la potenza interna, ossia la potenza trasmessa dal fluido alle palette;

 $P_u$  è la potenza utile, ossia la potenza effettivamente estraibile al netto delle perdite meccaniche.

Tenendo conto di tutti i rendimenti introdotti è possibile scrivere la potenza utile, ossia la potenza meccanica estraibile dalla turbina, in funzione della caduta utile o della caduta disponibile messa in gioco dal fluido:

$$P_{u} = \eta_{m} P_{i} = G \eta_{m} \eta_{v} L_{i} = G \eta_{m} \eta_{v} \eta_{y} g H_{u} = G \eta_{t} \eta_{c} g H_{d} = G \eta_{g} g H_{d}$$
 25)

Dove

 $\eta_t = \eta_m \eta_v \eta_y = rendimento totale della turbina;$ 

 $\eta_g = \eta_t \eta_c = rendimento globale dell'impianto;$ 

La potenza elettrica  $P_e$  sarà infine ottenuta moltiplicando la potenza utile precedentemente ricavata per il rendimento elettrico  $\eta_e$ .

L'organo principale che negli impianti idroelettrici permette la conversione dell'energia posseduta dal fluido è quindi la turbina. Le turbine idrauliche sono macchine costituite essenzialmente da un organo fisso, il distributore, e uno mobile, la girante.

La funzione del distributore è quella di indirizzare il fluido sulla girante in maniera da avere i minimi urti, variare la portata utilizzata operando da organo di regolazione e provocare la trasformazione dell'energia di pressione del fluido in energia cinetica. Se tale trasformazione è completa, la corrente si trova all'interno della girante a pressione atmosferica e la turbina si dice ad azione, altrimenti la pressione all'interno della girante conserva un certo valore superiore alla pressione atmosferica e la turbina si dice a reazione.

La più importante turbina idraulica ad azione è la turbina Pelton: il distributore consta di un tubo introduttore, che reca all'estremità un ugello nel quale la corrente viene accelerata. All'interno del tubo introduttore si ha la presenza di una spina (ago Doble) che, spostandosi assialmente, varia la sezione di uscita e quindi la portata, essendo la velocità costante. Il getto investe tangenzialmente la girante, costituita da una ruota su cui sono installate un certo numero di pale aventi la caratteristica forma a doppio cucchiaio e munite di uno spigolo centrale che taglia in due il getto incidente. L'installazione normale è ad asse orizzontale, mentre nel caso di gruppi con 4 getti per ruota la disposizione adottata è ad asse verticale.

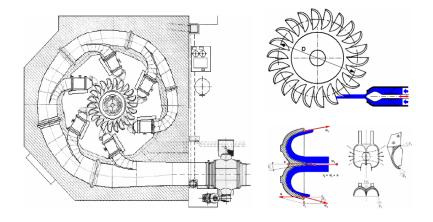


Figura 2-38 - Turbina Pelton

Nelle turbine a reazione soltanto una parte dell'energia disponibile viene convertita in energia cinetica. Ciò che si verifica è che con il restringersi delle sezioni l'energia di pressione contenuta nel fluido viene gradualmente convertita in energia di velocità.

Le turbine a reazione maggiormente diffuse sono la turbina Francis e la turbina Kaplan.

La turbina Francis è costituita da una prima zona a spirale con la funzione di rendere uniforme la pressione del fluido. In uscita dalla spirale il fluido giunge nel distributore costituito da una serie di palette mobili che, da un lato, garantiscono la corretta direzione del flusso, dall'altro, possono ruotare al fine di variare la luce di passaggio e regolare così la portata. A questo punto l'acqua, attraverso un moto radiale, raggiunge la girante costituita da un mozzo centrale e da una corona all'interno dei quali si ha la presenza delle pale che garantiscono il moto e convogliano il fluido verso la zona di scarico. Le turbine Francis vengono classificate, in base al numero di giri caratteristico, in lente, normali e veloci. L'installazione normale per questo tipo di turbine è ad asse verticale.

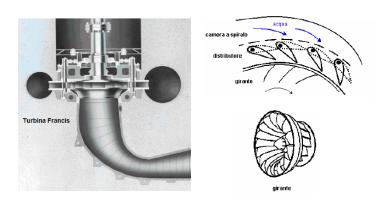


Figura 2-39 - Turbina Francis

La turbina Kaplan infine è costituita da una girante ad elica con pale orientabili; al variare della portata in ingresso si ottiene una variazione dell'inclinazione della palettatura al fine di avere una velocità di uscita assiale. Tale condizione ha un effetto favorevole anche nel funzionamento a caduta variabile e ciò è di grande importanza per quelle turbine che sono destinate a funzionare negli impianti fluviali con forti oscillazioni di salto. L'installazione più comune per le Kaplan

è ad asse verticale e nonostante il costo molto più alto rispetto alle altre varianti i vantaggi che presentano ne spingono l'adozione anche per salti di oltre 60 metri.

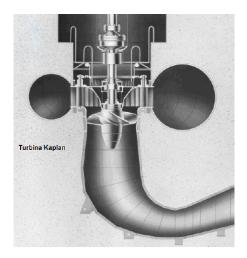


Figura 2-40 - Turbina Kaplan

La scelta del tipo di turbina è operata in funzione alle condizioni di salto netto e portata da utilizzare nell'applicazione in esame. In linea del tutto generale le turbine Pelton sono adatte per forti salti, le Francis per salti medi mentre le Kaplan vengono adottate nel caso di basse cadute con forti variazioni della portata.

## 2.3.2 Classificazione degli impianti ed elementi costitutivi

Nella fase di dimensionamento di una centrale idroelettrica è di fondamentale importanza la valutazione della *curva di durata delle portate* che indica il tempo in cui, in una determinata sezione, la portata è maggiore o uguale al valore riportato in ordinata. Tali dati vengono rilevati al fine di valutare il potenziale del corso d'acqua analizzato, essendo l'energia producibile direttamente proporzionale alla portata messa a disposizione.

Un parametro che deve inoltre essere tenuto fortemente in considerazione è *il deflusso minimo vitale:* esso indica la portata di deflusso minima che deve essere garantita, in seguito alla costruzione di opere artificiali, al fine di non alterare l'ecosistema del corso d'acqua. La valutazione di tale parametro è di fondamentale importanza al fine di riuscire a ottenere impianti che dal punto di vista economico dimostrino la loro fattibilità, giustificandone la costruzione.

La classificazione degli impianti idroelettrici può essere fatta sia in termini di potenza prodotta che in termini funzionali.

Dal punto di vista della potenza si riconoscono:

- Micro centrali idroelettriche (P<100kW);
- Mini centrali idroelettriche (P<1000kW);
- Piccole centrali idroelettriche (P<10000kW);

- Grandi centrali idroelettriche (P>10000kW);

Per quanto riguarda le caratteristiche funzionali si riconoscono invece impianti ad acqua fluente, impianti a serbatoio e impianti di accumulo tramite pompaggio.

Gli impianti ad acqua fluente sono sistemi che sfruttano la portata di fiumi e torrenti attraverso la costruzione di opere di sbarramento in grado di intercettare i corsi d'acqua e di centrali di produzione di energia elettrica situate sulla traversa stessa o nelle immediate vicinanze. A causa della forte variabilità delle portate dei corsi d'acqua sfruttati, tali impianti non presentano una grande capacità di regolazione e per tale motivo molto spesso operano in combinazione con sistemi in grado di variare la propria producibilità con più facilità. A questo genere di impianti si affida così un servizio di base con produzione continua secondo il salto e la portata istantaneamente disponibile. Per le loro caratteristiche costruttive gli impianti ad acqua fluente sono caratterizzati da elevate portate e basse cadute.

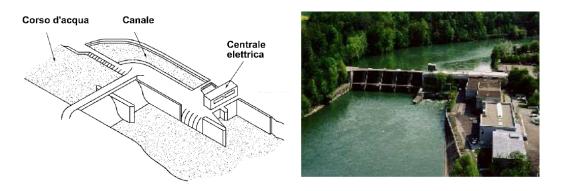


Figura 2-41 - Impianto ad acqua fluente

Gli impianti a serbatoio, invece, sono sistemi in cui attraverso la costruzione di dighe si riescono ad ottenere grandi bacini di raccolta dell'acqua (*invaso*) da cui viene in seguito prelevata l'acqua da mandare in turbina per la produzione di energia elettrica. Grazie alla presenza dell'invaso, quindi, in questo genere di impianti si ha una grande capacità di accumulo dell'acqua e, di conseguenza, di variare la producibilità d'impianto a seconda delle esigenze imposte dal carico. Tali impianti riescono quindi a soddisfare anche le richieste dei momenti di punta e in base alla capacità dei serbatoi si distinguono in:

- *Impianti con serbatoio a regolazione parziale*. Si tratta di sistemi in cui i serbatoi hanno dimensioni modeste, tali da permettere di regolare la produzione in relazione alle variazioni di carico giornaliere e settimanale.
- Impianti a regolazione totale. Essi sono dotati di serbatoi di notevole capacità in maniera tale da riuscire ad avere una completa regolazione dei deflussi annuali così da adattare il profilo della disponibilità a quello del consumo. A tali impianti si affida generalmente un servizio di punta, salvo nei periodi di forte richiesta in cui il carico può avere variazioni nelle 24 ore.
- *Impianti di sola integrazione o di punta*. Si tratta di impianti in cui i serbatoi sono in grado di trattenere integralmente i deflussi nei periodi di grande disponibilità di acqua

e destinati a funzionare soltanto nei periodi scarsa disponibilità in cui offrono un servizio di punta.

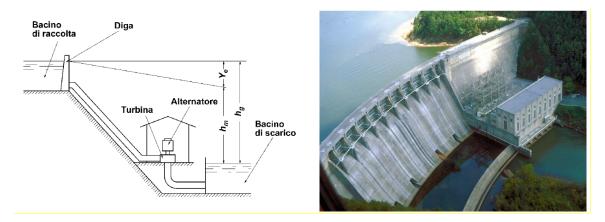


Figura 2-42 - Impianto a serbatoio

Gli impianti di accumulo tramite pompaggio sono impianti costituiti sia da una turbina idraulica che da un sistema per il pompaggio del fluido, o da un'unica macchina reversibile in grado di operare sia da generatore che da pompa. In tali impianti si ha la presenza di due bacini posti a due quote diverse e collegati attraverso sistemi di opere e tubazioni simili a quelle di un normale impianto idroelettrico. Il principio di funzionamento di tali sistemi consiste nel prelevare l'acqua dal bacino superiore per la produzione di energia elettrica e scaricarla nel bacino inferiore nei periodi in cui vi è una forte richiesta ed è quindi garantita un'elevata remunerazione: in tale configurazione la macchina idraulica funziona da generatore. Quando invece la domanda di energia è scarsa si preleva energia dalla rete a basso costo, la macchina idraulica funziona da pompa e viene riportata l'acqua dal bacino inferiore a quello superiore. L'energia richiesta per il pompaggio è maggiore rispetto a quella prodotta durante il funzionamento da generatore ma tale processo risulta conveniente dal punto di vista economico grazie alla differente valorizzazione dell'energia elettrica nei diversi periodi.

Gli elementi costitutivi di un impianto idroelettrico possono invece essere raggruppati in *opere* di captazione, opere di presa, opere di derivazione, condotte forzate, centrali elettriche e opere di restituzione.

Le opere di captazione sono tutte le opere che permettono la raccolta dell'acqua necessaria alla successiva produzione di energia elettrica come dighe, opere di sbarramento, canali di gronda, traverse fluviali, paratoie ecc.

Le opere di presa sono gli elementi costitutivi che permettono l'immissione dell'acqua nel canale derivatore e ne regolano la portata; esse sono dotate di organi di chiusura e regolazione.

Le opere di derivazione permettono di convogliare l'acqua verso la condotta forzata lungo una debole pendenza. Esse possono essere costituite da un canale a pelo libero o da una galleria in pressione: nel primo caso al termine si troverà una vasca di carico, nel secondo caso un pozzo piezometrico, aventi la funzione di serbatoio per le brusche variazioni di portata.

Le condotte forzate permettono di trasferire l'acqua verso la turbina posta all'interno della centrale elettrica.

Le centrali elettriche sono costituite da tutti quei macchinari che permettono la produzione di energia elettrica da immettere nella rete.

Le opere di restituzione permettono di convogliare le acque dall'uscita della turbina all'alveo del fiume oppure alle opere di presa del salto successivo.

# 2.3.3 Droni e robot negli impianti idroelettrici

Le attività di O&M condotte in sistemi idroelettrici sono molteplici e riguardano tutti gli elementi costitutivi l'impianto, dalle condotte forzate alle dighe, dai sistemi di sbarramento ai canali, dalle turbine ai fondali. In questo paragrafo verranno analizzate le attività di ispezione e monitoraggio che stanno subendo la trasformazione da processi manuali a processi automatizzati attraverso l'utilizzo di robot.

La prima attività di fondamentale importanza che verrà analizzata è l'ispezione e il monitoraggio subacqueo delle strutture costituenti l'impianto idroelettrico. Tali ispezioni hanno il compito di individuare eventuali danni strutturali, come cricche o cedimenti, che se individuati e riparati in tempo possono prevenire danni di grossa entità che possono portare a fuori servizio particolarmente critici.

I metodi tradizionali prevedono l'attività da parte di operatori subacquei che attraverso ispezioni visive si accertano dello stato di salute delle opere civili costituenti l'impianto. Come è facile intuire, però, tali attività risultano particolarmente pericolose a causa delle alte profondità da raggiungere e delle condizioni ambientali proibitive. Al fine di aumentare la sicurezza e l'efficienza delle ispezioni, si stanno sempre più diffondendo alternative automatizzate che prevedono l'utilizzo di robot subacquei, denominati ROV (Remoted Operated Vehicles), in sostituzione degli operatori umani. Si tratta di veicoli sottomarini comandati a distanza da operatori qualificati, dotati di svariati e opportuni sensori: essi hanno lo scopo di monitorare l'integrità delle dighe e di tutte le strutture poste sotto il livello dei bacini e di registrare parametri ambientali come temperatura, quantità di ossigeno disciolta nell'acqua, pH e conduttività, con costi operativi minimi, alta affidabilità e scarsa dipendenza dalla manodopera umana. Dal punto di vista costruttivo essi sono essenzialmente costituiti da tre sezioni: una zona dove sono installati tutti i sensori e l'elettronica necessari per l'acquisizione dei dati e il controllo del mezzo; una zona in cui si trovano tutti i sistemi necessari per l'immersione e l'emersione del robot; un sistema di propulsione responsabile della traslazione e rotazione durante l'esercizio. Un esempio commercialmente diffuso e utilizzato per le ispezioni di impianti idroelettrici è il modello *BlueROV2* della BlueRobotics riportato nella figura seguente.



Figura 2-43 - Modello BlueROV2

I sensori presenti in tali veicoli sono di due tipi: sensori il cui scopo è garantire la stabilità del mezzo e una corretta navigazione e sensori utilizzati per la cattura dei dati necessari per l'ispezione e dei parametri relativi alle condizioni ambientali in cui operano.

La corretta e stabile navigazione è uno degli aspetti più importanti per quanto riguarda questo tipo di sistemi e a tal proposito risulta fondamentale riuscire a determinare, in ogni istante, l'esatto punto in cui il veicolo si trova. A tal proposito vengono installati un accelerometro e una bussola digitale: il primo è un sensore di tipo inerziale il cui scopo è determinare l'accelerazione del mezzo e utilizzare tale dato al fine di determinare l'inclinazione di navigazione; la bussola digitale viene utilizzate per definire la direzione seguita dal robot.

Per quanto riguarda i sensori presenti, come già accennato, vengono utilizzati per rilevare le condizioni dell'ambiente in cui è operata la navigazione: per tale motivo vengono installati misuratori di pressione, temperatura, pH ecc. In aggiunta si ha anche la presenza di fotocamere e videocamere ad alta risoluzione che vengono utilizzate per compiere l'ispezione vera e propria della struttura da monitorare. Attraverso lo studio dettagliato delle immagini e dei video registrati dal robot gli operatori specializzati e gli ingegneri possono determinare lo stato di salute dell'opera, generare report e stabilire, se necessario, le misure da adottare al fine di riportare la struttura in uno stato di salute ottimale.



Figura 2-44 - Immagine catturata da un robot ROV. Fonte: ROV Innovations

Un problema che spesso si manifesta, anche nel caso di utilizzo di robot dotati di fotocamere o videocamere ad alta risoluzione è la bassa qualità delle immagini dovuta alla scarsa visibilità causata dalla torbidezza dell'acqua. Tale circostanza riduce tempi e qualità dell'ispezione per cui, al fine di aggirare tale problema e ottenere immagini chiare della struttura ispezionata, vengono installati nei robot dei radar di tipo SONAR (Sound Navigation and Ranging) che sono in grado di 'vedere' anche attraverso acqua molto torbida; essi sono inoltre in grado di generare

una nuvola di punti che può essere utilizzata per la ricostruzione di modelli 3D della struttura sottomarina.

Quando si parla di SONAR si fa sostanzialmente riferimento a radar in grado di emettere onde acustiche che si propagano nel mezzo (in questo caso acqua) e che vengono quindi riflesse. Processando le onde di ritorno è possibile ottenere informazioni e ricostruire le immagini delle superfici investite. In questo modo si riesce ad ottenere le informazioni desiderate sulle strutture ispezionate nonostante si abbiano condizioni ambientali non favorevoli. Le immagini ottenute attraverso i SONAR però non sono delle fotografie e per tale motivo la loro interpretazione richiede l'esperienza di operatori altamente specializzati. Ulteriori informazioni che possono essere estratte grazie all'utilizzo di tali sistemi riguardano la tipologia dei materiali rilevati: la composizione della superficie incide, infatti, sulla lunghezza dell'onda acustica riflessa che genererà immagini con colori differenti al variare del materiale investito.

Attraverso la generazione di modelli 3D della struttura analizzata è possibile, infine, controllare la variazione nel tempo delle strutture monitorate e decidere se risulta necessario intervenire per ristabilire condizioni di salute ottimale della struttura.

L'immagine di seguito riportata mostra l'esempio di cricche generate dagli elevati valori di pressione esercitata dall'acqua e che avrebbero portato al collasso della struttura se non rilevate in tempo.

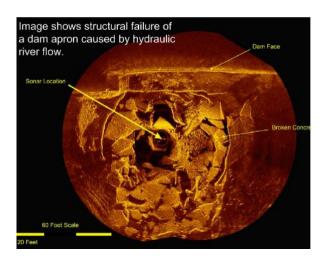


Figura 2-45 - Esempio di immagine ottenuta con radar SONAR

Oltre ai robot per le ispezioni sottomarine i droni rappresentano uno strumento che viene sempre più utilizzato nell'ambito delle ispezioni degli impianti idroelettrici grazie ai molteplici vantaggi e le funzionalità che tale tecnologia offre. Molte misurazioni operate attraverso i metodi tradizionali richiedono operazioni condotte a mano che richiedono elevati tempi e costi di esecuzione e che mettono in pericolo la vita degli operatori che le conducono. L'utilizzo dei droni permette la sostituzione dell'attività umana garantendo inoltre l'accesso a zone che potrebbero risultare normalmente inaccessibili. Nel caso di frane o canali posti in zone

normalmente di difficile raggiungimento la possibilità di utilizzare i droni per le ispezioni e il monitoraggio permette una rapida individuazione dei problemi e un intervento tempestivo. La possibilità di installare fotocamere ad alta risoluzione, videocamere e sensori di vario tipo permette, inoltre, di ottenere informazioni aggiuntive rispetto alle metodologie di ispezione tradizionali. Anche in questo tipo di applicazioni i vantaggi che si possono ottenere attraverso l'utilizzo di droni si possono riassumere in termini di:

- 1. Velocità di esecuzione. I droni permettono di ottenere immagini e dati di alta qualità in tempi molto brevi. Una volta sul sito, l'effettivo tempo di volo varia da diversi minuti a diverse ore a seconda dell'estensione della superficie da ispezionare e della completezza dei dati da volere ottenere.
- 2. Prontezza di intervento. I droni sono degli strumenti che permettono di intervenire in maniera tempestiva nel caso di situazioni di emergenza in luoghi di raggiungimento difficile o pericoloso.
- 3. Sicurezza. La nuova metodologia di ispezione permette di monitorare dighe e strutture mantenendo gli operatori in condizioni di sicurezza. I dati vengono infatti analizzati da postazioni fisse e lontani da situazioni di pericolo.
- 4. Risparmi economici.

La possibilità di installare strumenti come fotocamere ad alta risoluzione, termocamere, sensori LIDAR consente di ottenere informazioni che vanno al di là di semplici fotografie. Grazie all'utilizzo di software per la fotogrammetria è possibile sovrapporre le fotografie scattate al fine di genere nuvole di punti che permettono di ricostruire modelli 3D del territorio, dei canali e delle strutture costituenti l'impianto idroelettrico così da avere dei modelli digitali su cui operare studi più approfonditi sullo stato di salute delle opere.

Le ispezioni operate con i droni permettono così di operare indagini volumetriche, mappature topografiche, valutazioni sullo stato di salute delle strutture, rilevazione di frane, smottamenti o accumulo di detriti, monitoraggio della vegetazione ecc.





Figura 2-46 - Ispezione diga con drone e ricostruzione digitale. Fonte: Italdrone

Al fine di rendere pienamente efficace l'utilizzo della nuova tecnologia risulta importante servirsi di piattaforme digitali in grado di operare un dettagliato post-processamento dei dati

rilevati col drone e di restituire una visualizzazione capace di fornire tutte le informazioni necessarie per un ampio e dettagliato monitoraggio delle opere idroelettriche. Tali piattaforme garantiscono visualizzazioni in cui sono presenti le ricostruzioni del territorio e delle principali opere civili, permettono di gestire dati attraverso cui è possibile monitorare i parametri idrogeologici, fare le misurazioni sulla distanza tra punti o sulla profondità di determinate sezioni, integrare dati spaziali e temporali attraverso cui è possibile stabilire l'evoluzione nelle varie ispezioni dello stato di salute di canali, strutture, bacini, ecc. In questo modo è possibile costruire un vero e proprio archivio storico dell'impianto e del territorio circostante.

#### 3 Valutazioni economiche

In questo capitolo verranno riportate le valutazioni di tipo economico relative ai vantaggi ottenuti grazie all'utilizzo di droni e robot in alcune delle attività di Operation&Maintence delle tre tecnologie di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile fino ad ora analizzate (esse verranno anche individuate con i termini Hydro, Wind e Solar in riferimento, rispettivamente, a idroelettrico, eolico e solare).

Le analisi sono state condotte seguendo punti di partenza e considerazioni differenti a seconda delle applicazioni considerate. Le due principali linee che sono state seguite hanno riguardato:

- 1. La valutazione dei benefici ottenuti in seguito al passaggio o confronto tra servizi eseguiti da operatori esterni e attività svolte internamente;
- 2. I vantaggi risultanti dalla conversione da attività tradizionale ad attività robotizzata.

Sono state eseguite stime sui costi capitali o *CapEx* (acronimo inglese abbreviativo di capital expenditure) richiesti in termini di investimento per l'acquisto di droni o robot, sui costi operativi o *OpEx* (operative expenditure) necessari per la gestione e conduzione di un prodotto o di un'attività e sui ricavi ottenuti in seguito alla trasformazione del processo.

Attraverso la valutazione dei flussi di cassa, ottenuti grazie all'applicazione del nuovo processo, e alla loro attualizzazione è stato quindi possibile valutare i potenziali ricavi ottenibili dall'utilizzo delle nuove tecnologie al fine di valutare se, in termini di tasso di rendimento e di tempo di rientro, l'investimento risultasse accettabile.

Si è quindi eseguita una valutazione sulla percentuale di risparmio annuale sui costi operativi derivante dall'utilizzo di droni e robot nelle principali attività di ispezione.

E' stata infine eseguita una proiezione sui potenziali risparmi ottenibili grazie all'utilizzo dei nuovi mezzi sui diversi impianti di produzione da fonte rinnovabile.

# 3.1 Metodologia

Come punto di partenza si è stabilito se l'adozione di droni o robot risultasse conveniente da un punto di vista economico. A tale scopo è stata utilizzata la metodologia del *Valore attuale netto* (VAN) o *Net present value* nella traduzione anglosassone (NPV): essa consiste nell'attualizzazione dei flussi di cassa successivi alla realizzazione di un investimento considerando opportuni tassi di interesse.

Con il termine di flusso di cassa si fa riferimento alla differenza tra tutte le entrate e le uscite monetarie in un determinato periodo di analisi e che, per la valutazione della fattibilità economica di un determinato progetto, vengono valutati a partire dall'istante t in cui viene eseguito l'investimento.

Dal punto di vista analitico, quindi, il calcolo del VAN viene eseguito mediante la formula:

$$VAN = -C_0 + \frac{C_1}{(1+r)} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \frac{C_3}{(1+r)^3} + \dots = \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}$$
 26)

Dove:

t = intervallo di tempo considerato;

r = tasso di interesse;

 $C_t$ = flusso di cassa (positivo o negativo) a tempo t;

Secondo tale metodologia, l'investimento risulta conveniente se si ottiene VAN>0, altrimenti esso viene rigettato.

In generale, il tasso di interesse *r* coincide con *Costo medio ponderato del capitale* o *Weighted average cost of capital* (WACC) che rappresenta il costo medio del capitale che l'impresa paga a tutti i suoi investitori, azionisti e creditori e ottenuto da:

$$WACC = \left(\frac{E}{K}\right) \cdot y + \left(\frac{D}{K}\right) \cdot b(1 - t_c)$$

$$K = D + E$$
27)

In cui:

y = tasso di rendimento richiesto o atteso del capitale proprio (costo del capitale proprio) [%]

b = tasso di rendimento richiesto o atteso del capitale di debito (costo del capitale di debito) [%]

 $t_c$  = aliquota fiscale [%]

D = debiti complessivi [valuta]

E = valore di mercato complessivo del capitale proprio [valuta]

K = capitale complessivo investito nell'azienda (fisso e circolante netto) [valuta]

Oltre all'analisi del VAN sono state condotte anche valutazioni relative al *Tasso interno di rendimento* (TIR) o *Iternal rate of return* (IRR) e al *tempo di ritorno* o *payback period* (PBP).

Come riportato dal glossario finanziario della Borsa italiana, 'il tasso interno di rendimento rappresenta il tasso di attualizzazione che rende nullo il valore attuale di un investimento':

$$\sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+IRR)^t} = 0$$
 28)

Il tasso di rendimento interno viene quindi calcolato per valutare la convenienza o meno di un investimento: esso viene confrontato con un tasso di rendimento soglia, detto tasso di accettazione o cut-off rate. Conviene, dunque, effettuare l'investimento se il tasso di rendimento interno è maggiore del tasso di accettazione. Il cut-off rate può essere scelto secondo considerazioni inerenti allo specifico investimento e/o in base al WACC).

Il payback period rappresenta l'istante di tempo a partire dal quale si manifesta il 'ritorno dell'investimento', ossia il momento in cui si registrano flussi di cassa positivi e quindi l'investimento iniziale genera guadagni. Dal punto di vista analitico, per potere calcolare il PBP (acronimo di payback period) è necessario imporre il VAN (NPV) uguale a zero e considerare come incognita il tempo t, fissato il tasso di interesse. La risoluzione dell'equazione restituirà in tal modo l'istante esatto in cui l'esborso iniziale viene pareggiato dai guadagni ottenuti e a partire dal quale viene generato un valore aggiuntivo. Un programma di investimento viene ritenuto accettabile da un'azienda se il tempo di ritorno assume valori non troppo elevati.

Queste valutazioni sono state fatte per ricavare la fattibilità degli investimenti nel caso di conversione da *Outsourcing* ad *Insourcing* di attività svolte in ambito O&M e nel caso di passaggio da operazioni manuali a modalità robotizzate.

### 3.2 Insourcing vs outsourcing

La differenza tra insourcing e outsourcing consiste sostanzialmente nella differenza tra internalizzazione o utilizzo di competenze esterne per lo svolgimento di determinate mansioni.

Quando si decide di adottare una politica di outsourcing si demanda lo svolgimento di specifiche attività o processi a un ente esterno che fa delle competenze relative all'attività in esame il proprio *core business*. Uno dei principali motivi che possono portare all'esternalizzazione di particolari pratiche da parte di un'azienda risiede nel risparmio economico che tale scelta può generare, ottenendo inoltre vantaggi in termini di efficienza e produttività. Ovviamente ciò ha delle ricadute in termini di controllo sull'esecuzione delle attività in esame: esse vengono condotte secondo direttive e specifiche tecniche ben definite, ma le modalità di esecuzione sono stabilite in piena libertà da chi esegue il servizio.

Attraverso politiche di insourcing, invece, si assegna un determinato progetto o attività a risorse interne all'azienda che, grazie alle competenze sviluppate, sono in grado di assolvere agli obiettivi prefissati in maniera efficiente ed esaustiva. La scelta di internalizzare determinate attività genera nuove operazioni all'interno dell'organizzazione e può, talvolta, risultare più costoso perché comporta l'implementazione di nuovi processi ed investimenti per avviare nuove divisioni. Scelte di insourcing possono essere intraprese al fine di:

- Ottenere risparmi futuri grazie all'abbattimento dei costi operativi;
- Sviluppare un *know-how* interno che permetta di svolgere determinate mansioni in assenza del supporto di enti terzi con cui può risultare necessario condividere informazioni sensibili.

Nel seguente elaborato il paragone tra insourcing e outsourcing è svolto in merito alle operazioni di ispezione degli impianti di produzione da fonte rinnovabile attraverso l'utilizzo di droni.

Quando si decide di affidare tali attività a società esterne si può o realizzare un processo in cui tutte le fasi sono gestite esternamente oppure optare per una soluzione ibrida in cui parte delle attività vengono svolte internamente e parte di esse sono eseguite da soggetti terzi. Queste operazioni vanno dall'ottenimento delle autorizzazioni da parte delle autorità competenti per eseguire il volo, all'ingaggio, addestramento e gestione dei piloti (dipendenti dell'azienda assoldata); dall'esecuzione del volo alla collezione di tutti i dati necessari per un'ispezione ottimale e dettagliata; dal post-processing delle informazioni raccolte alla generazione di report contenenti i dettagli necessari per una corretta interpretazione dei dati ottenuti; dalla scelta opportuna del drone (di proprietà dell'ente esterno) alla gestione delle possibili conseguenze derivanti dal manifestarsi di incidenti.

Nel momento in cui si internalizzano le attività di ispezioni con drone risulta fondamentale avere le conoscenze necessarie per la gestione di tutte le fasi precedentemente citate e, non ultime, quelle relative alla normativa vigente nei vari paesi sulla regolamentazione dei voli eseguiti dai sistemi a pilotaggio remoto. Oltre all'acquisizione delle competenze, al fine di potere svolgere autonomamente le operazioni per mezzo dei droni, risulta necessario operare gli investimenti per:

- L'acquisto degli hardware, dei componenti secondari quali batterie aggiuntive o cavi e di tutti i dispositivi necessari per l'acquisizione delle informazioni quali fotocamere o termocamere;
- L'addestramento degli operatori al fine di far acquisire loro le competenze e le licenze necessarie per il pilotaggio di droni;
- La realizzazione di piattaforme digitali in grado di gestire tutte le informazioni raccolte sul campo, categorizzarle e restituire visuali in grado di facilitare l'individuazione di eventuali anomalie o malfunzionamenti degli impianti.

La strutturazione di una governance di processo in grado di gestire e disciplinare l'attività in tutti i suoi aspetti.

La scelta su quale tra le due strategie adottare dipende strettamente dagli obiettivi che si vogliono raggiungere, dal budget a disposizione e dal rischio che si è pronti ad assumere.

Nel momento in cui si opta per l'esternalizzazione delle operazioni si può, inevitabilmente, risparmiare su costi come l'acquisto e l'esercizio dei droni, l'addestramento dei piloti o l'intervento nel caso di eventuali incidenti. Ci si ritrova, inoltre, nella condizione di beneficiare delle elevate competenze di attori specializzati.

D'altra parte, però, l'internalizzazione delle attività, a fronte di spese capitali iniziali, permette di gestire in maniera molto più variegata, grazie al soddisfacimento di molte più esigenze, tutto il processo di ispezione degli impianti. In tal modo è possibile adattare le modalità di esecuzione in funzione delle esigenze interne e, dal punto di vista economico, l'adozione di una politica di questo tipo può portare dei vantaggi significativi grazie alla riduzione dei costi operativi.

All'interno di questo capitolo si è condotta un'analisi al fine di valutare se i risparmi ottenuti in seguito all'abbattimento dei costi operativi, realizzato grazie al passaggio da una logica di outsourcing a una politica di insourcing, giustificano l'investimento iniziale.

Le valutazioni sono state condotte grazie al supporto fornito da risorse di Enel Green Power per la definizione delle principali ipotesi di partenza. I casi studio presi in esame hanno interessato l'utilizzo di droni per le ispezioni di impianti idroelettrici e impianti eolici.

#### 3.3 Ispezioni manuali vs ispezioni robotizzate

Oltre al confronto tra soluzione esterna e soluzione interna, per casi d'uso differenti è stata condotta un'analisi sui possibili ricavi derivanti dalla trasformazione radicale dei metodi di ispezione.

Si sono così confrontate le modalità di esecuzione del controllo degli impianti nel caso di esecuzione manuale secondo pratiche tradizionali e nel caso di indagini svolte utilizzando droni o robot.

In questo caso, come più volte sottolineato, sono molteplici le ragioni che spingono verso il rinnovamento delle pratiche tradizionali. Oltre ai potenziali ricavi economici si riconoscono, infatti, vantaggi in termini di efficienza operativa, sicurezza per gli operatori, qualità e quantità dei dati raccolti, tempo di esecuzione e sostenibilità.

Le considerazioni condotte in tale capitolo hanno avuto però lo scopo di soffermarsi principalmente sui risparmi di natura economica ottenuti dalla trasformazione delle pratiche standard. Da questo punto di vista, i vantaggi che si possono ottenere derivano dalla possibilità di ridurre drasticamente i costi operativi per il controllo degli impianti: ciò è possibile innanzitutto grazie all'abolizione di attività ad alto rischio richiedenti elevati costi di esecuzione. A ciò va aggiunta la drastica riduzione del tempo necessario per l'ispezione che genera, anch'essa, una diminuzione delle spese da affrontare, così come ore su attività a valore aggiunto per gli operatori. Infine, l'aumento dell'efficienza operativa delle attività condotte porta a una maggiore capacità e velocità di rilevazione di guasti o malfunzionamenti dell'impianto. Ciò permette di ottenere interventi più tempestivi, una riduzione dei tempi di fuori servizio e delle perdite di energia che si traducono in diminuzione delle perdite economiche.

Anche in questo caso l'analisi è stata condotta al fine di dimostrare se la riduzione dei costi operativi e i ricavi ottenibili dall'introduzione delle nuove tecnologie giustificano l'investimento iniziale per:

- L'acquisto degli hardware, dei componenti secondari e delle camere o sensori necessari per una corretta acquisizione dati;
- Addestramento degli operatori all'utilizzo delle nuove tecnologie ed eventuali licenze;

- Realizzazione di software opportuni per la gestione delle informazioni ricavate e dei mezzi utilizzati per il monitoraggio;
- Strutturazione di una governance di processo.

I casi d'uso presi in considerazione hanno riguardato l'introduzione di robot per le ispezioni subacquee, droni per le ispezioni di campi fotovoltaici e robot per le ispezioni delle pale eoliche. Sono stati effettuate anche delle valutazioni soltanto di tipo preliminare riguardanti i vantaggi ottenibili dall'utilizzo di sistemi automatici per la pulizia dei moduli solari.

I risultati ottenuti vengono di seguito riportati distinguendo tra le diverse tecnologie di produzione di energia elettrica considerate.

# 3.4 Hydro

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti in seguito all'introduzione di droni e di robot per le ispezioni negli impianti idroelettrici.

#### 3.4.1 **Droni**

Le applicazioni prese in esame in tale paragrafo riguardano l'utilizzo di droni per le ispezioni degli impianti e dell'ambiente circostante e l'uso di robot subacquei in grado di sostituire i sommozzatori per il controllo delle strutture poste sui fondali dei bacini idrici.

Per quanto riguarda i droni, come già anticipato, il confronto è stato eseguito tra attività svolta da soggetti terzi e internalizzazione di tutte le fasi. Lo scopo è stato quello di utilizzare la metodologia del VAN e la valutazione di IRR e PBP con lo scopo di identificare la convenienza o meno nella scelta di eseguire attraverso risorse interne le operazioni di monitoraggio degli impianti attraverso i droni. La valutazione è stata condotta prendendo in esame l'acquisto, l'attività e i risparmi generati da un singolo drone.

Al fine di potere compiere questo genere di valutazioni è necessario individuare:

- I costi da dovere sostenere per potere mettere in piedi la struttura necessaria per la realizzazione dell'intero processo. Questi sono costi che vengono sostenuti unicamente nel momento in cui si decide di internalizzare l'attività (CapEX) e rappresentano l'investimento da realizzare;
- I costi operativi da sostenere al fine di garantire l'effettivo esercizio dell'attività;
- I risparmi derivanti in seguito alla trasformazione del processo.

Per quanto riguarda le applicazioni nell'idroelettrico la struttura da realizzare internamente e di conseguenza l'investimento da sostenere prevedono innanzitutto l'acquisto del drone con le caratteristiche tecniche in grado di soddisfare le operazioni da compiere, i componenti aggiuntivi e i *payload* (componenti quali fotocamere o termocamere) che garantiscono una

raccolta di informazioni ottimale. Il drone considerato è un modello *DJI Matrice 600 Pro*, mentre la camera presa in considerazione è una fotocamera ad alta risoluzione *Zenmuse Z30*. Quest'ultima è utilizzata per la cattura delle immagini necessarie al fine di operare le ricostruzioni dell'ambiente circostante e delle strutture costituenti l'impianto.



Figura 3-1 - Da sx a dx: DJI Matrice 600 Pro e Zenmuse Z30

A questo punto bisogna prendere in considerazione l'addestramento del pilota e l'ottenimento di tutte le licenze necessarie per le autorizzazioni al volo (è stata considerata come ipotesi di calcolo che al drone acquistato è associato un singolo pilota). I valori associati a tale voce sono stati ricavati da indagini eseguite sui costi medi di addestramento di piloti di droni.

Una voce fondamentale riguarda la creazione delle piattaforme necessarie per l'interpretazione ottimale dei dati. Per l'esecuzione di attività di monitoraggio dei sistemi idroelettrici vengono utilizzati sistemi informativi geografici (GIS) per la creazione e l'uso di mappe, la compilazione di dati geografici e la loro gestione e condivisione. A tal proposito, al fine di internalizzare l'utilizzo dei droni risulta fondamentale riuscire ad integrare i dati ottenuti da questi nuovi strumenti con i sistemi già esistenti. Bisogna allora generare delle Web App in grado di accogliere le informazioni fornite dai droni e utilizzare applicativi che permettano di visualizzare le immagini catturate ed effettuare analisi all'interno delle piattaforme GIS: così facendo è possibile trasformare i dati grezzi dei droni in immagini 2D, 3D o ortomosaici con cui eseguire le attività di controllo, monitoraggio e analisi.

Dalla descrizione appena fatta si intuisce come tra i costi di investimento rientri anche la spesa per la generazione di una piattaforma in grado di operare una gestione ottimale dei dati. Nell'analisi condotta si è valutato l'impatto generato da un singolo drone e per tale motivo il costo della piattaforma è stato associato a un singolo hardware. In realtà bisogna sottolineare che i costi associati alla piattaforma precedentemente descritta prevedono già una possibile futura scalabilità della tecnologia dei droni, risultando questa una soluzione in cui è possibile integrare le informazioni ottenute da più mezzi.

Di seguito vengono riassunti tutti i costi di investimento considerati durante l'analisi:

Cost voice	Value	Unit
Drone [Matrice 600 Pro]	5699	€
Extra battery	299	€
Battery Charger	75	€
Cavo	7	€
Camera [Zenmuse Z30]	9880	€
Delivery cost	1000	€
Platform	40000	€
Pilot trainig	3390	€
Tot. CapEX	60350	€

Tabella 3-1 - Riassunto CapEX droni Hydro

A questo punto bisogna definire i costi operativi: essi riguardano i costi di manutenzione del drone, i costi per l'applicativo che permette il processamento delle immagini catturate e il costo dell'operatore che pilota il mezzo. I primi due sono costi annuali mentre l'ultimo è generalmente un costo orario che può essere esteso all'intero anno note le ore di volo annuali compiute dal drone; l'ipotesi di partenza su quest'ultimo dato è stata approssimativamente di 200 ore all'anno di volo.

Cost voice	Value	Unit
Yearly hours	200	h
Operator cost	50	€/h
Maintenance cost	1000	€/year
Software	1500	€/year
Tot. Opex	12500	€/year

Tabella 3-2 - Riassunto OpEX droni Hydro

La valutazione dei risparmi è stata quindi condotta valutando la differenza dei costi necessari per svolgere lo stesso tipo di attività nel caso di servizi operati da società esterne e nel caso di servizi condotti internamente. I costi associati al caso di outsourcing sono stati valutati eseguendo un'indagine di mercato e ricavando un valor medio associato al *full service*, comprendente il volo del drone, la raccolta e il processamento dei dati e la generazione di report sulle informazioni rilevate. Dai dati ricavati su società che si occupano di ispezioni in infrastrutture e mappatura attraverso droni come *Kespry, Dronotec* e *Recon Aerial* si è ricavato un costo medio orario pari a 325 €/h. Moltiplicando tale valore per il numero di ore di volo annue del drone, considerato invariato nel caso di outsourcing o insourcing, è stato possibile ricavare il costo annuo nel caso in cui le ispezioni vengano condotte esternamente. Il confronto con i costi operativi precedentemente ricavati ha così permesso di valutare i risparmi annui derivanti dal cambio di paradigma.

Valutando infine i flussi di cassa annuali generati e la loro attualizzazione tenendo conto di un costo medio ponderato del capitale pari al 5,5% (valore ricavato dai risultati riportati da un'indagine operata dalla società Deloitte relativa ai parametri di investimento delle società che operano nell'industria della produzione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili) è stato possibile applicare la metodologia del VAN per identificare la bontà dell'investimento.

L'orizzonte temporale considerato è stato di 5 anni, dato l'elevato livello tecnologico dell'investimento compiuto, come suggerito dalle linee guide fornite all'interno dello studio *Maximizing the Return on Digital Investments* condotto dal World Economic Forum. I risultati ottenuti sono di seguito riportati:

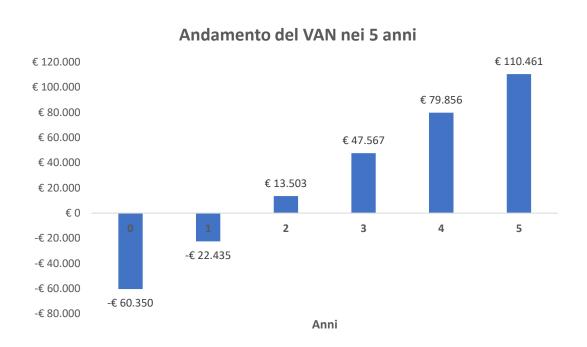


Figura 3-2 - Andamento VAN droni Hydro

Come si può notare al quinto anno il VAN risulta positivo e l'utilizzo delle nuove tecnologie ha generato un valore pari a €110.461. L'investimento risulta in tal modo giustificato, ottenendo inoltre un tempo di rientro pari a 2 anni, un IRR pari al 60% e risparmi annui sull'attività di ispezione attesti all'81%.

A questo punto è stato condotto uno studio volto a ricavare il numero di ore annue minime di volo del drone affinché il tempo di ritorno dell'investimento non superi i 5 anni. In particolare, è stata eseguita una parametrizzazione delle ore volate in un anno al fine di ottenere un VAN nullo al termine del lasso temporale considerato e un payback period esattamente pari a 5 anni. Praticamente si è quindi variato per tentativi il numero di ore volate così da ottenere flussi di cassa tali da annullare l'equazione 26 in cui è stato imposto un numero di anni pari a 5. In tale modo si è ottenuto che il numero minimo di ore di volo annue del drone affinché nei 5 anni rientri l'investimento è pari a 87.

Di seguito viene anche riportato l'andamento del IRR all'aumentare del numero di ore volate.

#### IRR vs ore di volo

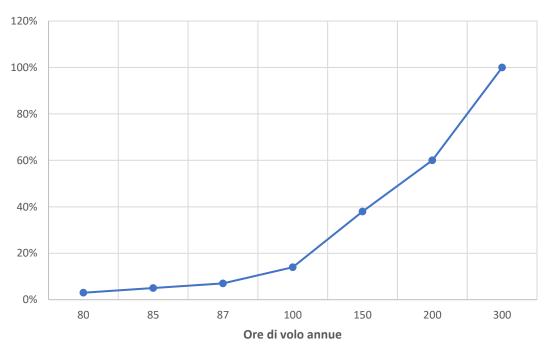


Figura 3-3 - Studio parametrico su IRR droni Hydro

Come ci si poteva aspettare all'aumentare delle ore di volo annue aumenta anche il tasso interno di rendimento dell'investimento, dato che vi saranno maggiori risparmi in termini di costi operativi.

Risultati ancora più vantaggiosi potrebbero essere ottenuti se al posto di considerare un singolo drone si tenesse in considerazione la possibilità di generare una vera e propria flotta, potendo così spalmare il costo della piattaforma, che rimarrebbe in ogni caso sempre la stessa, sui diversi droni acquistati.

# 3.4.2 Robot subacquei

In questo caso la valutazione è stata condotta operando il confronto tra attività condotte secondo metodologie tradizionali e ispezioni eseguite per mezzo di robot.

In tale applicazione si sta considerando il monitoraggio delle opere civili quali dighe o condotte immerse. Secondo le pratiche standard questo genere di operazioni viene condotto per mezzo di servizi forniti da squadre di sommozzatori i quali, scendendo alle profondità in cui si trovano le strutture, gestiscono la raccolta di tutte le informazioni. Attraverso l'analisi dei dati ottenuti è quindi possibile stabilire lo stato di salute delle infrastrutture controllate.

Nel momento in cui si decide di adottare robot in grado di eseguire operazioni subacquee ci si svincola dalla necessità di mandare sommozzatori in profondità con notevoli guadagni in termini di sicurezza ma anche in termini di costi, dovuti alle attività ad alto rischio precedentemente condotte, e in termini di velocità di esecuzione.

Definite le differenze tra le due metodologie risulta dunque chiaro come i risparmi economici ottenuti in seguito all'introduzione delle nuove tecnologie derivino dalla netta riduzione dei costi operativi per l'esecuzione delle ispezioni e dall'abbattimento dei tempi richiesti per portarle a termine.

L'analisi compiuta ha avuto lo scopo di dimostrare se tali vantaggi riescano a giustificare gli investimenti iniziali richiesti per: l'acquisto del robot (la scelta è ricaduta sul modello blueROV2 della BlueRobotics dotato di tutti i sensori e componenti necessari per eseguire in maniera efficiente l'ispezione); l'addestramento degli operatori all'utilizzo del mezzo; l'acquisto dei software integrati in grado di fornire una gestione ottimale delle informazioni raccolte e del robot utilizzato. Tali costi sono di seguito riportati:

Cost voice	Value	Unit
BlueROV	6000	€
Training	3900	€
Software	1200	€
Tot. Capex	11100	€

Tabella 3-3 - Riassunto CapEX BlueROV

In merito ai costi operativi è stato considerato solo il costo associato alla retribuzione di un singolo operatore avente lo scopo di pilotare il robot e raccogliere le informazioni necessarie. Non sono stati considerati in tale analisi preliminare i costi di manutenzione a causa dell'incertezza sui dati rilevati. Per quanto riguarda il numero di ispezioni annue si è supposto un valore pari a 15 attività annue (ricavato da valutazioni condotte sul numero di monitoraggi annui mediamente condotti) con due ipotesi differenti sui tempi di esecuzione:

- 1. Tempo invariato rispetto al caso di attività operate da squadre di sommozzatori e pari a 3 ore.
- 2. Riduzione del 50% del tempo richiesto per l'ispezione e pari a 1,5 ore.

Case 1		
Cost voice	Value	Unit
Yearly n° of inspections	15	-
Hours per inspection	3	h
Yearly hours	45	h/year
Hourly operator cost	50	€/h
Yearly inspection cost	2250	€/year
Tot. Opex	2250	€/year

Tabella 3-4 - Riassunto OpEX caso 1

Case 2		
Cost voice	Value	Unit
Yearly n° of inspections	15	-
Hours per inspection	1,5	h
Yearly hours	22,5	h/year
Hourly operator cost	50	€/h
Yearly inspection cost	1125	€/year
Tot. Opex	1125	€/year

Tabella 3-5 - Riassunto OpEX caso 2

Al fine di valutare i risparmi in questo caso viene operato un confronto tra i costi operativi prima e dopo l'introduzione del robot. Per quanto riguarda la situazione anteriore alla trasformazione del processo è stato considerato un costo orario per l'attività dei sommozzatori pari a 335€/h, considerando come valore indicativo il prezziario fornito dalla camera di commercio per la regione Lazio.

Le valutazioni e ipotesi fatte nel caso precedente per la valutazione del VAN rimangono invariate, ottenendo così per i due casi:

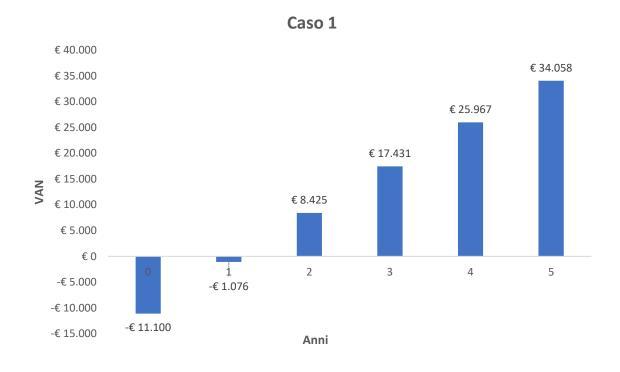


Figura 3-4 - Andamento VAN caso 1

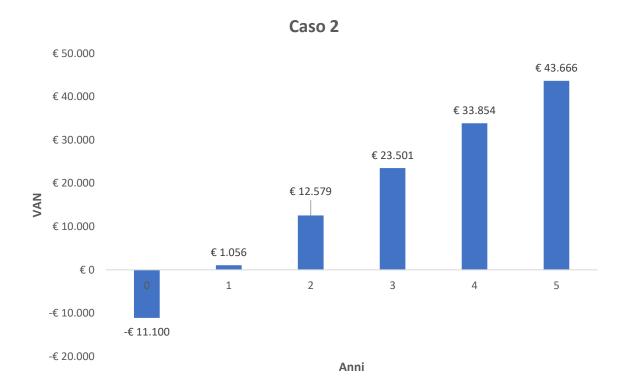


Figura 3-5 - Andamento VAN caso 2

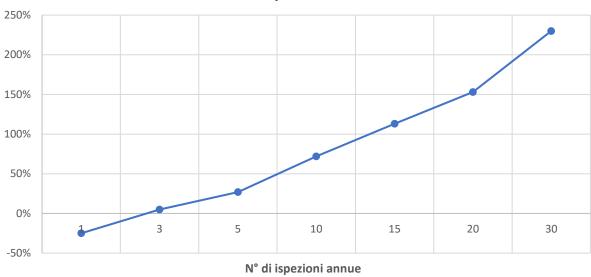
Come è possibile notare dai grafici appena riportati nel caso di riduzione del tempo richiesto per completare le operazioni di ispezione il valore generato dall'investimento risulta quasi raddoppiato. Dalle operazioni condotte sul campo si è dimostrato come effettivamente grazie all'utilizzo del BlueRov si riscontra un significativo abbassamento del tempo impiegato, motivo per cui l'ipotesi di una riduzione del 50% risulta essere realistica.

Considerando allora il caso 2 si ottiene che nei 5 anni successivi all'investimento il valore generato risulta essere pari a €43.666 con un PBP pari a 1 anno, un IRR del 113% e un risparmio annuo sui costi pari all'93%.

Anche in questo caso è stato eseguito uno studio parametrico secondo la stessa metodologia descritta nel caso dell'utilizzo di droni per le ispezioni in impianti idroelettrici. In tal modo si è dimostrato che il numero di ispezioni minime da condurre ogni anno affinché l'investimento rientri entro i 5 anni è pari a 3.

Di seguito viene nuovamente riportato l'andamento del tasso interno di rendimento della soluzione proposta al variare del numero di ispezioni annue. Ancora una volta l'andamento descritto dal grafico dimostra come incrementando l'intensità con cui la tecnologia viene sfruttata aumenti l'efficacia dell'investimento realizzato.

# IRR vs ispezioni all'anno



 $Figura~\it 3-6-Parametrizzazione~blue ROV$ 

### **3.5** Wind

Anche per quanto riguarda la tecnologia eolica sono state fatte valutazioni sia per quanto riguarda l'introduzione dei droni che di soluzione robotiche.

#### 3.5.1 **Droni**

Anche nel caso di introduzione di droni per l'ispezione delle pale degli aerogeneratori si è operato il confronto tra outsourcing ed insourcing.

La struttura da creare al fine di potere condurre le attività di ispezione attraverso l'utilizzo dei droni è molto simile a quanto descritto nel caso delle applicazioni sull'Hydro. Le leggere differenze riguardano la strutturazione delle piattaforme in grado di gestire i dati raccolti: in tale casistica non verrà considerato il costo annuo dell'applicativo utilizzato nel caso dell'Hydro per l'integrazione dei dati nei sistemi GIS. Nonostante ciò l'ipotesi condotta sul costo necessario per la definizione della piattaforma di gestione del processo è stata invariata rispetto al caso precedente (€ 40.000), ancora una volta associata al singolo hardware.

Per quanto riguarda la scelta del drone si è ipotizzato nuovamente l'uso del DJI Matrice 600 Pro con installazione della fotocamera Zenmuse Z30 e conseguenti costi per i componenti aggiuntivi, la spedizione e la manutenzione invariati.

Anche il costo per l'addestramento dell'operatore è stato considerato invariato così come il costo orario per l'attività di pilotaggio del drone in seguito all'internalizzazione.

La spesa dovuta alla realizzazione dell'intero servizio da parte di una società esterna è stata, invece, considerata più alta del 15% rispetto al caso delle attività su impianti idroelettrici a causa della minore competitività sul mercato dei droni nel settore eolico. Esso risulta così essere pari a 373,75 €/h.

Le ore di attività annue come ipotesi di partenza sono state nuovamente considerate pari a 200.

Cost voice	Value	Unit
Drone [Matrice 600 Pro]	5699	€
Extra battery	299	€
Battery Charger	75	€
Cavo	7	€
Camera [Zenmuse Z30]	9880	€
Delivery cost	1000	€
Platform	40000	€
Pilot trainig	3390	€
Tot. CapEX	60350	€

Tabella 3-6 - Riassunto CapEX wind

Cost voice	Value	Unit
Yearly hours	200	h
Operator cost	50	€/h
Maintenance cost	1000	€/year
Tot. Opex	11000	€/year

Tabella 3-7 - Riassunto OpEX Wind

Mantenendo invariate le ipotesi per il calcolo del VAN, vengono di seguito riassunti i risultati ottenuti.

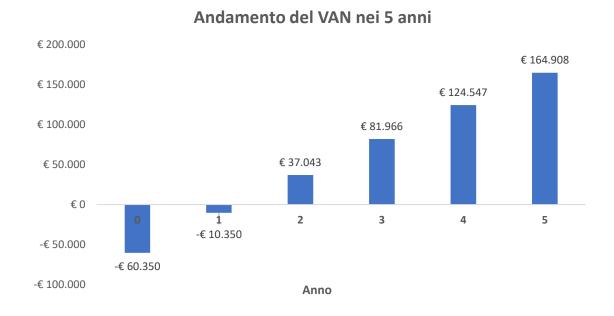


Figura 3-7 - Andamento VAN wind

Con le ipotesi valutate si ottiene un valore generato di €164.908 con un PBP pari a 2 anni, un IRR del 83% e i risparmi annui sui costi d'ispezione che si attestano all'85%.

Anche in questo caso è stato condotto lo studio parametrico attraverso cui si è stabilito il numero di ore annue di volo minimo richiesto ed esso è risultato pari a 60 che, ipotizzando che l'attività di ispezione delle pale degli aerogeneratori attraverso droni richieda 0,5 ore per turbina, si traduce in 120 aerogeneratori annui.

Di seguito viene nuovamente riportato il trend del IRR confrontato con il numero di ore di volo annue.

### IRR vs ore annue

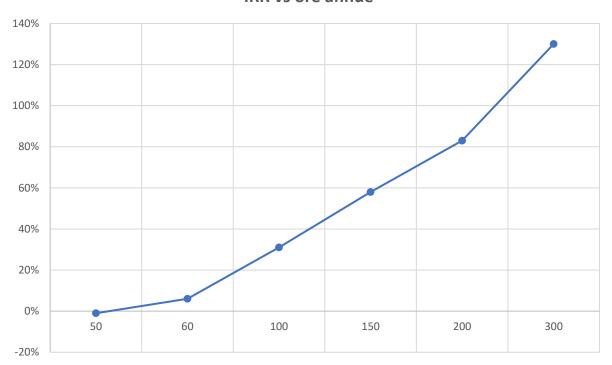


Figura 3-8 - Parametrizzazione wind

### 3.5.2 Robot scalatore per aerogeneratori

In questo caso si tratta di robot in grado di aderire alla torre degli aerogeneratori al fine di, muniti di sensori e fotocamere, operare le ispezioni delle pale eoliche.

Le valutazioni fatte su questa soluzione riguardano il confronto tra attività tradizionale e ispezione robotizzata. Viene, in particolare, assunto il confronto tra ispezioni su corda, dall'elevato costo a causa dell'alto rischio associato e caratterizzate da elevati tempi per la conclusione dell'attività, e operazioni per mezzo dei robot precedentemente descritti.

Per quanto concerne tale soluzione è possibile dimostrare un risparmio economico annuo del 67% principalmente imputabile a riduzione di tempo (da 3 ore a 2 ore) e a costi del personale associati.

Per quanto riguarda tale applicazione non è stato condotto uno studio più approfondito a causa del fatto che la stessa attività realizzata per mezzo dei droni, ad oggi, garantisce maggiori savings, una più elevata efficienza di ispezione e più spiccate riduzioni dei tempi.



Figura 3-9 - Robot scalatore

### 3.6 Solar

Le valutazioni riguardanti la tecnologia solare hanno interessato l'applicazione di droni e sistemi di pulizia automatici dei moduli fotovoltaici.

In merito ai droni, in questo caso, è stato considerato il paragone tra metodologia di ispezione manuale e attività robotizzate, riprendendo i risultati di uno studio condotto all'interno di Enel Green Power.

Per i robot atti alla pulizia dei moduli, invece, sono riportate unicamente delle valutazioni preliminari sui vantaggi ottenibili da tali sistemi a causa dell'attuale incertezza sui risultati ottenibili, trattandosi di una tecnologia tutt'ora in fase di sperimentazione.

### 3.6.1 **Droni**

Come descritto nei capitoli precedenti, l'utilizzo dei droni per le ispezioni degli impianti fotovoltaici interessa principalmente l'esecuzione di termografie aeree in sostituzione delle attività manuali.

A tal proposito, vengono riportati i risultati ottenuti da un precedente studio condotto in Enel Green Power in collaborazione con il Politecnico di Torino. La metodologia seguita è illustrata nell'elaborato *Drones in photovoltaic fields maintenance* condotto dalla collega Silvia Nitti sotto la supervisione del Prof. Filippo Spertino.

L'analisi sopra citata riporta le valutazioni condotte sull'utilizzo di sistemi aerei a pilotaggio remoto per le ispezioni di impianti fotovoltaici in sostituzione delle metodologie tradizionali, al fine di ricavare la taglia d'impianto a partire dalla quale risulta conveniente utilizzare i droni.

I risultati di seguito riportati, in particolare, ipotizzano una taglia media di impianto pari a 100 MW al fine di individuare il valore generato dall'introduzione della nuova tecnologia nell'arco temporale di 5 anni. Le ipotesi da cui si è partiti per condurre lo studio hanno interessato, ancora una volta, la valutazione dell'investimento necessario, i costi operativi richiesti nel caso di ispezione manuale e in quello di attività con drone e i risparmi ottenuti in seguito al cambiamento della modalità di esecuzione. In merito a quest'ultima voce, oltre all'abbattimento dei costi operativi dovuti a una sensibile riduzione del tempo richiesto per l'ispezione, sono stati presi in esame anche i risparmi generati dalle minori perdite di energia associati al notevole incremento in termini di efficienza operativa del monitoraggio degli impianti.

Come costi di investimento sono quindi stati considerati i costi relativi all'acquisto del drone (ancora una volta modello DJI Matrice 600 Pro) e dei componenti ausiliari, all'addestramento del pilota e al carico associato (questa volta si è considerata l'installazione di una termocamera al posto di una fotocamera tradizionale, dato che lo scopo principale dell'ispezione è la rilevazione di immagini termografiche dei moduli, modello *DJI Zenmuse XT2*).

I costi operativi presi in esame invece hanno riguardato la manutenzione del drone, il costo dell'operatore per il pilotaggio del drone, il costo per l'analisi delle immagini (supposto venga eseguito da società esterne) e il costo di manutenzione d'impianto.

I ricavi sono invece stati valutati confrontando:

- Una capacità di ispezione pari a 2,3 MW/day nel caso di attività manuale contro i 24 MW/day utilizzando il drone;
- Una riduzione della persistenza di eventualità anomalie da 6 a 3 mesi in seguito alla variazione della metodologia di ispezione, tradotta in una riduzione delle perdite di energia a seconda del tipo di guasto e della probabilità di manifestarsi che si traducono in risparmi economici ipotizzando una valorizzazione pari a 50€/MWh.

Le considerazioni per il calcolo del VAN sono le stesse rispetto ai casi precedenti, ottenendo per i 5 anni i seguenti risultati:

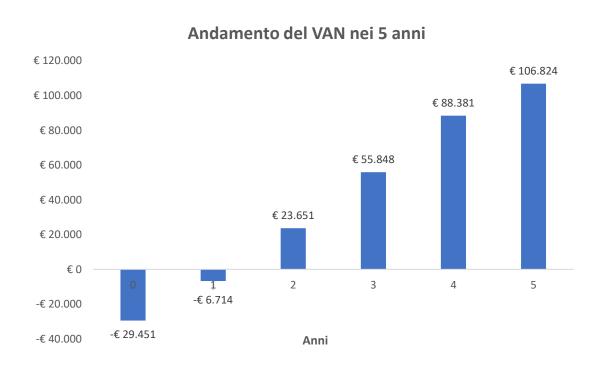


Figura 3-10 - Andamento VAN droni Solar

Il valore ottenuto nei 5 anni risulta così pari a €106.824, con un tempo di ritorno pari a 2 anni e un IRR del 94%.

### 3.6.2 Cleaning machine

E' stato già sottolineato come il fenomeno del soiling abbia un effetto rilevate sulla producibilità degli impianti fotovoltaici, motivo per cui l'incremento dell'efficienza nella pulizia delle superfici dei moduli risulta un'esigenza dalla notevole importanza. L'obiettivo dei robot per la pulizia automatica dei pannelli fotovoltaici risulta quindi quello di provare a far fronte ai drammatici effetti dell'accumulo di detriti sulla superficie dei moduli nelle zone desertiche.

L'idea è che, se confrontate con metodi tradizionali come la pulizia manuale o meccanica, tali tecnologie possano offrire importanti miglioramenti nella riduzione del soiling e ridurre l'utilizzo di risorse primarie come l'acqua (trattandosi di macchine che operano una pulizia 'a secco', di scarsa reperibilità nelle zone di interesse).



Figura 3-11 - Esempio cleaning machine

Gli studi fino ad ora condotti e le valutazioni sulle performance sul campo non hanno però ancora chiarito l'efficacia delle soluzioni adottate e l'effettiva convenienza economica derivante dall'utilizzo di queste nuove soluzioni, soprattutto a causa di una scarsa competitività del mercato.

Le conclusioni ad oggi tratte dimostrano come tali sistemi risultino ancora in una fase di prototipazione e gli sforzi condotti riguardano test sul campo al fine di definire con chiarezza l'effettiva performance delle macchine.

### 3.7 Valutazioni complessive

Aggregando i risultati ricavati dalle analisi condotte sulle varie tecnologie è possibile offrire una stima del potenziale valore ricavabile dall'introduzione di droni e robot nelle diverse attività di Operation & Maintenance sugli impianti di produzione da fonte rinnovabile.

Considerando le tecnologie e le applicazioni descritte con relativo numero di attività, si ottiene un VAN sui 5 anni pari a €480.626 a fronte di un investimento iniziale complessivo di €161.251. Di seguito viene riportato il riassunto dei valori ottenuti:

Tecnologia	Attività	Totale Savings
Droni Hydro	200 ore/anno	€ 110.461
BlueROV	15 ispezioni/anno	€ 43.666
Droni Wind	200 ore/anno	€ 164.908
Droni Solar	Ispezioni su impianto da 100 MW	€ 106.824
	тот.	€ 425.860

Tabella 3-8 - Riassunto savings

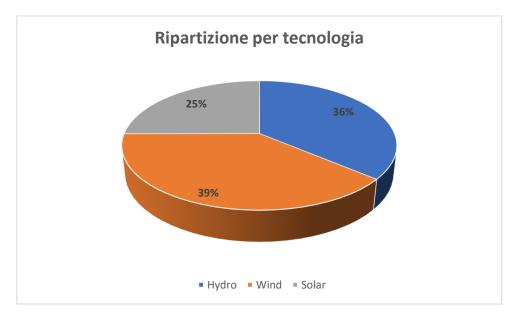


Figura 3-12 - Ripartizione per tecnologia

Dal grafico precedente è, inoltre, possibile riconoscere la ripartizione dei ricavi nelle diverse tecnologie. Esso ci mostra come la 'fetta' più grossa sia costituita dalla tecnologia eolica con una percentuale pari al 34%: ciò è dovuto, da un lato, dal fatto che i droni risultano essere la tecnologia che nelle applicazioni relative al settore O&M mostrano i vantaggi più significativi grazie all'evidente incremento di efficienza introdotto; dall'altro, inoltre, confrontando le due

ipotesi di insourcing e outsourcing, nel settore eolico si hanno costi maggiori nel caso di attività svolte esternamente a causa di una minore competitività del mercato rispetto al caso solare o idroelettrico.

Ad ogni modo, i valori ottenuti dimostrano come il processo di robotizzazione induca, in generale, forte vantaggi dal punto di vista economico nell'ambito delle operazioni di Operation & Maintenance degli impianti di produzione da fonte rinnovabile.

A partire da tali risultati si può, quindi, giustificare una politica volta a dare un notevole impulso alla trasformazione dei metodi di ispezione e monitoraggio degli impianti in senso automatizzato, certi che una politica di questo tipo generi risultati straordinari sotto l'aspetto economico e non solo.

### 4 II programma RoBoost

I risultati ottenuti dall'analisi economica dimostrano i potenziali vantaggi ricavabili dall'introduzione delle nuove tecnologie, ma per consolidare tali attività e trasformare le operazioni condotte con droni e robot in pratiche standard di Operation&Maintenance è fondamentale un processo che accolga il lavoro svolto in ambito di innovazione e lo renda pronto per il mercato.

Attraverso l'analisi condotta nel seguente elaborato si è voluta dimostrare la fattibilità tecnica e soprattutto economica dell'utilizzo di droni e robot in attività come l'ispezione di pannelli fotovoltaici o di turbine eoliche e il monitoraggio di impianti idroelettrici. L'esperienza condotta ha interessato anche il monitoraggio dei risultati ottenuti dalla trasformazione dei processi svolti sul campo, sia in termini di risparmi economici che di ore di attività a valore aggiunto generate ed efficienza operativa delle ispezioni condotte sugli impianti.

Le valutazioni riportate nel prosieguo sono state sviluppate durante l'attività svolta all'interno di Enel Green Power.

Fondata nel dicembre 2008 è società del gruppo Enel, Enel Green Power è un'azienda leader nel panorama mondiale presente in 29 paesi di 5 continenti con una capacità gestita di oltre 43 GW e più di 1200 impianti.

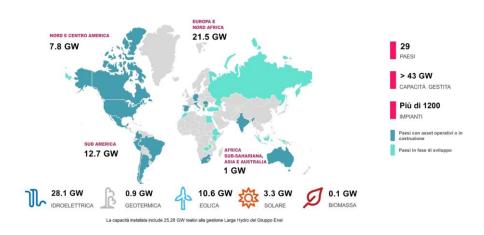


Figura 4-1 - Capacità installata EGP

Grazie alla produzione da fonti "pulite" l'azienda contribuisce in maniera significativa al processo di decarbonizzazione, giocando un ruolo fondamentale nella riduzione delle emissioni di anidride carbonica. A tal proposito, uno dei paradigmi fondamentali dell'attività di Enel Green Power consiste nel perseguire attività sostenibili dal punto di vista economico, sociale ed ambientale, ed è partendo da tale premessa che si può comprendere come in tutte le attività di innovazione svolte da EGP il punto di convergenza consiste nella realizzazione di processi sostenibili e volti a migliorare la qualità della vita.

In questo capitolo verrà mostrato l'approccio seguito nel dare un impulso alla diffusione di tecnologie autonome che prevedano l'utilizzo di robot e droni allo scopo di migliorare l'efficienza degli impianti, la sostenibilità, la sicurezza degli operatori coinvolti nelle operazioni sul campo e ridurre i costi di manutenzione e controllo.

### 4.1 Obiettivi

L'utilizzo di droni e robot ha catturato l'interesse dell'azienda grazie alle numerose opportunità che essi offrono: attraverso le nuove tecnologie si aprono nuove prospettive nell'ambito della gestione e del monitoraggio degli impianti, abilitando la possibilità di eseguire in maniera più efficace e dettagliata, ad esempio, le ispezioni degli impianti di produzione elettrica o permettendo di eseguire attività non realizzabili attraverso le metodologie tradizionali.

Grazie ai numerosi vantaggi offerti da droni e robot il principale sforzo riguarda, quindi, la loro affermazione nelle pratiche di Operation & Maintenance, consolidando una trasformazione destinata, altrimenti, a rimanere una semplice e interessante prospettiva.

In tale contesto si colloca il programma *RoBoost* (neologismo formato dalle parole "robot" e "boost", spinta) che mira a integrare e distribuire su scala mondiale la robotica nelle attività di Operation & Maintenance negli impianti di Enel Green Power

La spinta al processo di robotizzazione viene garantita grazie ad una gestione centralizzata di tutte le attività eseguite con droni e robot, attraverso cui viene realizzata una sinergia tra svariate competenze, fondamentali al fine realizzare il cambio di paradigma desiderato. Gli obiettivi principali da perseguire al fine di rendere efficace la 'rivoluzione dei robot' mirano a:

- eseguire le valutazioni preliminari con lo scopo di definire le priorità delle soluzioni da prendere in considerazione, avendo come riferimento le analisi condotte sui costibenefici e i riscontri forniti dagli operatori sul campo in seguito alle prime attività di test. Questo aspetto, in particolare, dimostra come, nonostante l'obiettivo principale sia la realizzazione di attività robotizzate attraverso differenti business model, rimane fondamentale l'esperienza degli addetti alle ispezioni e alla manutenzione degli impianti;
- prendere decisioni strategiche sul tipo di attività da perseguire e sul modello organizzativo da strutturare al fine di gestire in maniera efficace il processo di robotizzazione;
- strutturare in maniera consolidata tutti i processi da eseguire, fornendo le linee guida per l'esecuzione ottimale delle attività secondo le nuove modalità;
- definire gli step operativi e la strategia da intraprendere al fine di integrare in misura sempre maggiore la robotica nelle attività di Operation&Mainenance condotte sugli impianti di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile (adottando ad esempio meccanismi di outsourcing o insourcing a seconda delle variabili organizzative, economiche e ambientali).

Il tutto viene gestito attraverso un approccio in cui tra le principali attività eseguite si riconoscono:

- 1. Una ricerca oculata sulle principali opportunità offerte dal mercato di droni e robot, al fine di individuare le possibili soluzioni che possono essere integrate all'interno dei processi di ispezione, manutenzione ed esercizio degli impianti. Ciò si traduce in analisi tecnico-economiche di mercato, confronti tra le caratteristiche delle diverse soluzioni proposte al fine di individuare le alternative che risultino più adatte all'integrazione nei processi interni. Il tutto è reso possibile grazie una particolare attenzione alle tematiche di innovazione e alle soluzioni proposte nei più svariati campi.
- 2. L'attenzione e l'analisi approfondita dei processi attuali in ambito O&M. La capacità di individuare le prospettive offerte dalle soluzioni presenti sul mercato è possibile solamente grazie a una profonda conoscenza delle attività che vengono svolte durante la gestione, il monitoraggio e la manutenzione delle diverse tecnologie. In tal modo è così possibile riconoscere le fasi che nei vari processi possono essere migliorate grazie all'utilizzo di droni o robot.
- 3. Le valutazioni tecnico-economiche sulle soluzioni che sono state considerate le più adatte ad essere introdotte in sostituzione alle attività tradizionali. Esse hanno lo scopo di dimostrare i potenziali vantaggi ottenibili dalle nuove tecnologie. A tal fine risulta necessario definire tutti i costi associati all'introduzione delle nuove soluzioni, sia in termini di costi capitali che in termini di costi operativi, e i risparmi ricavabili in seguito al cambiamento delle modalità in cui i processi vengono eseguiti.
- 4. Il monitoraggio dei vantaggi effettivamente ottenuti e riscontrati, sia in termini di risparmi economici che di ore su attività a valore aggiunto, con lo scopo di confrontarli con le analisi preliminari condotte e di individuare le aree che richiedono una maggiore spinta al fine di integrare in maniera efficiente le nuove pratiche. In questa fase vengono anche tenuti sott'occhio i riscontri forniti dagli operatori sul campo, i quali rappresentano i principali soggetti interessati dall'introduzione delle nuove tecnologie, al fine di tenere sotto controllo non solo i numeri ma anche la percezione delle persone che si trovano ad utilizzare i nuovi strumenti.

# 4.2 Monitoraggio dei risultati ottenuti

Tutte le fasi fino ad ora descritte vengono mantenute sotto controllo attraverso la catalogazione e la gestione per mezzo di strumenti la cui funzione è il monitoraggio delle attività svolte sul campo. Vengono così riportate le descrizioni di tutti i processi svolti, le nuove tecnologie utilizzate e le assunzioni fatte per la valutazione dei vantaggi ottenuti.

Attraverso questo genere di approccio è stato possibile rilevare i principali risultati ottenuti in seguito alla spinta fornita dall'introduzione del programma RoBoost alla diffusione di droni e robot. Analizzando i dati raccolti durante l'esperienza in azienda, si è registrato che il 90% delle attività complessivamente eseguite con droni e robot è stato svolto in seguito all'avvio del progetto RoBoost registrando un incremento di più dell'800% delle operazioni sul campo. Risultati analoghi si notano in termini di risparmi e di generazione di ore su attività a valore aggiunto, con il 74% dei savings e il 76% delle ore realizzate in seguito all'introduzione della gestione centralizzata, denotando un incremento, rispettivamente, del 290% e del 320%. I risultati appena riportati sono estrapolati su un orizzonte temporale di due anni, dove il

programma RoBoost è in corso da 14 mesi e sono sempre riferiti a un panorama che comprende diversi paesi e tutte le tecnologie interessate dall'applicazione delle nuove soluzioni.

L'introduzione di droni e robot abilita, inoltre, competenze altamente specializzanti per i soggetti che svolgono sul campo le attività di ispezione e monitoraggio degli impianti. Il pilotaggio di droni o l'utilizzo di robot di svariata natura richiede, infatti, ore di addestramento per gli operatori al fine di eseguire, in maniera totalmente differente, attività consolidate negli anni e realizzate attraverso pratiche standard. L'aumento delle competenze del personale diventa così uno dei principi cardine del processo di robotizzazione intrapreso da Enel Green Power e, in particolare, dal programma RoBoost: viene quindi mantenuta sempre al centro, come precedentemente sottolineato, la figura dell'uomo e del valore aggiunto che la robotizzazione genera a favore delle persone.

La sostenibilità riveste un ruolo chiave, in particolar modo quella sociale ed ambientale: a tal proposito è stato condotto un sondaggio al fine di monitorare i riscontri dei soggetti impattati dalla robotizzazione, ossia gli operatori addetti alle attività di ispezione (come i piloti di droni): venivano richiesti pareri sull'impatto generato dall'introduzione dei nuovi strumenti. Su un campione di circa 70 risposte, i riscontri forniti hanno mostrato come per circa il 99% dei casi, l'utilizzo delle nuove tecniche ha apportato miglioramenti in termini di efficienza operativa durante le ispezioni, percentuale distribuita in maniera praticamente equa nelle voci:

- Tempo di ispezione 27%;
- Area coperta dall'ispezione 24%;
- Qualità dei dati raccolti 25%;
- Riduzione dei costi 24%.

Nella quasi totalità dei casi è stata fornita una risposta positiva sugli effetti generati in termini di miglioramento dell'ambiente lavorativo (78%), impulso alla digitalizzazione (82%), incremento delle condizioni di sicurezza durante le ispezioni (85%) e aumento della possibilità di condivisione dei dati (76%). Ad ogni modo, tra tutti gli aspetti messi sotto la lente di ingrandimento durante il sondaggio, la sicurezza è stata la voce che secondo gli addetti ai lavori ha subito un maggiore impulso grazie all'uso di droni e robot, con un incremento medio dichiarato pari al 56%.

Tutti i dati rilevati dal processo di monitoraggio portato avanti dimostrano quindi come il cambiamento introdotto dalla diffusione delle nuove pratiche contribuisca a 360 gradi al perseguimento degli obiettivi di sostenibilità all'interno di Enel Green Power: l'aumento delle competenze interne, la generazione di ore su attività a valore aggiunto, i risparmi economici, l'automazione e digitalizzazione dei processi e, non ultima, la riduzione delle emissioni di sostanze nocive grazie all'introduzione di metodi come le batimetrie robotizzate in sostituzione dell'utilizzo di imbarcazioni alimentate da idrocarburi, sono tutti aspetti che sottolineano la sostenibilità del processo di robotizzazione delle attività di Operation&Maintenance nell'ambito degli impianti di produzione da fonte rinnovabile e non solo.

### 4.3 Evoluzioni future

Le future evoluzioni previste all'interno del programma RoBoost riguardano, in primis, l'adozione e l'integrazione nei processi interni di nuove soluzioni che possano ulteriormente dare un impulso alle attività di Operation & Maintenance in termini di risparmi economici, efficienza operativa e sicurezza degli operatori.

Un esempio in tal senso è rappresentato dall'utilizzo di *smart glasses* e *realtà aumentata*, attraverso cui si immagina di abilitare un supporto continuo agli operatori addetti alla manutenzione durante le attività realizzate sul campo. Attraverso indicazioni precise e suggerimenti puntuali sulle attività da svolgere forniti da remoto, vengono facilitati i compiti da svolgere in maniera tale da incrementare notevolmente l'efficienza di esecuzione e diminuire i tempi richiesti per il completamento delle attività. Essi possono essere anche dotati di fotocamere o termocamere in maniere tale da potere anche raccogliere tutte le informazioni necessarie per la valutazione dello stato di salute di un impianto o di particolari componenti.



Figura 4-2 - Esempio di smart glasses

Insieme all'introduzione delle nuove metodologie in sostituzione delle pratiche standard di ispezione e monitoraggio degli impianti di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, si sta intraprendendo un processo di digitalizzazione dell' asset.

A tal proposito, la diffusione di intelligenza artificiale e nascita di piattaforme IoT (Internet of things) mirano a trasformare gli impianti in realtà intelligenti, connesse e in grado di gestirsi in maniera autonoma al fine di massimizzare l'efficienza e ridurre la possibilità di malfunzionamenti o fermi di produzione. L'utilizzo di piattaforme in grado di raccogliere tutte le informazioni derivanti da un'ispezione, generare un archivio storico degli impianti, permettere di controllarne l'andamento nel tempo dello stato di salute o categorizzare in maniera intuitiva tutte le informazioni possedute rientrano in quest'ottica.

I passi in avanti che si vogliono compiere in futuro riguardano la capacità di trasformare tutti i dispositivi in grado di raccogliere informazioni all'interno dei vari impianti in dispositivi intelligenti, generando piattaforme che oggi prendono il nome di *piattaforme IoT*.

Con l'acronimo IoT (dall'inglese Internet of Things) si fa riferimento alla capacità da parte di strumenti e sensori di collegare ad internet qualsiasi tipo di apparato, con lo scopo di controllare e trasferire informazioni al fine di svolgere azioni conseguenti in modo "intelligente".

La logica diventa quindi quella di trasformare tutti i dispositivi in grado di ottenere informazioni sugli impianti, come sensori o i dispositivi utilizzati per le ispezioni descritti nel seguente elaborato, in strumenti connessi ad internet, in grado di condividere e trasferire informazioni senza la necessità dell'intervento umano, riconoscere eventuali criticità, comunicare con l'impianto permettendo la regolazione automatica, in totale assenza dell'attività umana.

Lo scopo, ancora una volta, è quello di rendere tutti i sistemi più conveniente, più affidabili e più sostenibili.

#### 5 Conclusioni

Grazie alla collaborazione svolta all'interno degli uffici di Roma di Enel Green Power è stato possibile descrivere il processo di robotizzazione di alcune attività di gestione, esercizio e manutenzione degli impianti di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

Tutte le informazioni raccolte e i processi descritti mostrano come l'integrazione tra robot e tecnologie rinnovabili, più che una prospettiva futura dovuta alla convergenza di trend in rapida ascesa, sia una realtà già operativa e in fase di consolidazione.

A validazione di questa affermazione, basta pensare che i meccanismi che gestiscono la robotizzazione in Enel Green Power sono facilmente riconducibili a valutazioni tecnico-economiche, analisi costi-benefici e considerazioni su insourcing o outsourcing; tutte caratteristiche di mercati considerati maturi e adatti per implementazioni su larga scala.

Le analisi tecnico economiche condotte hanno dimostrato come uno dei principali fattori trainanti l'introduzione delle nuove tecnologie sia la generazione di valore che ne consegue. Valore che non è rappresentato unicamente dai risparmi economici ma che risiede soprattutto nel notevole aumento della sicurezza degli operatori e delle loro competenze, nell'incremento della sostenibilità dei processi svolti e della loro efficienza operativa, nella generazione di ore su attività a valore aggiunto, nel miglioramento dell'ambiente lavorativo e nella riduzione dell'impatto ambientale delle operazioni svolte.

Tutti i fattori appena citati rappresentano le premesse che portano a intraprendere scelte che mirano a rendere il processo di robotizzazione un tassello fondamentale nella politica aziendale.

In questa prospettiva risulta fondamentale la nascita di programmi come RoBoost. I dati riportati dimostrano, inoltre, come una gestione centralizzata dell'intero processo, con risultati e operazioni svolte in campo e a diversi livelli organizzativi, generi risultati significativi sia in termini di attività svolte che di risparmi generati, a conferma delle previsioni fatte tramite analisi preliminari.

La strada è ovviamente segnata ma non definitivamente tracciata. Lo sforzo futuro da sostenere riguarda infatti la ricerca continua delle svariate soluzioni che possono dare un ulteriore spinta alla trasformazione delle pratiche di Operation & Maintenance, rendendo sempre più efficienti e sostenibili le attività svolte: soluzioni che si traducono sia nell'utilizzo di nuovi robot che nell'ampliamento del campo di applicabilità delle soluzioni già adottate che, ancora, nell'integrazione di soluzioni digitali in grado di fornire un ulteriore sviluppo delle operazioni condotte. I passi da compiere possono riguardare, ad esempio, l'utilizzo dei droni nel settore degli impianti di produzione da fonte geotermica o l'approfondimento delle analisi condotte sull'efficacia dei robot per la pulizia automatica dei moduli fotovoltaici per trasformarli rapidamente in soluzioni implementate nel quotidiano.

Al fine di rendere davvero efficace la trasformazione radicale messa in atto è di fondamentale importanza il pieno coinvolgimento di tutti gli attori operanti nel settore della gestione degli impianti. Per tale motivo la principale attenzione va riposta nel fornire il giusto impulso e le giuste motivazioni a tutti coloro che si mostrano restii a un processo di cambiamento così

drastico come quello appena analizzato, nel timore che la centralità delle operazioni condotte venga affidata alle macchine.

Diversi studi, tra cui il *Digital Transformation Initiative* redatto dal World Economic Forum dimostrano come l'introduzione di robot, intelligenza artificiale, IoT ecc. non abbia alcun effetto negativo in termini di livello occupazionale. Negli ultimi anni, infatti, a un costante incremento degli investimenti e delle applicazioni delle nuove tecnologie si è affiancato un andamento globale praticamente costante del tasso di occupazione. L'effetto che anzi può essere sottolineato è che vengono svelate nuove prospettive e nuove opportunità di lavoro dovute alle competenze introdotte dalla diffusione delle nuove soluzioni.

La vera sfida che si prospetta consiste quindi nell'eliminare tutte le barriere interposte alla diffusione capillare delle soluzioni più volte citate, al fine di rivoluzionare le pratiche di Operation&Maintenance con l'obiettivo di ottenere processi più efficienti, sostenibili, sicuri e meno costosi e sfatare il mito secondo cui "le attività di O&M sono e saranno sempre le stesse". E tutto ciò perchè siamo già nell'O&M del futuro.

### **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Belcredi M, Rigamonti S., (2011), Dispense di finanzia aziendale, EDUCatt
- [2] Chan D., Mo J., (2016), *Life cycle reliability and maintenance analyses of wind turbines*, in 1<sup>st</sup> Internetional Conference on Energy and Power, RMIT University, Melbourne, Australia
- [3] De Palma P., Napolitano M., Pascazio G., *Turbine idrauliche*, Politecnico di Bari, Bari, Italy
- [4] Deloitte, (2017), Overview of business valuation parameters in the energy industry, London, United Kingdom
- [5] Du Y. et al, (2019), Damage detection techniques for wind turbine blades. A review. In Mechanical Systems and Signal Processing.
- [6] Flir, A guide to inspecting solar fields with thermal imaging drones, Technical documentation
- [7] General Electric Co., (2015), Powering the future. Leading the digital transformation of the power industry, Boston, USA
- [8] Grando M.T., Maletz E.R., Martins D., Simas H., Simoni R., (2017), *Robots for Cleaning Photovoltaic Panels: State of the Art and Future Prospects*, in IX Jornadas Argentinas de Robotica, Còrdoba, Argentina
- [9] International Standard, (2005), Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules Design qualification and type approval, IEC 61215
- [10] Kontges m. et al., (2013)., *Review on Failures of Photovoltaic Modules*, Performance and Reliability of Photovoltaic Systems, Report IEA PVPS Task 13
- [11] Leva S., Aghaei M., Grimaccia F., (2015), PV power plant inspection by UAS: Correlation between altitude and detection of defects on PV modules; IEEE 15<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy.
- [12] Maghami M.R., Hizam H., Gomes C., Radzi M.A., Rezadad M.I., Hajighorbani S., (2016), *Power loss due to soiling on solar panel: A review,* Renewable and Sustainable Energy Review; 59:1307-1316
- [13] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers, A.L., (2009), Wind energy explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons
- [14] Marti S., Andersen M., Tramis M., (2018), *Aerial Thermography Inspections in Large-Scale PV Plants*, European Solar Engineering School, Dalarna University, Sweden
- [15] Mordor Intelligence (2018), Robotics market Growth, trends and forecast
- [16] Neto E. C. et al, (2014), *Autonomous Underwater Vehicle to Inspect Hydroelectic Dams*, Article in International Journal of Computer Applications

- [17] New Renewable Energy Laboratory, (2016), Best Practises in Photovoltaic System Operation and Maintenance 2<sup>nd</sup> Edition, U.S. Department of Energy
- [18] Nillson J., Bertling L, (2006), Maintenance management of wind power systems. Cost effect analysis of condition monitoring systems. Royal institute of Technology KTH, Stocholm
- [19] Nitti S., Spertino F., (2019), Drones in photovoltaic fields maintenance, Politecnico di Torino, Torino
- [20] Precision Hawk, (2018), Solar PV Asset Lifecycle Management, Raleigh, USA
- [21] Precision Hawk, (2018), Wind Turbine Blade Lifecycle Management, Raleigh, USA
- [22] Spertino F. Dispense del corso di Power production from renewable sources, Dipartimento di Ing. Elettrica, Politecnico di Torino, Torino
- [23] Tekne srl, (2011), *Piano di manutenzione e gestione dell'impianto*, Progetto definitivo impianto eolico Comune di Stigliano
- [24] Tracy B., Vermeyen P.E., (2014), Scanning Sonar Technology Development. Dam Safety Technology Development Program, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, USA
- [25] Ulrike J., Herz M. et al., (2018), Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications, Report IEA-PVPS T13-10:2018
- [26] World Economic Forum, (2018), Digital Transformation Initiative. Maximizing the Return on Digital Investments., Cologny, Switzerland
- [27] Documentazione tecnica interna, Enel Green Power.

### **SITOGRAFIA**

https://www.robotiko.it/robot-significato/

 $\underline{https://www.powerelectronics.com/solar/solar-system-efficiency-maximum-power-point-tracking-key\#close-olyticsmodal}$ 

https://about.bnef.com/new-energy-outlook/

https://bnef.turtl.co/story/neo2019?teaser=true

https://www.idtechex.com/en/research-report/new-robotics-and-drones-2018-2038-technologies-forecasts-players/584

http://www.st-ingegneria.com/elettroluminescenza-moduli-fotovoltaici-in-campo.html

https://www.mahindrasusten.com/blog/vegetation-control-alternatives-for-solar-pv-plants/

 $\underline{https://www.enelgreenpower.com/stories/a/2018/10/solar-panel-cleaning-egp-innovative-solution}$ 

https://it.wikipedia.org/wiki/Legge di Betz

https://www.windnostics.com/

https://www.windnostics.com/services

https://www.tdworld.com/renewables/wind-turbine-blade-inspections

 $\underline{\text{http://www.aerialmediascotland.co.uk/aerial-photography-video-services/drone-wind-turbine-blade-inspection/}$ 

https://www.sandia.gov/news/publications/labnews/articles/2019/06-21/wind turbines.html

https://www.precisionhawk.com/blog/using-drone-based-aerial-intelligence-in-the-wind-turbine-lifecycle

https://www.sandia.gov/news/publications/labnews/articles/2019/06-21/wind turbines.html

http://www.fisicamente.net/SCI\_SOC/NUCLEARE\_cap2.pdf

http://www.underwaterinspections.com.au/dam-inspections.html

https://www.trihydro.com/news/news-details/2019/05/28/using-drones-for-safer-dam-inspections-and-evaluations

https://www.borsaitaliana.it/borsa/glossario/tasso-interno-di-rendimento.html

### Ringraziamenti

Al termine di ogni percorso, ripercorrendo con la mente I passi compiuti e i traguardi raggiunti, la prima cosa che si nota è quanto sia stato importante il supporto di tutti coloro che hanno permesso di superare tutti gli ostacoli. A coloro che mi hanno aiutato a raggiungere questo primo importante obiettivo voglio dedicare queste righe conclusive.

Voglio innanzitutto ringraziare il Prof. Spertino per la sua cordialità e gentilezza e per avermi accompagnato durante questo passo finale con i suoi preziosi consigli.

Un doveroso ringraziamento va a Fabio per la sua pazienza, per i suoi insegnamenti e per avermi coinvolto con entusiasmo durante la mia prima esperienza lavorativa. Grazie per la tua accoglienza e per i tuoi consigli, sono certo che ne farò tesoro in futuro.

Grazie alla mia famiglia: grazie a mamma, papà, nonna Vitù, Marcello e Carlo per essere pilastri, fonte di ispirazione e i primi e mai stanchi sostenitori in tutto ciò che faccio.

Grazie a mio cugino Riccardo: modello di riferimento e sempre con me dai banchi del S.Anna, alle bombe di fritto dalla nonna fino alle videochiamate nonostante le centinaia di km di distanza: fratello più che cugino.

Ringrazio tutti coloro che hanno condiviso con me questa esperienza a Torino. Grazie a Riccardo, per essere sopravvissuto all'esperienza di condividere lo stesso tetto, e a Claudio per avere allietato con un sorriso momenti di disperazione, ricordiamoci che Speranza è sempre appesa, qualsiasi obiettivo ci prefissiamo. Grazie a Davide, Ciccio, Diego, Carmelo, Andrea, Gabriele, Peppesun, Bruna, Marta e Candida, avete reso tutto più semplice e leggero.

Grazie a Presti, Presidente, Anda e Manuel, sempre pronti ad ospitarmi durante le mie fughe a Milano. Vi voglio bene nonostante mi abbiate sostituito e so che anche voi ricambiate.

Ringrazio Pino, Alessandra e la loro sedia: la vostra ospitalità, il vostro sostegno e le motivazioni che mi avete dato in questi ultimi mesi sono stati fondamentali per riuscire a finire tutto in tempo, oltre che a farmi prendere 5 chili.

Grazie a Mariavincenza, Alessandra, Dario e Alberto che, nonostante le centinaia di chilometri di distanza, mi sono stati vicini e mi hanno spronato a non mollare mai. Vi voglio bene.

Grazie a Maria Grazia: nell'ultimo periodo hai sopportato, forse più di tutti, i miei dubbi, le mie indecisioni e le mie paure. Grazie per la pazienza e per aver saputo come darmi la forza di non mollare.

Vi ringrazio tutti per ciò che mi avete dato e vi chiedo di continuare a starmi vicino: questo non è un arrivo ma un punto di partenza, lo spettacolo deve ancora arrivare!