



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

*Analisi affidabilistica e valutazione di investimento di un
impianto fotovoltaico con e senza l'ausilio di uno storage*

*Reliability analysis and investment evaluation of a photovoltaic
system with and without the aid of storage*

Relatore: **Chiar.mo**
Prof. Corvaro Francesco

Tesi di Laurea di:
Sammassimo Chiara

Anno accademico 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE

Contesto e obiettivo della tesi.....	5
CAPITOLO 1 - STORIA DELLA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA.....	6
CAPITOLO 2 - ENERGIA SOLARE.....	9
CAPITOLO 3 - EFFETTO FOTOVOLTAICO.....	11
3.1.Semiconduttori.....	11
3.2.Giunzione P-N.....	13
CAPITOLO 4 - CELLE FOTOVOLTAICHE.....	15
4.1.Funzionamento.....	15
4.2.Rendimento.....	25
4.3.Tipologie di celle.....	27
4.3.1.Celle fotovoltaiche in silicio monocristallino e policristallino.....	28
4.3.2.Celle fotovoltaiche a giunzione multipla.....	29
4.3.3.Celle fotovoltaiche a film sottile.....	30
4.3.4.Celle fotovoltaiche in silicio amorfo.....	31
4.3.5.Celle fotovoltaiche cis al di-seleniuro di rame ed indio.....	33
CAPITOLO 5 - MODULI FOTOVOLTAICI.....	34
5.1.Moduli standard.....	37
5.2.Curva caratteristica V-I di un modulo fotovoltaico.....	38
5.2.1.Il rendimento.....	39
CAPITOLO 6 – COMPONENTI IMPIANTO FOTOVOLTAICO.....	41
6.1.Generatore fotovoltaico.....	41
6.2.Accumulatore.....	43
6.3.Regolatore di carico.....	45
6.4.Inverter.....	46
6.4.1.Convertitore Grid Connected.....	46
6.4.1.1.Parametri elettrici del convertitore Grid Connected.....	47
6.4.2.Convertitore Stand Alone.....	48

6.4.2.2.Parametri elettrici del convertitore Stand Alone.....	48
CAPITOLO 7- ANALISI E VALUTAZIONE INVESTIMENTO DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO	50
7.1.Analisi dei costi e dei ricavi.....	50
7.2.Dimensionamento impianto senza accumulo.....	52
7.3.Dimensionamento impianto con accumulo.....	60
CONCLUSIONE.....	65
Bibliografia.....	66

OBIETTIVO

Gli obiettivi di questa tesi saranno quelli di valutare la tempistica di recupero dell'eventuale investimento, la convenienza o meno della vendita dell'energia prodotta dall'impianto e la progettazione dello stesso. Lo scopo sarà quindi:

- fornire ad una piccola media azienda italiana, in particolare la Tralfo, informazioni sugli impianti fotovoltaici e sulla progettazione degli impianti in generale;
- analizzare le procedure da seguire per la realizzazione dell'impianto in questione;
- dimensionare l'impianto per determinare la potenza massima di utilizzo e quella massima erogabile annualmente sulla base dell'area a disposizione del tetto del magazzino dell'azienda;
- analizzare i costi, i ricavi, gli ammortamenti per poter quantificare i profitti derivabili dalla vendita dell'energia prodotta;
- eseguire l'analisi e la valutazione economica dell'investimento per determinarne i tempi di recupero (PayBack)

CAPITOLO 1.

STORIA DELLA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Oggi la produzione di energia elettrica è una delle cause principali dell'inquinamento atmosferico. Produrre elettricità continuando ad utilizzare fonti fossili tradizionali, significa inquinare l'aria, l'acqua e la terra. Invece, la grande opportunità offerta dalle rinnovabili, consente di produrre energia elettrica in maniera pulita, riducendo gli impatti delle attività e contribuendo a tutelare l'ambiente. Oggi i progressi tecnologici hanno contribuito ad elevare l'affidabilità di infrastrutture e impianti, rendendo la produzione rinnovabile ed estremamente sicura. Diversi sono i punti di forza delle energie rinnovabili che possono contribuire a smuovere la coscienza collettiva nell'ottica di uno sviluppo sostenibile. La fame di energia che caratterizza la società moderna ha reso il nostro sviluppo socioeconomico estremamente dipendente dalla disponibilità di approvvigionamenti energetici, in qualsiasi forma essi si caratterizzino. I combustibili fossili hanno giocato un ruolo chiave negli ultimi decenni, divenendo un fattore fondamentale nella determinazione degli equilibri politici a livello globale. Risulta dunque evidente come, maturando un'assoluta o parziale indipendenza da queste sorgenti energetiche, il panorama socio-politico mondiale possa subire cambiamenti sostanziali. Questo aspetto, con l'aggiunta di inequivocabili benefici ambientali, ha determinato una crescente attenzione verso le fonti energetiche cosiddette rinnovabili, chiamate così in quanto capaci di rigenerarsi con almeno la stessa velocità con cui vengono consumate. Tra le fonti rinnovabili più conosciute, l'energia solare è quella che desta maggiore attenzione. Infatti, sebbene, in termini di sfruttamento, attualmente si piazza come terza

energia rinnovabile più utilizzata, dopo l'energia idroelettrica (20% del totale mondiale) e l'energia eolica (2,5 % del totale mondiale), costituendo appena lo 0,7% del totale dell'energia prodotta a livello mondiale (18 Giugno 2013) (1), i suoi tassi di crescita e le sue possibilità di sfruttamento sono da primato. Per quanto riguarda i suoi tassi di crescita, basti pensare che il tasso annuale di crescita globale della potenza massima generata da impianti solari è del 102%, gran parte del quale è dovuto al repentino incremento della produzione di energia elettrica da questa fonte. L'effetto fotovoltaico è noto fin dal 1839, dalle esperienze del fisico francese Edmond Becquerel (1820-1891), che presentò alla Accademia delle Scienze di Parigi la sua "Memoria sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari", scoperta avvenuta casualmente mentre effettuava delle esperienze su una cella elettrolitica (quindi contenente una soluzione liquida) in cui erano immersi due elettrodi di platino. Si deve aspettare il 1876 (Smith, Adams e Day) per avere una simile esperienza ripetuta con dispositivi allo stato solido, in questo caso il selenio, ma l'idea di sfruttare l'effetto fotovoltaico quale fonte energetica non ebbe modo di svilupparsi finché non si poté operare con materiali che avessero un miglior rendimento. Solo nel 1954 si giungerà ad avere la prima cella solare commerciale in silicio, ad opera di Person, Fuller e Chapin, realizzata all'interno dei laboratori Bell. L'Aeronautica e l'Esercito statunitensi seguirono molto da vicino lo sviluppo di questo progetto. Entrambi ritenevano che il fotovoltaico potesse costituire la fonte energetica ideale per un progetto top-secret: i satelliti artificiali orbitanti attorno alla Terra. Grazie a un'assidua crociata condotta da Hans Ziegler, del corpo del Genio Trasmissioni dell'esercito statunitense, la Marina Militare installò sui satelliti un sistema energetico a due sorgenti batterie chimiche e celle solari al silicio sul satellite Vanguard; mentre le batterie si esaurirono dopo una settimana circa, le celle solari funzionarono per anni. Le sperimentazioni vennero quindi

portate avanti per tale scopo e solo verso la metà degli anni settanta si iniziò a rivolgere l'attenzione verso utilizzi "terrestri".

CAPITOLO 2.

ENERGIA SOLARE

Il Sole è una stella di dimensioni medio-piccole costituita principalmente da idrogeno (circa il 74% della sua massa, il 92,1% del suo volume) ed elio (circa il 24-25% della massa, il 7,8% del volume), cui si aggiungono altri elementi più pesanti presenti in tracce. Esso ha una temperatura superficiale di 5 777, caratteristica che le conferisce un colore bianco estremamente intenso e cromaticamente freddo, che però spesso può apparire giallognolo, a causa dello scattering dell'atmosfera terrestre e in ragione dell'elevazione dell'astro sull'orizzonte; il Sole, come la maggior parte delle stelle, è nella sequenza principale, ovvero in una lunga fase di equilibrio stabile in cui l'astro fonde, nel proprio nucleo, l'idrogeno in elio. Tale processo genera ogni secondo una grande quantità di energia, emessa nello spazio sotto forma di radiazioni elettromagnetiche (radiazioni solari), flusso di particelle (vento solare) e neutrini. La radiazione solare, emessa fondamentalmente come luce visibile ed infrarossi, consente la vita sulla Terra fornendo l'energia necessaria ad attivare i principali meccanismi che ne stanno alla base. Dunque il sole è la più grande fonte di energia sul nostro pianeta. È capace di produrre 100.000 volte più energia di quella richiesta del fabbisogno del nostro pianeta. Nonostante questa grande disponibilità, è soggetta a limiti, quali:

- Bassa densità energetica: a parità di superficie occupata dall'impianto che sfrutta energia solare è in grado di prelevare solo modeste quantità di energia,
- Discontinuità: sia tra giorno e notte che tra stagione
- Modesto rendimento di conversione: Questo è l'unico fattore che può essere migliorato dalla tecnologia e dalla ricerca. Infatti, è dovuto alla scarsa efficienza

dei materiali usati per la conversione. La potenzialità è alta ma non esiste ancora la giusta combinazione tecnologica per sfruttarla al massimo.

L'energia solare sfrutta appunto i raggi solari i quali però arrivano sulla superficie terrestre con energia molto minore rispetto a quella posseduta al momento dell'emissione.

I principali fattori da cui dipende questa diminuzione sono:

- L'attività dell'orbita terrestre (influisce ma in piccola parte) fa sì che la potenza radiante incidente sulla terra C_0 vari in base alla distanza Sole-Terra discostandosi da C_s in base al periodo dell'anno considerato
- Lo schermo dell'atmosfera non perfettamente trasparente influisce in 3 diversi modi (dispersione del 30%). Ovvero, riflette una parte della radiazione crescente con l'angolo di incidenza dei raggi, assorbe una parte della radiazione a causa di elementi solidi, liquidi e gassosi dispersi nell'atmosfera stessa, dà luogo a fenomeni di diffrazione per via di molecole di H₂O e polveri
- Un altro fattore da cui dipende la diminuzione di energia che arriva sulla superficie terrestre è l'orientamento con cui i raggi toccano la superficie terrestre. L'orientamento migliore per la superficie captante sarebbe quello ortogonale rispetto alla radiazione. In condizioni di staticità della superficie captante questa configurazione si verifica una sola volta al giorno. Per il resto della giornata si ha che: C_i (componente di flusso ortogonale) = C_n (flusso relativo ai raggi solari) * $\cos(i)$ dove i è l'angolo di incidenza tra raggio solare e normale alla superficie.

CAPITOLO 3. L'EFFETTO FOTOVOLTAICO

3.1 SEMICONDUTTORI

La conversione alla radiazione solare in energia elettrica avviene sfruttando l'effetto indotto da un flusso luminoso che investe un materiale semiconduttore (per esempio il silicio) quando quest'ultimo incorpora su un lato atomi di drogante di tipo P e sull'altro atomi di drogante di tipo N. Consideriamo il reticolo cristallino del silicio in Figura 1. nel quale ciascun atomo è circondato da altri quattro e nel quale ognuno di essi mette in comune uno dei suoi quattro elettroni di valenza, appartenenti alle orbite più esterne. In questo modo gli è possibile completare l'ottetto esterno e rendere quindi stabile la configurazione (nella realtà essendo lo spazio 3D avremo una forma tetraedrica anziché la quadrata utilizzata per la rappresentazione sul piano). Gli elettroni appartenenti alle orbite più interne sono invece fortemente legati al nucleo e pertanto non entrano in gioco nei legami con gli altri atomi e nella conduzione elettrica.

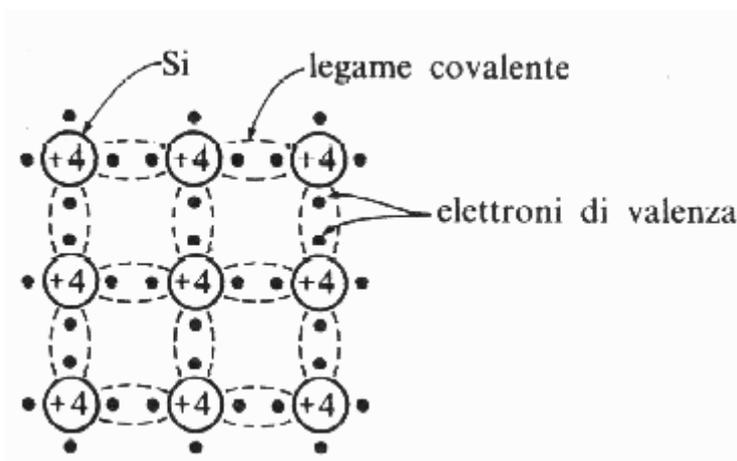


Figura 1. Reticolo cristallino del silicio

In un cristallo di questo tipo, detto intrinseco, gli elettroni, vincolati nei legami covalenti con gli altri atomi, si trovano tutti nello stesso livello energetico che appartiene alla banda di valenza e, a meno che non intervengano fattori esterni, non dispongono dell'energia sufficiente per passare alla banda di conduzione. La formazione delle bande di valenza e di conduzione derivano dal fenomeno quantistico enunciato da Pauli che prende il nome di "Principio di esclusione". Secondo questo principio due elettroni non possono avere il medesimo set di numeri quantici. Tuttavia, in un reticolo, l'effetto della vicinanza di un gran numero di atomi uguali fa sì che dalla struttura a livelli si passi ad una struttura a bande di energia, nella quale l'elettrone è libero di occupare un qualsiasi livello energetico all'interno della stessa banda. Un elettrone per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione ha bisogno di una certa quantità di energia che prende il nome di "Energy gap", che nel silicio vale circa 1,12 a temperatura ambiente, questa energia può essergli fornita sotto forma di energia fotoelettrica o termica. Quando ciò si verifica, l'elettrone, passando alla banda di conduzione è libero di muoversi nel reticolo, fino alla sua ricombinazione, esattamente come nei metalli.

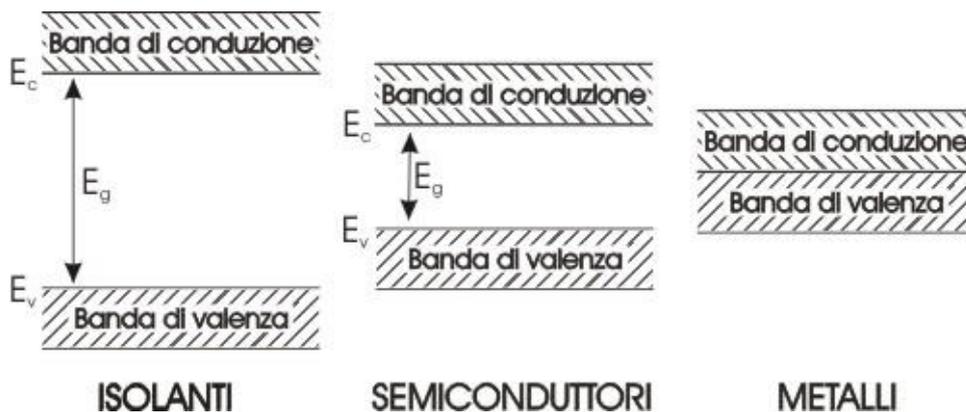


Figura 2.

I materiali semiconduttori come il silicio sono caratterizzati quindi dall'aver le bande di conduzione e valenza separate; tuttavia ogni elettrone che passa dalla banda di valenza

alla banda di conduzione lascia dietro di se una lacuna, la quale è in grado di muoversi sotto l'effetto di un campo elettrico comportandosi come una carica positiva. In conclusione in un reticolo di un cristallo semiconduttore la conduzione elettrica può avvenire a seguito del movimento di elettroni e lacune rispettivamente in banda di conduzione e banda di valenza.

3.2 GIUNZIONE P-N

Per migliorare le proprietà elettriche di un semiconduttore vengono effettuate delle operazioni di drogaggio, ovvero l'inserimento di atomi differenti nel reticolo cristallino, questa operazione non può essere effettuata oltre una certa misura, al fine di non interferire troppo con la geometria del cristallo. Il drogaggio sarà di tipo P se verranno introdotti degli atomi accettori (es. Boro) ovvero creeranno all'interno del reticolo un eccesso di lacune, al contrario con un drogaggio di tipo N (es. Fosforo) all'interno del reticolo di creerà un eccesso di elettroni. La conduzione elettrica dei due tipi di cristallo è sostanzialmente differente: mentre nel silicio P la conduzione avviene per effetto dello spostamento delle lacune nella banda di valenza, nel silicio di tipo N il moto delle cariche è dovuto all'eccesso di elettroni passati in banda di conduzione. Poiché a temperatura ambiente tutti questi elettroni possono essere considerati già presenti nella banda di conduzione possiamo dire che tutti gli atomi donatori concorrono alla conduzione elettrica in modo analogo a quanto avviene nei metalli. Se poniamo a contatto due cristalli di silicio uno di tipo P e uno di tipo N otteniamo una giunzione di tipo P-N. Per diffusione, le lacune presenti nel cristallo di tipo P tenderanno a spostarsi in quello di tipo N, mentre gli elettroni tenderanno a diffondere nel materiale di tipo P. Tuttavia questo fenomeno non continua all'infinito (poiché la giunzione sparirebbe) ma durerà fintantoché il potenziale elettrico generato dallo spostamento di cariche non diventa tale da

controbilanciare il moto di diffusione. In particolare, si forma un sottile strato neutro chiamato regione di svuotamento (depletion layer) laddove un drogaggio di tipo P si abbina ad un drogaggio di tipo N. I semiconduttori drogati (sia di tipo N che di tipo P) sono conduttori tanto migliori quanto più elevato è il drogaggio mentre la regione di svuotamento ha le proprietà di un isolante. Le giunzioni P-N sono comunemente usate come diodi (dispositivi elettronici che permettono un flusso di corrente in una direzione ma non in quella opposta) ma nello stesso tempo costituiscono anche una cella fotovoltaica. Questo risultato può essere ottenuto incrementando o riducendo l'estensione dello strato non conduttivo (la zona svuotata) grazie agli effetti della polarizzazione inversa e di quella diretta, dove il termine polarizzazione indica l'applicazione di una tensione elettrica alla giunzione. La tensione esterna infatti ne influenza la dimensione, richiamando un maggiore o minore numero di portatori; a seconda della densità di portatori disponibili, e quindi del tipo di semiconduttore scelto e del tipo di drogaggio con il quale è stato prodotto, sarà possibile variare con un ulteriore grado di libertà l'estensione della regione di svuotamento. Si osserva che il passaggio di corrente elettrica avverrà quando il potenziale applicato (positivo lato P negativo lato N) sia in grado di annullare il potenziale elettrico interno, al contrario se viene applicato un potenziale negativo (negativo sul lato P e positivo sul lato N) avremo che il potenziale elettrico interno si somma con quello esterno non consentendo il passaggio della corrente. Il potenziale elettrico all'interno della giunzione P-N, unitamente alla radiazione luminosa che investe il cristallo, sono alla base della generazione di corrente nella cella fotovoltaica.

CAPITOLO 4. CELLE FOTOVOLTAICHE

4.1 IL FUNZIONAMENTO

La condizione di lavoro ottimale della cella è rappresentata dal punto della caratteristica di generazione tensione-corrente in corrispondenza del quale il prodotto $V * I$, che esprime la potenza elettrica ottenibile a parità di altre condizioni, risulta massimo ($I_M * V_M$). Il rapporto tra $I_M * V_M$ e $I_{sc} * V_{oc}$ (prodotto della corrente di cortocircuito e della tensione a vuoto) viene detto fill-factor o fattore di riempimento della cella. Quest'ultimo per le usuali celle al silicio cristallino si aggira intorno a 0,75/0,80. Il fill-factor è anche un parametro di giudizio sul rendimento della cella; elevati valori di questo parametro sono solitamente indicatori di migliori prestazioni. La corrente di cortocircuito I_{sc} risulta di poco superiore alla corrente al punto di massima potenza (I_M , ne segue l'evidente difficoltà nell'uso di un dispositivo elettromeccanico di interruzione automatica della corrente.

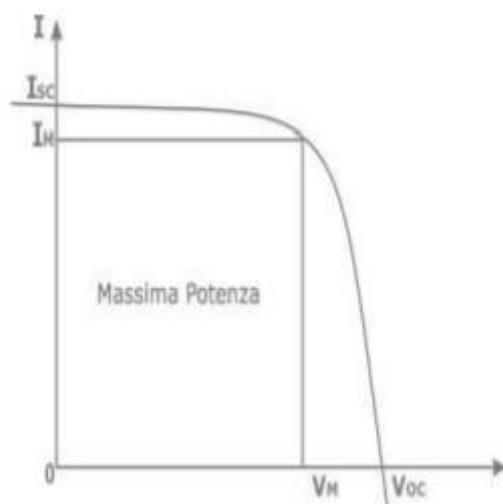


Figura 3. Grafico tensione-corrente

Essendo l'irraggiamento solare che colpisce i moduli fotovoltaici fortemente variabile in funzione della latitudine, della stagione, dell'ora del giorno e delle eventuali ombre, anche il rendimento ne sarà pesantemente influenzato. Un'altra caratteristica importante è che la quantità di energia prodotta da ciascuna cella fotovoltaica dipende anche dalla sua temperatura. Da queste considerazioni nasce la necessità di individuare istante per istante quel particolare punto sulla caratteristica V-I del generatore fotovoltaico in cui risulti massimo il trasferimento di potenza verso rete.

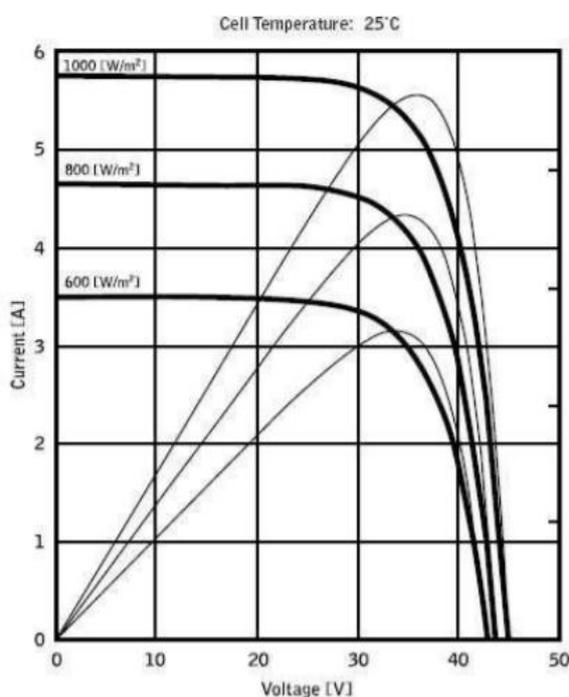


Figura 4: Caratteristica V-I

Le tre curve, in grassetto sono corrispondenti a tre valori (1000, 800, 600 W/m²) dell'irraggiamento solare. Su ogni curva caratteristica esiste uno ed un solo punto tale per cui è massimizzato il trasferimento di potenza verso un ipotetico carico alimentato dal modulo fotovoltaico. Il punto di massima potenza corrisponde alla coppia tensione-corrente tale per cui è massimo il prodotto $V * I$, dove V è il valore della tensione ai

morsetti del modulo e I è la corrente che circola nel circuito ottenuto chiudendo il modulo su un ipotetico carico. Con riferimento alla figura precedente, il prodotto $V * I$ è rappresentato per i tre valori dell'irraggiamento solare di cui sopra, tramite le tre curve a tratto più sottile. Come si vede, in accordo con quanto detto, tali curve esibiscono un massimo. Ad es. per 1000 W/m^2 , il punto di massima potenza corrisponde ad un valore di tensione pari a circa 36 V e corrente di circa $5,5 \text{ A}$. Chiaramente, se si riesce a massimizzare la potenza erogata, si riesce a sfruttare al meglio l'impianto, sia per quello connesso alla rete che per quello isolato. LMPPT è un dispositivo spesso integrato negli inverter che, ad ogni istante, legge i valori di tensione e corrente, ne calcola il prodotto (cioè la potenza in Watt) e, provocando piccole variazioni nei parametri di conversione (duty cycle), è in grado di stabilire per confronto se il modulo fotovoltaico sta lavorando in condizioni di massima potenza oppure no. A seconda del responso agisce ancora sul circuito per portare l'impianto in tale condizione ottimale. Il motivo per cui gli MPPT sono utilizzati è semplice: un impianto fotovoltaico senza MPPT può funzionare comunque, ma a parità di irraggiamento solare fornisce meno potenza elettrica. Quando la cella viene illuminata con fotoni aventi $E = h * \nu > P$, la giunzione diviene una sorgente di coppie elettrone-lacuna provocando la formazione della corrente elettrica I_L . L'espressione della corrente foto generata è data da:

$$I_L = C_o * G$$

Con:

- C_o : coefficiente di fotoconduttività (m^2/V)
- G : radiazione solare che incide sulla cella fotovoltaica (W/m^2)

La corrente che passa nella cella nel caso di alimentazione con tensione V è data dall'espressione della corrente che attraversa un diodo in conduzione diretta:

$$I_D = I_0(e^{qV/NKT} - 1)$$

dove:

- K : costante di Boltzman ($1.3810 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$)
- T : temperatura (K)
- I_0 : costante che dipende dalle caratteristiche dei due semiconduttori
- N : coefficiente compreso tra 1 e 2 (dipende dai fenomeni di generazione e ricombinazione che avvengono nella zona della carica spaziale (per un diodo ideale $N=1$)).
- q : carica elettrone La quantità $V_T = KT/q$ è chiamata potenziale termico.

L'espressione analitica di I_0 è la seguente: (Fig. dove: $I_0 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{-E_g/KT}$)

- A_0 : costante dipendente dal semiconduttore adottato.
- E_g : Energy gap (energia di estrazione).

A circuito aperto la tensione ai capi della cella raggiunge un valore V_{oc} massimo, mentre in questa condizione la corrente del dispositivo è nulla. Se la cella è chiusa in corto circuito, si misura una corrente massima denominata I_{CS} con una tensione nulla agli estremi. Quando è presente un carico esterno, la corrente I_{CS} diminuisce di una quantità pari a I_D , di direzione opposta a quella generata dal processo fotovoltaico (dark current) e ciò consegue dal fatto che la cella diventa un diodo a cui viene applicata una tensione.

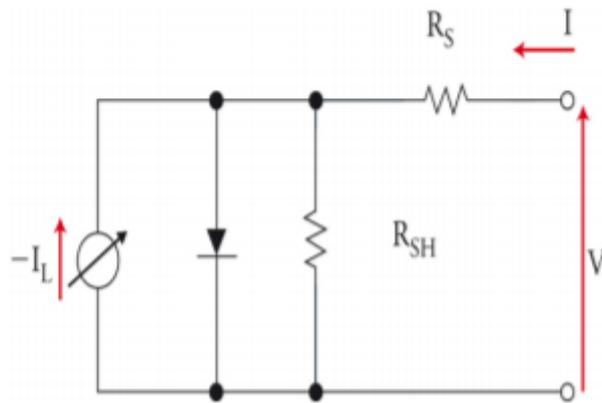


Figura 5.

La I_{RSH} corrisponde alla corrente di dispersione dovuta alla resistenza di shunt R_{SH} ed ha la seguente espressione: $I_{RSH} = (V + I * R_S)/R_{SH}$ La corrente I è quella che fluisce nel carico ed è quella che, ai fini pratici, ci interessa conoscere. La R_S è la resistenza parassita della cella e comprende la resistenza dei due strati di materiale che costituiscono la cella e la resistenza ohmica dei contatti stessi. L'equazione caratteristica della cella illuminata diviene dunque:

$$I = I_L - I_D - I_{RSH} = I_L - I_0 * (e^{q(V + I * R_S) / NKT} - 1) - (V + I * R_S) / R_{SH}$$

Dal grafico della variazione della curva caratteristica in funzione della radiazione incidente si ricavano le seguenti considerazioni:

- La tensione a vuoto V_{oc} è presente con valori prossimi a quello massimo anche a bassissimi valori di radiazione solare; questo significa che l'unico modo per evitare la presenza di tensione ai morsetti di un generatore fotovoltaico consiste nell'oscurarne totalmente la superficie captante.
- La corrente erogata varia proporzionalmente alla radiazione incidente.

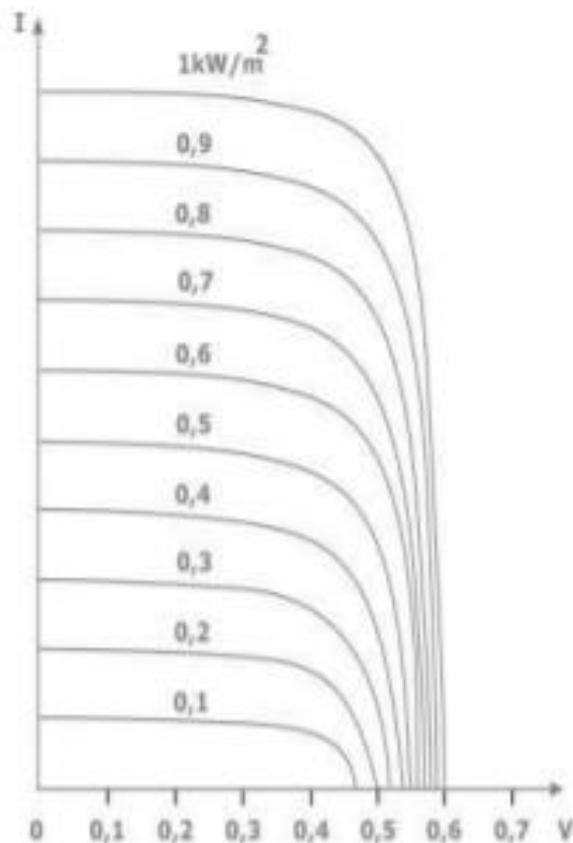


Figura 6.

All'aumentare della temperatura la curva tensione-corrente della cella fotovoltaica si modifica facendo registrare una diminuzione della tensione a vuoto V_{oc} e, congiuntamente, un aumento della corrente di cortocircuito I_{sc} . Queste variazioni possono essere prese come riferimento nell'intervallo di temperatura 0° - 60° . Come già visto, i moduli fotovoltaici in silicio cristallino contengono un certo numero di celle, normalmente 36, 64 o 72, elettricamente collegate tra loro così da formare un unico componente. Nei moduli commerciali le celle fotovoltaiche sono collegate in serie; alcuni costruttori rendono disponibile anche metà serie in modo da rendere più flessibile l'utilizzo di questi tipi di moduli, poiché a metà celle corrisponde anche metà tensione nominale.

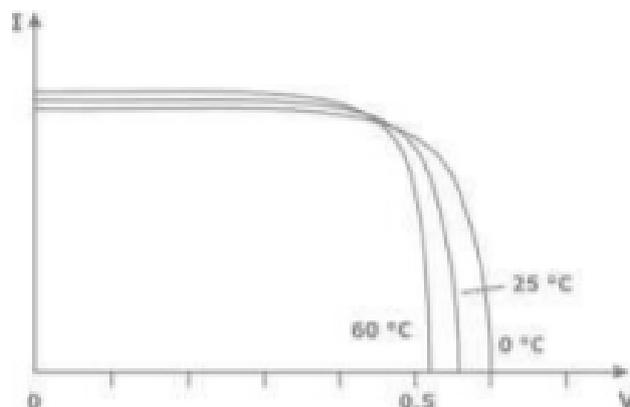


Figura 7: Variazione della corrente

Come risultato, i moduli fotovoltaici si configurano esternamente come componenti a due terminali (o quattro se sono previste due sezioni), aventi una curva caratteristica tensione-corrente con andamento analogo a quello delle singole celle che lo compongono ma con valori di tensione proporzionali al numero di componenti in serie. Considerando il funzionamento elettrico di una serie di celle si nota che, qualora una cella venisse oscurata, quest'ultima cesserebbe di comportarsi da generatore funzionando invece come un diodo polarizzato inversamente; questo comporterebbe il blocco della corrente generata azzerando così l'energia prodotta da tutta la catena, ossia dal modulo. Nel caso invece una delle celle fosse solo parzialmente oscurata, la corrente che attraversa il modulo risulterebbe pari a quella che tale cella produrrebbe se presa singolarmente. È importante quindi fare in modo che, durante il loro funzionamento, i moduli fotovoltaici vengano ombreggiati il meno possibile, anche solo parzialmente, in quanto ogni singolo modulo si comporta come se tutte le celle che lo compongono ricevessero una quantità di radiazione solare pari a quella che riceve la cella meno esposta, che si tradurrebbe in una riduzione dell'energia prodotta più che proporzionale rispetto alla percentuale di

superficie ombreggiata. È importante osservare che se in una serie costituita da molte celle ne viene ombreggiata una e, nel contempo, i terminali sono mantenuti in corto circuito o ad una tensione molto bassa, si può verificare il fenomeno detto hot-spot. La cella oscurata si trova, in questo caso, polarizzata inversamente con una tensione uguale o molto vicina alla tensione a vuoto di tutta la serie formata dalle celle rimanenti ed esposta quindi al pericolo di entrare in conduzione inversa. La cella si troverebbe a dover dissipare la potenza generata dalle rimanenti celle del modulo, provocando un aumento di temperatura localizzato (hotspot) che può portare, anche con modesti valori di radiazione solare, alla distruzione della cella per sovratemperatura. Per ovviare a questi problemi, molti moduli commerciali hanno montato nella morsettiera della cassetta di terminazione, dei diodi detti di by-pass proprio allo scopo di cortocircuitare e quindi di isolare il singolo modulo in caso di malfunzionamento. Ad esclusione della semplice ricarica di una batteria da 12 V con un solo modulo, per qualsiasi altra applicazione fotovoltaica è indispensabile collegare moduli in serie e in parallelo così da ottenere rispettivamente la tensione e la corrente totale necessaria. Più moduli vengono così collegati a formare una serie chiamata stringa, al fine di raggiungere la tensione nominale scelta; più stringhe vengono poi collegate tra loro in parallelo fino a raggiungere la corrente e quindi la potenza che si desidera installare. In serie ad ogni stringa si può notare la presenza di un diodo di blocco, il cui scopo è quello di impedire che, qualora l'erogazione di potenza delle singole stringhe non sia bilanciata, gli squilibri di tensione tra le stesse possano provocare dei ricircoli di corrente verso quelle a tensione minore. Inoltre evitano eventuali ritorni di corrente alle apparecchiature generatrici poste a valle delle stringhe (batteria, rete).

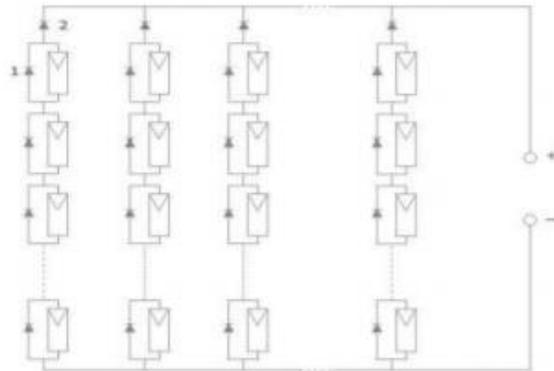


Figura 8: Moduli fotovoltaici connessi in serie e in parallelo



Figura 9.

Supponendo di usare moduli di uguali caratteristiche elettriche, la tensione nominale di un campo fotovoltaico (insieme di stringhe connesse in parallelo) risulterebbe pari alla somma delle tensioni nominali dei moduli che compongono ogni stringa:

cioè $V_n * x_n$, dove n è pari al numero di moduli in serie.

In realtà vi è una disuniformità di prestazione tra i moduli (i moduli fotovoltaici commerciali, anche se della stessa marca e modello, presentano valori di V_n e I_n non

uniformi, benché questi risultino distribuiti intorno ai valori medi indicati dalle case costruttrici) dovuta agli effetti della temperatura e all'occorrenza anche la caduta di tensione sul diodo di blocco (0,7 V). Analogamente la corrente di un campo fotovoltaico è data dalla somma delle correnti nominali delle stringhe (uguale a quella di ogni modulo della stringa) che lo compongono:

cioè $I_n \cdot x_m$, dove m è pari al numero di stringhe

4.2 IL RENDIMENTO

Il regime di funzionamento di una cella è quello in cui esso fornisce un determinato valore di potenza data dal prodotto $P = V I$; questa raggiunge il suo valore massimo nel cosiddetto punto di funzionamento della cella o punto di massima potenza. Quest'ultimo è individuato da un determinato valore di tensione, V e di corrente I . Un parametro caratteristico della cella solare è l'efficienza di conversione h , definita dal rapporto tra la potenza massima, per unità di superficie, fornita dalla cella stessa e l'intensità solare incidente sempre per unità di superficie. Mediamente il valore massimo dell'efficienza di conversione di una cella si trova tra il 20% ed il 25%. Di tutta l'energia, che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti. I motivi di tale modesta efficienza sono molteplici e possono essere raggruppati nelle seguenti categorie:

- Riflessione: non tutti i fotoni che incidono sulla cella penetrano al suo interno, dato che in parte sono riflessi dalla superficie e parte incidono sulla griglia metallica dei contatti.

- Energia sufficiente: per rompere il legame tra elettrone e nucleo è necessaria una ben determinata quantità di energia e non tutti i fotoni incidenti ne possiedono in modo sufficiente. Alcuni fotoni troppo energetici generano, inoltre, coppie elettrone-lacuna, dissipando in calore l'energia eccedente rispetto a quella necessaria a staccare l'elettrone dal nucleo.
- Ricombinazione: non tutte le coppie elettrone-lacuna generate sono raccolte dal campo elettrico di giunzione e inviate al carico esterno, poiché nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno opposto e quindi ricombinarsi.
- Resistenze parassite: le cariche generate e raccolte nella zona di svuotamento devono essere inviate all'esterno. L'operazione di raccolta è compiuta dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra silicio e alluminio dei contatti, permane una certa resistenza all'interfaccia ed essa provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico. Nel caso di celle al silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente ridotta a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, soprattutto, nel caso di celle al silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi.
- Resistenza superficiale: si perde il 3% a causa della resistenza superficiale della cella. Considerando tutte queste cause di dispersione, l'energia elettrica disponibile è pari appena al 18% circa dell'energia solare incidente.

4.3 TIPOLOGIE DI CELLE FOTOVOLTAICHE

La cella rappresenta la base di un sistema fotovoltaico; essa solitamente ha una superficie di 100 cm^2 (ma sul mercato ce ne sono di dimensioni anche maggiori), è di forma quadrata (anche se sono diversi i materiali di cui può essere costituita). Circa l'80% delle celle è realizzata in silicio poli o mono cristallino, l'altro 20% è coperto principalmente dalla tecnologia amorfa. Quest'ultima è principalmente utilizzata nelle microapplicazioni (alimentazione di calcolatrici, orologi), per le quali si ha bisogno di celle di bassa potenza e peso contenuto, facilmente ottenibili con questa tecnologia. Le celle costituite da sottili cristalli di silicio sono molto fragili e dunque poco resistenti a sforzi meccanici o deformazioni, per cui sono appoggiate su supporti rigidi prima di essere assemblate (vedi la foto seguente) una accanto all'altra con i relativi collegamenti elettrici in modo da formare un modulo fotovoltaico.

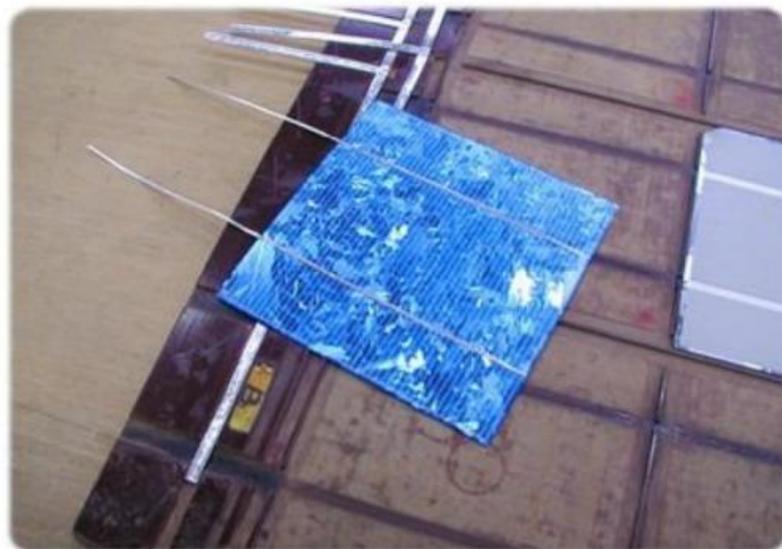


Figura 10 : Cella solare

4.3.1 CELLE FOTOVOLTAICHE IN SILICIO MONOCRISTALLINO E POLICRISTALLINO

Il mercato mondiale dei sistemi fotovoltaico riguarda semiconduttori che utilizzano come materiali di base silicio cristallino. Esso si presenta in due stati: monocristallino e policristallino. Le celle fotovoltaiche in silicio monocristallino hanno rendimento di conversione compresi tra 9-13,5%; il silicio a cristallo singolo è ottenuto da un processo detto melting a partire da cristalli di silicio di elevata purezza che, una volta fusi, vengono fatti solidificare a contatto con un seme di cristallo. Durante il raffreddamento, il silicio gradualmente si solidifica nella forma di un lingotto cilindrico di monocristallo del diametro di 13-20 cm, con una lunghezza che può raggiungere i 200 cm. In un momento successivo, il lingotto viene tagliato con speciali seghe a filo, in fettine dette wafers con spessore di $250 \div 350 \mu\text{m}$. Le celle fotovoltaiche in silicio policristallino hanno rendimento di conversione leggermente più bassi del monocristallino, a fronte di costi di produzione più contenuti; i cristalli si presentano ancora aggregati tra loro ma con forme e orientamenti differenti. Il miglioramento del processo produttivo delle celle di silicio policristallino consente ormai di realizzare celle con prestazioni elettriche solo di poco inferiore rispetto a quello di silicio monocristallino. Le celle a tecnologia cristallina hanno un degrado delle prestazioni elettriche molto contenuto, solo qualche punto percentuale nei 20-25 anni di vita utile. Per la produzione di celle vengono utilizzati gli scarti del silicio dell'industria elettronica, anche se alcuni costruttori hanno cominciato a realizzare silicio più adatto alle applicazioni di fotovoltaico ovvero un silicio meno puro il cui costo è più basso. Il processo di lavorazione delle celle in silicio, in fasi, prevede le seguenti fasi:

- gli scarti di silicio vengono fatti fondere in forno e poi fatti cristallizzare a contatto con un seme di cristallo, al fine di ottenere dei wafer ovvero dei lingotti di silicio.
- l'operazione successiva consiste nello squadrare e tagliare in fette di spessore pari a circa $300\mu\text{m}$ i wafer. Le dimensioni delle celle variano a seconda del costruttore; in generale le dimensioni dei lati sono comprese fra 2 e 20 cm.

Riguardo alla forma, come per le dimensioni, le celle variano a secondo del costruttore; le forme più ricorrenti sono: rettangolare, quadrata, trapezoidale, pseudo-quadrata, pseudo-rettangolare. Prima di effettuare il drogaggio viene eseguito il processo di testurizzazione che produce delle microscopiche piramidi sulla superficie anteriore della cella; questa operazione abbassa il coefficiente di riflessione del silicio di circa un terzo, arrivando così al 10%. Il cristallo viene drogato, mediante una piccola concentrazione di impurità per trasformarlo, tenuto conto della sua bassa conducibilità elettrica, in conduttore di elettricità. A secondo della natura delle impurità con cui viene drogato (ad esempio fosforo P), il cristallo diventa conduttore di cariche negative “n” “elettroni”, oppure (mediante boro B) di cariche positive (“p”), “lacune”. La zona del semiconduttore che viene drogato con fosforo risulta caricata negativamente (zona n), perché il fosforo ha cinque elettroni di valenza mentre il silicio ne ha quattro; nella zona che viene drogata con boro (zona p), che ha solo tre elettroni di valenza (ovvero tre elettroni nell'orbita più esterna), ci sono vacanze di elettroni (lacune). Una volta effettuato il drogaggio si realizzano i contatti elettrici. Il disegno della griglia disposta sulla parte esposta della luce del sole (metallizzazione) deve rappresentare un compromesso fra il valore di resistenza elettrica, che si vorrebbe fosse il più basso possibile, implicando però una elevata superficie metallizzata, ed una bassa riflessione della radiazione incidente ottenibile con una bassa estensione della superficie metallizzata. La connessione elettrica fra le celle

fotovoltaiche è ottenuta per mezzo di due contatti metallici di cui uno posto sulla faccia esposta alla radiazione solare e l'altro su quella opposta. Tali contatti sono normalmente ottenuti per evaporazione sottovuoto di metalli a bassa resistenza elettrica, ed effettuando successivi trattamenti termici al fine di assicurare la necessaria aderenza sulla superficie della cella. Successivamente, al fine di abbattere il coefficiente di riduzione, si deposita uno strato antiriflettente di ossido di titanio, in grado di ridurre circa 10 volte il coefficiente di riflessione; dallo spessore dello strato di ossido di titanio dipende la colorazione della cella (dal blu al nero), permettendo ai costruttori di ottenere colorazioni differenti in grado di integrarsi al meglio con la struttura sulla quale verranno installati i pannelli.

4.3.2 CELLE FOTOVOLTAICHE A GIUNZIONE MULTIPLA

Le celle a giunzione multipla sono state progettate al fine di ridurre l'energia dispersa in calore da parte dei fotoni, che hanno energia maggiore dell'energia di gap. Come già illustrato precedentemente se l'energia del fotone è maggiore dell'energia di gap, l'elettrone può essere liberato, ma l'eccesso di energia viene dissipata in calore. Le celle a giunzione multipla sono costituite in generale da due o tre strati di materiali semiconduttori diversi; ciascuno di questi strati risulta in grado di assorbire una frazione dello spettro solare, massimizzando il numero di fotoni utili alla conversione dell'energia radiante in elettrica.

4.3.3 CELLE FOTOVOLTAICHE A FILM SOTTILE

Le celle a film sottile sono formate da strati sottili di semiconduttori applicati ad un substrato di altro materiale (spesso vetro o ceramiche). La deposizione dello strato sottile può avvenire mediante un processo di vaporizzazione di spruzzamento catodico o tramite un bagno elettrico. I semiconduttori più utilizzati sono silicio amorfo, seleniuro di rame e indio (CIS) e tellurio di cadmio (CdTe). A causa dell'elevata capacità di assorbire calore da parte di queste sostanze, per le celle a film è richiesto l'impiego di un materiale fotosensibile molto ridotto: tale strato, teoricamente, può arrivare ad avere uno spessore di 0,001 mm. Gli aspetti che rendono questa tecnologia di particolare interesse in rapporto alle celle in silicio cristallino sono molteplici. La temperatura di processo è compreso tra i 200 ° C e i 500 ° C inoltre il processo di produzione è altamente automatizzato e consente un grande risparmio di energia e di materiale. Per quanto riguarda la forma delle celle, non esistono particolari vincoli, poiché il substrato può essere facilmente sagomato. Diversamente, la porzione di cella elettricamente attiva deve avere una forma quanto più possibile regolare (rettangolare) per agevolare l'interconnessione in serie con altre celle. Mentre ogni singola cella in silicio cristallino è collegata elettricamente ad una cella adiacente mediante una interconnessione esterna, le celle in silicio amorfo sono collegate tra loro in modo strutturale. Tra una cella e l'altra esiste un sottile interspazio trasparente solitamente impercettibile ad occhio nudo. Per esigenze architettoniche, le dimensioni di tale interspazio possono essere aumentate al fine di ottenere elementi strutturali semitrasparenti alla luce. Se necessario, è anche possibile realizzare una copertura fotovoltaica caratterizzata da un reticolo semi-trasparente. I contatti elettrici sul retro della cella consistono in una copertura metallica uniforme. La superficie anteriore della cella è invece ricoperta da uno strato di ossido metallici altamente trasparenti, come ad esempio

l'ossido di zinco (ZnO), ossido di stagno (SnO₂) e ossido di titanio e indio (Indium Titanium Oxide ITO). Il processo di produzione di un modulo prevede la deposizione di alcuni strisce sottili di materiale semiconduttore su lastre di vetro. Le stringhe una volta collegate tra loro vengono ricoperte con un manto di materiale composito (EVA-Etilen-vinil-acetato), e protette con un secondo vetro. Complessivamente, l'efficienza delle celle a film sottile è inferiore a quella delle celle in silicio cristallino; tuttavia, in certe condizioni, le prime garantiscono prestazioni migliori rispetto alle seconde. Le celle a film sottile sono più sensibili alla radiazione diffusa, e lavorano bene anche con bassi valori dell'irraggiamento. Inoltre all'aumentare della temperatura di esercizio del generatore fotovoltaico, la resa di queste celle si mantiene elevata in rapporto a quella delle celle in silicio cristallino. In fine la tipologia costruttiva delle celle a film sottile (strisce lunghe e strette) consente di ridurre le inefficienze dovute ad eventuali fenomeni di ombreggiamento.

4.3.4 CELLE FOTOVOLTAICHE IN SILICIO AMORFO

Il processo di produzione di queste celle è descritto nel seguito. Il silicio amorfo non ha una struttura reticolare regolare assimilabile a quella del silicio cristallino. A causa di questa irregolarità, il silicio amorfo viene saturato con idrogeno fino a stabilizzarsi. Tale composto (silicio amorfo idrogenato, a-Si:H) è ottenibile a partire da un reattore a plasma, attraverso una deposizione chimica di vapore di silano (SiH₄), ad una temperatura di processo di 200-250 ° C. Il drogaggio del silicio è realizzato a partire da composti gassosi contenenti boro e fosforo (ad esempio, B₂H₆ per lo strato p e PH₃ per lo strato n). Per aumentare la distanza di diffusione tra lo strato p e lo strato n viene depositato uno strato

I (non drogato) che facilita la formazione di una corrente elettrica. A seconda che il materiale fotosensibile sia depositato sulla superficie anteriore o posteriore del substrato di supporto (ad esempio vetro, metallo o plastica), si avrà una struttura caratterizzata da una stratificazione di tipo pIn piuttosto che nIp. Un limite delle celle in silicio amorfo risiede nei bassi valori di efficienza nominale, che peraltro in virtù dell'effetto dell'effetto Staebler-Wronski, tende a diminuire ulteriormente nell'arco dei primi 6-12 mesi di funzionamento. Per contrastare questi fenomeni, e grazie all'esiguo spessore delle celle, sono state studiate delle celle a giunzione multipla costituite, di fatto da celle semplici sovrapposte (disposte in fila) (stacked solar cells): ogni stack può essere formato da una sequenza di due o tre stratificazioni di tipo PIN. Questa soluzione consente di ottimizzare l'assorbimento della radiazione solare da parte della cella, e migliorarne l'efficienza globale, rendendo ogni strato fotosensibile alla luce in uno specifico intervallo di lunghezza d'onda. L'efficienza è di 5-8% (a regime, ossia al netto delle perdite di efficienza dovute all'effetto Staebler-Wronski) La forma è a scelta, moduli standard max è di 0,77 X 2,44m² , lo spessore del substrato è di 1-3 mm (vetro non indurito, plastica, metallo) e lo spessore del silicio amorfo è di circa 0,001mm, con una struttura uniforme, coi colori che variano dal marrone al nero.

4.3.5 CELLE FOTVOLTAICHE CIS (COPPER INDIUM DISELENIDE), AL SELENIURO DI RAME ED INDIO

Il processo di produzione è descritto nel seguito. Il materiale semiconduttore nelle celle CIS è seleniuro di rame ed indio in alternativa si ha cis anche con gallio (CIGS) e/o zolfo. Inizialmente, attraverso un processo catodico, la superficie posteriore del vetro che funge da substrato viene ricoperto da un sottile strato di molibdeno che svolge la funzione dei contatti analizzati nella sezione precedente. Lo strato P viene prodotto in questa stessa fase attraverso un processo di vaporizzazione sottovuoto del rame, dell'indio e del selenio ad una temperatura di 500 ° C; i contatti frontali sono realizzati in ossido di zinco drogato con alluminio (ZnO:Al), trasparente alla radiazione solare. Diversamente dalle celle in silicio amorfo, le celle CIS non subiscono alcun degrado a seguito dell'esposizione alla luce solare, ma sono sensibile al caldo e all'umidità. Per questo, è necessario che siano ben sigillate. Se confrontate con le altre celle a film sottile, le CIS hanno efficienza più alta; inoltre, sfruttando adeguatamente le economie di scala derivanti da una produzione in serie si dovrebbero raggiungere costi di produzione inferiori a quelli per le celle in silicio cristallino. Il pericolo derivante dall'impiego di selenio può essere trascurato in virtù del modesto contenuto di questo elemento nelle celle CIS. L'efficienza varia tra 7.5-9.5%, la è a scelta le dimensioni modulo massimo 1.20 X 0.6 m², di spessore 3 mm di substrato (vetro non indurito), 0.003mm di copertura di fotosensibile; la struttura è uniforme, e di colore nero.

CAPITOLO 5. MODULI FOTOVOLTAICI

Le celle solari costituiscono un prodotto intermedio dell'industria fotovoltaica, forniscono valori di tensione e corrente limitati in rapporto a quelli normalmente richiesti dagli apparecchi utilizzatori, sono estremamente fragili, elettricamente non isolate, prive di supporto meccanico; esse vengono quindi assemblate in modo opportuno a costituire un'unica struttura: il modulo fotovoltaico. Il modulo rappresenta di fatto il componente elementare dei sistemi fotovoltaici, una struttura robusta e maneggevole, in grado di garantire molti anni di funzionamento anche in condizioni ambientali difficili. Il processo di fabbricazione dei moduli è articolato in varie fasi: connessione elettrica, incapsulamento, montaggio della cornice e della scatola di giunzione. La connessione elettrica consiste nel collegare in serie-parallelo le singole celle per ottenere i valori di tensione e di corrente desiderati; al fine di ridurre le perdite per disaccoppiamento elettrico è necessario che le celle di uno stesso modulo abbiano caratteristiche elettriche simili tra loro. L'incapsulamento consiste nell'inglobare le celle fotovoltaiche tra una lastra di vetro e una di plastica, tramite laminazione a caldo di materiale polimerico. È importante che l'incapsulamento, oltre a proteggere le celle, sia trasparente alla radiazione solare, stabile ai raggi ultravioletti e alla temperatura, abbia capacità autopulenti e consenta di mantenere bassa la temperatura delle celle. In linea di principio la vita di una cella solare è infinita; è pertanto la durata dell'incapsulamento a determinare la durata di vita del modulo, oggi stimabile in 25-30 anni. Il montaggio della cornice conferisce al modulo maggiore robustezza e ne consente l'ancoraggio alle strutture di sostegno. I moduli in commercio attualmente più diffusi (con superficie attorno a 0.5-2 m²) utilizzano celle al silicio mono e policristallino e prevedono tipicamente 36 celle collegate elettricamente in serie. Il modulo così costituito ha una potenza che va da 50 a

200 Wp a seconda del tipo e dell'efficienza delle celle, e tensione di lavoro di circa 17 volt con corrente da 3 a 12 A. I moduli comunemente usati nelle applicazioni commerciali hanno un rendimento complessivo del 12-16%. È recentemente cresciuta la domanda di moduli di potenza superiore a 200 Wp, utili per l'integrazione di pannelli nella struttura di rivestimento di edifici. I moduli fotovoltaici possono essere classificati in base ai seguenti criteri.

- Tipologia di cella.

Si hanno:

- moduli monocristallini
- moduli policristallini
- moduli a film-sottile (amorfi, CdTe).

- Materiale incapsulante.

Si hanno:

- moduli in teflon
- moduli con colata di resina
- la distinzione dei moduli EVA non è generalmente usata.

- Tecnologia di incapsulamento:

- laminazione (con EVA o teflon).

- Substrato.

Si hanno:

- moduli con pellicola
- moduli con pellicola di vetro (o di vetro tedlar)
- modulo con foglio metallico
- modulo in plastica
- moduli vetro-vetro.

- Tipologia di cornice.

Si hanno:

- moduli con cornice
- moduli senza cornice

- Caratteristiche specifiche di costruzione.

Si hanno:

- moduli con doppio vetro rinforzato
- moduli con vetro di sicurezza laminato
- moduli con vetro isolante
- moduli con doppio vetro per applicazioni in lucernari
- moduli con vetro isolante calpestabile
- moduli con vetro laminato

In aggiunta ai precedenti criteri di classificazione è possibile distinguere i moduli anche in:

- standard
- speciali
- prodotti su richiesta.

Nel seguito verranno trattati moduli standard.

5.1 I MODULI STANDARD

I moduli standard sono realizzati con lo scopo di massimizzare l'energia raccolta per unità di superficie al minor costo possibile. La maggior parte di questi moduli sono realizzati in EVA e vetro laminato, con o senza cornice e sono di dimensioni e potenza standard.

Un modulo standard è composto solitamente da 36 o 72 celle pari ad una potenza che varia tra i 50 ed i 140Wp (silicio cristallino). Le celle generalmente sono collegate in serie a formare un rettangolo di dimensioni pari a 1.00m X 0.5m. L'esigenza di risparmiare sul materiale, di semplificare le operazioni di montaggio e quella non trascurabile di rendere esteticamente più gradevoli i moduli, hanno portato al raggiungimento di potenze dell'ordine di 340Wp (220 celle) e a dimensioni di 2.5m X 1.25 m.

5.2 CURVA CARATTERISTICA V-I DI UN MODULO FOTOVOLTAICO E RELATIVI PARAMETRI ELETTRICI

La curva caratteristica tensione corrente (V-I) costituisce la carta d'identità del modulo e si trova sul retro dello stesso come visibile in figura; vengono replicate le STC (irraggiamento $1000\text{W}/\text{m}^2$, temperatura della cella 25°C , AM 1.5) applicando un carico variabile da zero a un certo valore e misurando le coppie ordinate (tensione, corrente) relative. In figura 10 viene riportato un esempio di curva V-I di un modulo fotovoltaico in silicio cristallino con le caratteristiche elettriche misurate per quattro differenti temperature delle celle.



Figura 11: vista posteriore di una porzione di generatore fotovoltaico costituito da moduli monocristallini

Accanto alla curva V-I, normalmente ubicata sul retro del modulo, vengono riportati i seguenti dati misurati a STC:

- P_{max} (potenza nominale di picco), misurata in W_p rappresenta il massimo dei valori ottenuti moltiplicandole coppie ordinate della caratteristica tensione corrente del modulo, ovvero rappresenta il prodotto $V_m \cdot I_{mp}$; V_m ,
- I_{mp} sono rispettivamente la tensione e la corrente nel punto di massima potenza;
- P_{min} rappresenta il valore minimo garantito della potenza del modulo in W_p nella totalità dei moduli prodotti;
- I_{sc} (corrente di corto circuito) è la corrente prodotta dal modulo quando i suoi terminali elettrici sono cortocircuitati;
- V_{oc} (tensione a circuito aperto) è la tensione massima prodotta dal modulo fotovoltaico quando non c'è carico applicato;
- tensione massima è la tensione che si può raggiungere collegando in serie i moduli.

5.2.1 IL RENDIMENTO

La qualità della cella è individuato da un parametro di giudizio denominato fattore di riempimento della cella o fill-factor: $fill-factor = (V_m \cdot I_m) \div (V_{oc} \cdot I_{sc})$

- V_m tensione massima della cella;
- I_m corrente massima della cella;
- V_{oc} tensione a circuito aperto;
- I_{sc} corrente di corto circuito.

Il fattore di riempimento della cella o fill-factor indica, qualitativamente, di quanto la forma della curva V-I del modulo si avvicini ad un rettangolo ed è quindi indicativo della

qualità del componente. Il rendimento del modulo a STC, che esprime la quota di potenza solare incidente sulla superficie del modulo, che viene convertita in potenza elettrica, è invece dato da :

$$\eta_{\text{modulo}} = P_{\text{max}} \div (G \cdot A)$$

- G irraggiamento ad STC 1000W/mq (W/m²);
- A area della superficie del modulo (m²);
- P_{max} potenza massima fornita dal modulo (W).

Tali formule risultano di fondamentale importanza per operare dei confronti tra moduli diversi. I singoli moduli fotovoltaici vengono collegati in serie per formare delle stringhe e l'insieme delle stringhe collegate in parallelo formano il generatore fotovoltaico. Il numero di moduli dipende dalla tensione del modulo (nota una volta individuato il tipo di prodotto) e da quella dell'intera stringa. Nei prossimi paragrafi faremo un breve studio del generatore fotovoltaico, dell'accumulatore, regolatore di carica e dell'inverter.

CAPITOLO 6. COMPONENTI IMPIANTO FOTOVOLTAICO

6.1 GENERATORE FOTOVOLTAICO

Un “campo fotovoltaico” è costituito da un insieme di stringhe di moduli fotovoltaici installati meccanicamente nella sede di funzionamento e connesse elettricamente tra loro. Dal punto di vista elettrico il campo FV costituisce il “generatore fotovoltaico” dell’impianto. Il campo FV poi, nel caso di potenze significative, è costituito da sub campi (collegamento elettrico in parallelo di un certo numero di stringhe). La potenza nominale (o massima, o di picco) del generatore fotovoltaico è la potenza determinata dalla somma delle singole potenze nominali (o massima, o di picco) di ciascun modulo costituente il generatore fotovoltaico, misurate alle condizioni standard (STC, Standard Test Conditions). Per Condizioni Standard (STC) si intendono le condizioni di riferimento per la misurazione dei moduli: irraggiamento pari a 1000 W/m^2 ; spettro solare riferito ad un Air Mass di 1.5; temperatura di cella di $25 \text{ }^\circ \text{C}$. Tipicamente questa misura viene eseguita in laboratorio con un simulatore solare in quanto è molto difficile riprodurre queste condizioni in un ambiente esterno. Le caratteristiche del generatore fotovoltaico vengono in genere definite mediante due parametri elettrici: la potenza nominale P_{nom} , cioè la potenza erogata dal generatore FV in Condizioni Standard e la tensione nominale V_{nom} , ossia la tensione alla quale viene erogata la potenza nominale. Nella fase di progettazione di un campo fotovoltaico riveste una particolare importanza la scelta della tensione nominale di esercizio. Infatti, le elevate correnti che si manifestano per piccole tensioni comportano la necessità di adottare cavi di maggiore sezione e dispositivi di manovra più complessi; di contro elevate tensioni di lavoro richiedono adeguate e costose protezioni. Pertanto, un’opportuna scelta della configurazione serie/parallelo del campo fotovoltaico

consente di limitare le perdite e di incrementare l'affidabilità del sistema. In parallelo ai singoli moduli vengono disposti diodi di by-pass (Dbp) mentre un diodo di blocco (Db) è posto in serie a ciascuna stringa per impedire che gli squilibri di tensione tra le singole stringhe, nel caso di sbilanciamento nell'erogazione di potenza da parte delle stesse, possano dar luogo alla circolazione di una corrente inversa sulle stringhe a tensione minore. I diodi di blocco, dimensionati sulla base delle specifiche elettriche del campo fotovoltaico (corrente di cortocircuito del modulo I_{sc} , tensione a vuoto della stringa V_{oc}), sono generalmente contenuti all'interno del quadro di parallelo stringhe il quale raccoglie il contributo elettrico fornito dalle singole stringhe. Il diodo di by-pass consente, invece, di cortocircuitare e quindi isolare il singolo modulo, o parte di esso in presenza di due o più diodi per modulo, nel caso di un malfunzionamento, limitando in tal modo la brusca riduzione della potenza erogata dal modulo e/o dalla stringa che si manifesterebbe in sua assenza. Infine, è opportuno ricordare che l'energia prodotta da un generatore fotovoltaico è proporzionale alla quantità di radiazione solare raccolta sul piano dei moduli. Infatti questi ultimi, al fine di ottimizzare la produzione di energia elettrica, vengono orientati verso sud (angolo di azimut uguale a zero) con un'inclinazione rispetto al piano orizzontale (angolo di tilt) prossima alla latitudine del sito di installazione in modo tale da rendere massima l'energia solare raccolta sulla loro superficie.



Figura 12.

6.2 ACCUMULATORE

Nei sistemi FV isolati l'immagazzinamento dell'energia viene, in genere, effettuato mediante accumulatori elettrochimici. La presenza di batterie di accumulo permette di far fronte a punte di carico, senza dover sovradimensionare i generatori, nonché di garantire la continuità dell'erogazione di energia, anche in caso di basso irraggiamento o guasto dei generatori. Inoltre, la batteria di accumulo svolge il compito di realizzare l'accoppiamento ottimo fra il generatore fotovoltaico ed il resto del sistema. Di seguito se ne riportano le caratteristiche principali.

- tensione nominale U_{nom} : tensione alla quale l'energia immagazzinata è normalmente restituita (dipende dalla temperatura con coefficiente negativo);
- tensione massima di carica U_{max} e minima di scarica U_{min} oltre le quali si riduce la reversibilità delle reazioni;
- capacità: quantità di carica espressa in amperora [Ah] che può erogare alla temperatura nominale di 20°C , in un tempo di scaric a normalmente di 10 h. La capacità diminuisce

al diminuire del tempo di scarica e della temperatura. Il tempo di scarica pone un limite alla corrente erogabile;

- massima profondità di scarica DOD ("Depth Of Discharge"): capacità prelevabile, espressa in per cento, senza compromettere la vita dell'accumulatore;
- durata espressa in numero di cicli di carica e scarica riferiti a una data DOD, spesso del 50%;
- tasso di autoscarica: rapporto in per cento tra la carica perduta a vuoto e la capacità nominale; 30
- densità di energia (elettrica) accumulabile in Wh / l o [Wh / kg] che è circa 60 volte inferiore alle analoghe densità di energia (termica) immagazzinata nei combustibili liquidi.

Gli accumulatori per impianti FV, caratterizzati da un tempo di scarica di 100 h, devono presentare durata elevata, almeno 700 cicli per DOD=80% (510 anni), ridotta manutenzione ed elevata affidabilità. A parte l'uso di accumulatori al nichel-cadmio, limitato ad applicazioni per basse temperature, di solito si impiegano accumulatori al piombo più convenienti economicamente. Questi presentano per elemento:

$U_{nom} = 2 \text{ V}$; $U_{min} = 1,8 \text{ V}$; $U_{max} = 2,4 \text{ V}$ alla temperatura nominale di 20°C .

Gli accumulatori al piombo per avviamento di autoveicoli, di basso costo, presentano un'elevata corrente allo spunto e un numero di cicli molto ridotto (≈ 5), per questo motivo non sono adatti all'applicazione negli impianti FV, in cui sono sfruttati gli accumulatori per usi stazionari con capacità anche superiori al migliaio di amperora. Per evitare scariche profonde con fenomeni di solfatazione ($U < 1,9 \text{ V}$) e cariche eccessive con

sviluppo di idrogeno e pericolo di esplosione in assenza di aerazione ($U > 2,3 \text{ V}$), si impiegano opportuni regolatori di carica di tipo serie e parallelo. In casi molto particolari, questi possono non essere impiegati con l'uso di moduli FV, progettati in modo che gli accumulatori non possano lavorare al di fuori dell'intervallo di tensione permesso. La presenza degli accumulatori consente anche di migliorare il rendimento di utilizzazione del generatore perché il punto di lavoro è praticamente determinato dalla tensione degli accumulatori, scelta in corrispondenza della fascia di potenza massima erogabile dal generatore.

6.3 REGOLATORE DI CARICO

La finalità del regolatore di carica inserito in un impianto fotovoltaico isolato dalla rete è quello di prolungare il più possibile la vita utile delle batterie, realizzando un sistema di protezione da eccessi di carica o di scarica. Le funzioni operative di un regolatore di carica possono essere così riassunte:

- funzione di controllo dell'energia fornita dai moduli; nel caso in cui la batteria sia completamente carica, un ulteriore eccesso di energia da parte dei moduli fotovoltaici ha come conseguenza un surriscaldamento del sistema di accumulo e nel caso di sistema dotati di elettrolita liquido, la conseguente ebollizione dell'acqua. In tale caso si ottiene una veloce evaporazione dell'acqua nella batteria, con un danno irreversibile degli accumulatori. Il regolatore di carica interviene quindi interrompendo il contatto con i moduli;
- funzione di controllo dell'energia assorbita dal carico; nel caso in cui gli accumulatori contengono una quantità di energia troppo bassa, il regolatore

interviene e blocca la fornitura di energia al carico. Ciò in virtù che un eccesso di scarica degli accumulatori porta a danni irreversibili;

- protezione contro sovraccariche e cortocircuito; tali protezioni elettroniche incorporate nel sistema, riducono il rischio di danni alle utenze, derivanti da sovraccarico, cortocircuito, inversione di polarità, eccessiva tensione alta temperatura, correnti inverse della batteria ai moduli, scariche atmosferiche, transitori di corrente e picchi di tensione;
- fornire informazione sullo stato generale del sistema: lo stato di carica della batteria può in alcuni regolatori essere visualizzato da led, mentre il controllo della corrente erogata dai moduli, della tensione della batteria e della corrente assorbita dal carico può essere visualizzato tramite monitor cristalli liquidi.

6.4 INVERTER

La corrente generata dai pannelli fotovoltaici è di tipo continuo; visto che la maggior parte delle apparecchiature elettriche richiede la corrente alternata si utilizza un dispositivo denominato inverter; l'inverter è un convertitore statico, capace di trasformare l'energia elettrica continua in alternata.

6.4.1 CONVERTITORE GRID CONNECTED

Il convertitore grid connected (DC/AC) o inverter converte la corrente continua dal generatore FV in corrente alternata alla rete, in conformità ai requisiti normativi, tecnici e di sicurezza applicabili. Il funzionamento completamente automatico prevede che, non appena i moduli fotovoltaici ad esso collegati, generino sufficiente potenza (10-20W),

l'unità di controllo comincia a monitorare la tensione di rete e la frequenza, così come la fornitura di energia. L'inverter è in grado di funzionare in modo da sfruttare la massima potenza del generatore FV a cui è collegato (MPPT). La funzione MPPT (inseguimento della massima potenza) è una delle caratteristiche principali dell'inverter, che gli permette di individuare e inseguire istante per istante quel particolare punto sulla caratteristica corrente-tensione del generatore FV, per il quale risulta il trasferimento di potenza verso il carico posto a valle. L'inverter è quindi in grado di individuare la massima potenza P_{max} che rappresenta il massimo dei valori ottenuti moltiplicando i valori della caratteristica tensione-corrente $V_{mp} \cdot I_{mp}$ che sono rispettivamente tensione e corrente nel punto di massima potenza. In assenza di energia solare, l'inverter interrompe automaticamente il collegamento e smette di funzionare (ciò in virtù del fatto che l'unità di controllo viene alimentata dal generatore FV) il convertitore è completamente spento durante la notte e quindi il suo consumo complessivo è bassissimo (assorbimento in stand-by).

6.4.1.1 PARAMETRI ELETTRICI DEL CONVERTITORE GRID CONNECTED

I parametri elettrici di ingresso che verranno utilizzati nella scelta di un convertitore sono:

- la massima corrente d'ingresso I_{DCmax} ;
- la massima tensione d'ingresso V_{DCmax} ;
- il range di tensione MPPT ($V_{DC,MPPT,min}$; $V_{DC,MPPT,max}$);

I parametri elettrici di uscita sono:

- la potenza nominale P_{nom} ;
- la tensione nominale V_{Anom} ;
- la frequenza nominale f_{nom} ;
- la corrente massima di uscita $I_{AC,max}$;
- il fattore di potenza della corrente immessa in rete.

6.4.2 CONVERTITORE GRID STAND ALONE

Il convertitore stand alone (DC/AC) o inverter trasforma la corrente in continua prodotta dal generatore fotovoltaico in corrente alterna ai carichi dell'utente, in conformità ai requisiti normativi, tecnici e di sicurezza applicabili. Esistono convertitori che possono funzionare sia in isola che in parallelo alla rete; in tal modo se un impianto nato per funzionare in isola viene successivamente raggiunto e alimentato da una rete elettrica può continuare a funzionare senza spese aggiuntive o per il cambio del convertitore.

6.4.2.1 PARAMETRI ELETTRICI DEL CONVERTITORE STAND ALONE

I parametri elettrici di ingresso che verranno utilizzati per la scelta di un convertitore sono:

- il valore della tensione nominale;
- il range delle tensioni ammesse;
- la massima potenza raccomandata dal campo FV.

I parametri elettrici di uscita sono:

- la potenza nominale (KVA);
- la capacità di erogazione della potenza reattiva;
- il sovraccarico transitorio o cortocircuito in uscita;
- il sovraccarico ammissibile nel campo di funzionamento e la frequenza e tensione d'uscita;
- la forma d'onda d'uscita e la distorsione armonica

Altri parametri

- la potenza dissipata in assenza di carico;
- la potenza necessaria in stand-by;
- il range di temperatura a cui possono funzionare;
- il grado di protezione.

Anche i convertitori stand alone, con riferimento alle protezioni, hanno il controllo dell'isolamento lato continua, prevedono l'apertura lato continua per tensione minima di ingresso ed hanno la protezione per l'inversione della polarità.

CAPITOLO 7. ANALISI E VALUTAZIONE INVESTIMENTO DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO

L'azienda Tralfo nasce in Abruzzo nel 1970 dall'impegno profuso della famiglia Fonzi. Nel 1992 realizza la prima piattaforma di stoccaggio merci indirizzata al deposito di prodotti igienici. Nell'autunno del 2018 Tralfo accresce nuovamente la sua presenza sul territorio in seguito all'acquisizione di una piattaforma logistica di 10000mq. Tale struttura viene riservata allo stoccaggio di prodotti vitivinicoli, igienici e sanitari. All'esterno della struttura è presente una pesa a ponte modulare per gli autoarticolati. Adiacente alla struttura, sorge la nuova sede amministrativa della società. La Tralfo ha necessità di realizzare una nuova copertura dei magazzini per un totale di circa 5400 mq, ed avrebbe intenzione di utilizzare 2200mq di essa con inserimento d'impianto fotovoltaico. Mi ha chiesto di stabilire la convenienza dell'eventuale investimento ed i suoi tempi di recupero con e senza l'utilizzo dello storage.

7.1 ANALISI DEI COSTI E DEI RICAVI

Una soluzione progettuale di un impianto deve essere supportata da due analisi di fattibilità: una tecnica ed una economica. Effettuando l'analisi tecnica ci si trova spesso di fronte a varie possibilità; ciò che indirizza verso una soluzione piuttosto che verso un'altra è il risultato della verifica di convenienza economica dell'investimento. La suddetta analisi viene effettuata tramite l'analisi dei costi-benefici che consiste in un confronto tra l'investimento iniziale e l'ammontare del guadagno attualizzato che si presume fluisca in entrata per l'investimento stesso nel corso della vita dell'impianto. Si

tratta di determinare il guadagno di un dato investimento che consenta un ricavo a fronte di una serie di costi:

$$U = R - C$$

Nel nostro caso l'analisi di fattibilità è volta alla valutazione:

- del potenziale energetico disponibile;
- della produzione annua di energia, attraverso l'individuazione della tecnologia più adatta;
- dell'investimento iniziale e del suo ritorno economico.

7.2 DIMENSIONAMENTO IMPIANTO SENZA ACCUMULO

In questo caso il gruppo-batterie non è necessario. Viene ceduta energia alla rete nelle ore di produzione e la preleviamo quando non si ha sufficiente insolazione. Il numero di ore equivalenti medio annuo (heq) è ricavabile dalla seguente tabella:

FASCIA CLIMATICA	VALORE MEDIO nel MESE di DICEMBRE	VALORE MEDIO nel MESE di LUGLIO	VALORE MEDIO nell'ANNO
NORD	1,3	5,6	3,56
CENTRO	2,7	6,4	4,7
SUD	3,5	7,1	5,4
LOCALITA' ALPINE	3,3	5,4	4,4

Tabella 1: Valori statistici di soleggiamento medio per le fasce climatiche in cui può essere divisa l'Italia.

Il valore massimo di potenza FV installabile si ottiene dividendo la superficie individuata per:

- un fattore pari a 10 in caso di installazione su superficie obliqua;
- un fattore pari a 22 in caso di installazione su superficie orizzontale. L'orientamento deve comunque essere il più possibile verso sud.

Nel nostro caso, quindi, la superficie disponibile è pari a 2'200mq circa ed è orizzontale, pertanto la potenza installabile (potenza massima erogabile dall'impianto) sarà:

$$P = 2'200/22 = 100 \text{ kWp}$$

Per il Centro Italia:

$$\text{heq} = 4,7 \text{ kWh/ (m}^2 \cdot \text{giorno)}$$

L'energia annua che l'impianto FV produrrà può essere calcolata come segue:

$$E = P \cdot h_{eq} \cdot \rho \cdot 365 = 145'817 \text{ kWh/anno}$$

dove $\rho = 0,85$ è un fattore che tiene conto dell'inverter, del sistema di condizionamento della potenza ed interfacciamento alla rete e di varie perdite, quali quelle causate dal riscaldamento dei moduli. Confermata la disponibilità di superficie, è possibile che i prodotti in commercio non consentano di ottenere esattamente la potenza di installazione desiderata. Ogni tipologia di pannello ha infatti un proprio range di prestazioni sensibilmente diverse, con un margine di variabilità abbastanza ampio. In particolare, nel caso in esame si è stimata una produzione di 132000 kWh con decadimento annuo del – 0,7%.

Analizziamo ora l'energia FV e l'irraggiamento mensile considerando la localizzazione dell'azienda con Lat/Long: 42.302, 14.034. Oltre che il luogo e la modalità di installazione dei moduli fotovoltaici, poniamo l'attenzione all'orientamento e all'inclinazione dei pannelli che cambiano le prestazioni dell'impianto fotovoltaico: più i moduli sono orientati in maniera ottimale verso i raggi del sole, più l'effetto fotovoltaico sarà migliore. Per "orientamento" si intende lo spostamento tra i punti cardinali: nord, sud, est, ovest. Per "inclinazione" si intende invece la "pendenza", la "angolatura", dei pannelli rispetto al piano orizzontale (del suolo). La formula per individuare l'inclinazione migliore ad ogni latitudine:

$$\text{Inclinazione ottimale} = 3,7 + (0,69 \times \text{Latitudine})$$

Dunque, nel nostro caso specifico si è scelta un'inclinazione di 35° . In tabella vengono riportati i dati mensili del sistema in esame, dove:

- Em: Media mensile del rendimento energetico dal sistema scelto [kWh];

- Hm: Media mensile di irraggiamento al metro quadro sui moduli del sistema scelto [kWg/m²];

MESE	Em [kWh]	Hm [kWg/m²]
Gennaio	5580	70.4
Febbraio	6890	87.0
Marzo	9820	127
Aprile	12300	166
Maggio	14100	194
Giugno	14800	208
Luglio	16000	230
Agosto	14900	212
Settembre	10800	148
Ottobre	8090	107
Novembre	6000	76.9
Dicembre	5400	68.3

Tabella 2: Dati dell'irraggiamento mensile

Il dimensionamento di un impianto fotovoltaico è un processo che richiede non solo un complesso **studio di fattori** quali: latitudine e longitudine, irraggiamento, superficie, vincoli paesaggistici, patteggiamenti, ma anche un profilo dei consumi elettrici attuali e futuri.

E' necessario dunque analizzare la spesa annua dei consumi dell'azienda in esame:

FASCIA ORARIA	CONSUMO [KWh]	FRAZIONE %
F1	94202 Kwh	33,88 %
F2	66578 Kwh	23,94 %
F3	117274 Kwh	42,18 %
TOTALE	278054 Kwh	100,00%

Tabella 3: Storico consumi (1 anno)

MESE	CONSUMO [KWh]	Spesa [€]
1	22064	€ 3.228,23
2	24324	€ 3.709,75
3	24008	€ 3.621,49
4	25718	€ 3.829,88
5	29469	€ 4.573,75
6	23386	€ 3.652,69
7	23769	€ 3.764,34
8	17460	€ 2.819,05
9	17816	€ 2.851,97
10	22097	€ 3.536,34
11	24847	€ 3.940,58
12	23095	€ 3.610,31
Totale	278053	€ 43.138,38 + iva
		€ 52.628,82

Tabella 4: Spesa annua consumi (relativamente agli ultimi 12 mesi)

Oneri passanti (tasse) ed imposte variano al variare dei consumi, quindi per correttezza di calcolo, si aggiunge anche l'iva.

FASCIA ORARIA	COSTO	CONSUMO [KWh]
F1	€ 17.830,64	94202 Kwh
F2	€ 12.599,35	66578 Kwh
F3	€ 22.198,83	117274 Kwh
Totale	€ 52628,82	

Tabella 5: Analisi fattura elettrica nelle fasce orarie

Nelle bollette di luce e gas per fascia oraria F1 si intende tutti i giorni feriali, dal lunedì al venerdì, tra le ore 8.00 e le ore 19.00, festività escluse. Per fascia oraria F2 si intende invece tutti i giorni feriali, dal lunedì al venerdì, dalle ore 7.00 alle ore 8.00 dalle ore 19.00 alle ore 23.00, il sabato dalle 7.00 alle 23.00, festività escluse. La fascia oraria F3

indica i giorni dal lunedì al sabato dalle ore 00.00 alle ore 7.00 e dalle ore 23.00 alle ore 24.00, e tutte le domeniche e i festivi.

Si dettagliano di seguito le caratteristiche tecniche dell'impianto fotovoltaico "connesso a rete" da 100,00 kWp, configurato per ottenere il miglior rendimento, attraverso una scelta accurata della disposizione dei pannelli, delle taglie e delle caratteristiche dei componenti, costituito da:

- N°334 Moduli fotovoltaici al silicio policristallino da 300 Wp ciascuno. I moduli sono costituiti da 60 celle ad altissima efficienza fino al 18,42% permettendo ai moduli di produrre una elevata potenza di picco in poco spazio.
- N°5 Inverter di stringa marca Zucchetti Centro Sistemi
- Quadri elettrici generali realizzati in box a parete di tipo in PVC da interno, di dimensioni adeguate e contenente: scaricatori di sovratensioni per tutte le linee dal campo fotovoltaico; interruttori magnetotermici e differenziali a protezione di tutti i circuiti AC-DC in ingresso ed in uscita; morsettiere su guida DIN per tutte le utenze in ingresso/uscita.
- N°1 Impianto elettrico di distribuzione ed interconnessione di tutte le apparecchiature e componenti, costituito da tubazioni canaline, passerelle, cassette, cavi e accessori di collegamento e fissaggio di dimensioni adeguate al sito di posa per la specifica destinazione d'uso, per un massimo di 20 m

Nella seguente tabella vengono riportate i dati elettrici del suddetto impianto fotovoltaico:

Specifiche elettriche	300
Potenza nominale (Wp)	300
Tensione a circuito aperto	39,60 V
Tensione a Pmax	32,80 V
Corrente a Pmax (A)	9,16
Corrente di cortocircuito (A)	9,64
Tensione a vuoto (V)	39,30
Efficienza modulo (%)	18,42
Temperatura d'esercizio	-40+85°C
Max tensione sistema V	1000
Numero di celle	60 (6 x 10)
Tecnologia celle	Monocristallino
Tipo di cella	Silicio
Dimensioni modulo	1660 x 990 x 50 IP65
Peso (Kg)	20
Carico ammissibile (Pa)	5400

Tabella 6: dati elettrici dell'impianto

Con l'utilizzo di questi dati è possibile a questo punto fare un'analisi di investimento dell'impianto in esame considerando il costo dell'impianto di €127.540,00+ IVA di Legge.

FASCIA ORARIA	RISPARMIO [€]	FRAZIONE %
F1	17.830,64	100%
F2	6.299,68	50%
F3	2.109,00	9,50%

Tabella 7: risparmio

Il risparmio totale è di € 26.239,32 che ripartito in 12 mensilità risulta pari a €2.186,61 mensili.

Il costo totale dell'impianto viene finanziato tramite un sistema leasing di 84 rate da €1756,29 + Riscatto 1% €1275,40.

Nel caso del leasing, la proprietà del bene, cioè l'impianto fotovoltaico, è di proprietà dell'istituto che eroga il finanziamento, il quale, a fronte del pagamento di un maxicanone iniziale e di un canone periodico, concede al cliente la facoltà di utilizzare il bene stesso. Successivamente quest'ultimo diventa di proprietà del locatario (il cliente) dopo il pagamento di un riscatto finale. La durata minima contrattuale non può essere inferiore ai due terzi della vita utile del bene. Lo sviluppo del leasing è dovuto alle maggiori agevolazioni fiscali rispetto ad un acquisto diretto senza il ricorso al finanziamento, e "all'anonimato" al fisco del locatario in quanto l'intestatario del bene è l'istituto di credito. Il canone del leasing si calcola come segue:

$$c = t \cdot (1+t)^n \cdot [(C-m) - r / (1+t)^n] / [(1+t)^n - 1]$$

con:

- c = importo del canone;
- t = tasso di interesse del periodo di pagamento, dato dal tasso annuale diviso per il numero di rate annuali;
- n = numero di rate totali;
- C = capitale finanziato;

- m = maxicanone iniziale;
- r = riscatto finale.

Considerato che la proprietà non è dell'utilizzatore, non è previsto alcun ammortamento dell'impianto per tutta la durata del finanziamento; eventualmente si ha se il bene viene riscattato e riguarderà proprio il riscatto finale.

Il bilancio mensile fornisce:

Rata mensile	€1756,29
Risparmi sulla fattura elettrica	€2.186,61
Guadagno mese	€430,32

Tabella 8: bilancio mensile

Mentre, il bilancio annuale fornisce:

Rata annuale	€21.075,55
Risparmio fattura elettrica	€26.239,32
Guadagno annuale netto	€5.163,84

Tabella 9: bilancio annuale

Nell'ottica del sistema fotovoltaico così progettato, lo stesso risparmio ripaga l'investimento generando un guadagno annuo di €5.163,84, inoltre bisogna tenere conto dei benefici fiscali derivanti dal decreto salva-cantieri. Proprio per questo motivo, si ritiene che l'ammortamento dell'investimento avviene sin da subito.

7.3 DIMENSIONAMENTO IMPIANTO CON ACCUMULO

Il campo delle energie rinnovabili è molto vasto e non si limita alla ricerca di fonti energetiche alternative: è molto importante l'efficienza degli usi energetici. Si tratta, quindi, di poter costruire degli impianti in grado di convertire l'energia fornita nel modo migliore possibile, capaci di essere integrati assieme alla rete energetica già presente. Inoltre bisogna tener conto che le fonti rinnovabili non producono energia in maniera regolare e, pertanto, possono essere sfruttate solo in determinate condizioni; ad esempio, l'energia solare non è sfruttabile durante la notte e comunque durante il giorno l'efficienza energetica è variabile in base alle diverse condizioni climatiche che possono presentarsi. Dunque, una problematica che si accosta all'energia sostenibile è quella dell'immagazzinamento dell'energia, per renderla disponibile quando se ne fa richiesta. In figura 2 è possibile vedere un semplice esempio che mostra la differenza di bilancio energetico tra potenza generata ed energia richiesta di un sistema con e senza accumulatori di carica, dove la carica elettrica immagazzinata viene successivamente impiegata in un momento di picco di domanda. Lo studio e la ricerca sugli accumulatori è molto attuale ed in costante crescita, proprio per le numerose applicazioni in campo energetico che ne possono derivare, a partire dal normale accumulo da fonti rinnovabili fino ad essere parte integrante delle odierne Smart Grid, cioè reti di informazione e di distribuzione elettrica gestite in modo intelligente. Bisogna inoltre ricordare che gli accumulatori hanno un'infinità di applicazioni oltre quella relativa allo stoccaggio dell'energia elettrica, in base alla tecnologia con la quale sono progettati: ad esempio, possono alimentare impianti elettrici di veicoli, apparecchi elettronici in generale (sia

elettrodomestici sia di elettronica moderna come computer portatili, cellulari, ecc.), apparecchi microelettronici, apparecchiature mediche, apparati industriali.

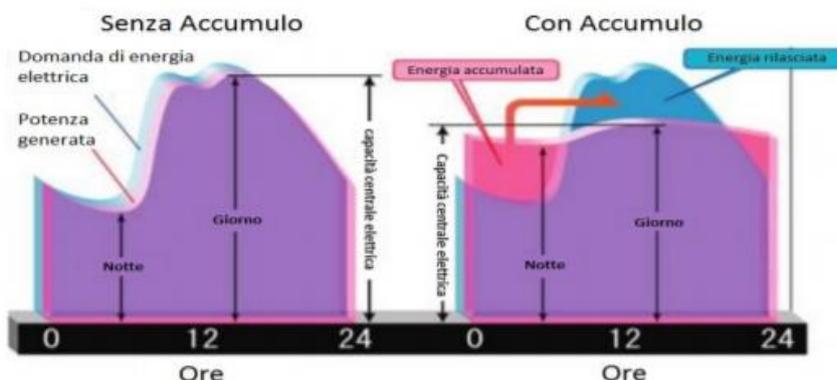


Figura 13: grafico relativo all'energia di un impianto con accumulo e senza accumulo

In questo secondo caso viene progettato un impianto fotovoltaico da 100KWp che produce, da calcoli termodinamici e relative perdite dovuti per diversi fattori incidenti, 132000KWh. L'impianto verrà affiancato ad un idoneo sistema di storage per aumentare notevolmente il periodo di autoconsumo, proprio per questo motivo si propone un sistema idoneo da 30 Kwh agli ioni di litio con un costo di 600€/kWh .

Si dettagliano di seguito le caratteristiche tecniche dell'impianto fotovoltaico con accumulo:

- N°334 Moduli fotovoltaici al silicio cristallino da 300 Wp caduno. I moduli sono costituiti da 60 celle ad altissima efficienza fino al 18,42% permettendo ai moduli di produrre una elevata potenza di picco in poco spazio.
- N°5 Inverter di stringa marca Zucchetti Centro Sistemi
- Quadri elettrici generali realizzati in box a parete di tipo in PVC da interno, di dimensioni adeguate e contenente: scaricatori di sovratensioni per tutte le linee

dal campo fotovoltaico; interruttori magnetotermici e differenziali a protezione di tutti i circuiti AC-DC in ingresso ed in uscita; morsettiere su guida DIN per tutte le utenze in ingresso/uscita.

- N°1 Impianto elettrico di distribuzione ed interconnessione di tutte le apparecchiature e componenti, costituito da tubazioni canaline, passerelle, cassette, cavi e accessori di collegamento e fissaggio di dimensioni adeguate al sito di posa per la specifica destinazione d'uso, per un massimo di 20 m.

Nella seguente tabella vengono riportate i dati elettrici del suddetto impianto fotovoltaico:

Specifiche elettriche	300
Potenza nominale (Wp)	300
Tensione a circuito aperto	39,60 V
Tensione a Pmax	32,80 V
Corrente a Pmax (A)	9,16
Corrente di cortocircuito (A)	9,64
Tensione a vuoto (V)	39,30
Efficienza modulo (%)	18,42
Temperatura d'esercizio	-40°C+85°C
Max tensione sistema V	1000
Numero di celle	60 (6 x 10)
Tecnologia celle	Monocristallino
Tipo di cella	Silicio
Dimensioni modulo	1660 x 990 x 50 IP65
Peso (Kg)	20
Carico ammissibile (Pa)	5400

Tabella 10: dati elettrici dell'impianto fotovoltaico

L'importo finale per la realizzazione dell'impianto fotovoltaico della potenza di picco di 100kWp con storage di 30kWh è pari a: € 145.891,00 + IVA di Legge. In base all'analisi

della fattura elettrica e dei relativi dati dell'impianto fotovoltaico si avrà sicuramente un incremento in termini monetari. Il vantaggio di utilizzare uno storage fotovoltaico sta tutto nell'aumento della quota di [autoconsumo](#). Se con i pannelli si parla di autoconsumo diretto, in quanto l'energia prodotta viene immediatamente utilizzata nella rete aziendale, con la batteria abbiamo l'autoconsumo differito, cioè la possibilità di sfruttare l'energia auto-prodotta quando effettivamente serve, indipendentemente dal fatto che il sole splenda o meno in cielo. Riferendoci all'azienda in esame, nelle ore diurne del fine settimana l'impianto produce energia, ma essendo l'azienda chiusa questa non viene utilizzata. Far funzionare l'impianto fotovoltaico a vuoto, però, è poco conveniente. A tutti gli effetti si sta pagando per una cosa che non si usa. Con la batteria, invece, l'azienda si può assicurare una gestione intelligente dell'energia prodotta, consumata, stoccata e prelevata dalla rete. Riprendendo l'analisi della fattura elettrica in tabella sotto riportata, vediamo come la Tralfo, utilizzando celle frigorifere per la conservazione dei farmaci che trasporta e ricaricando i muletti nella notte, ha un consumo notevolmente superiore nella fascia F3.

ANALISI FATTURA ELETTRICA NELLE FASCE ORARIE

FASCIA ORARIA	CONSUMO [KWh]	COSTO [€]
F1	94202	17.830,64
F2	66578	12.599,35
F3	117274	22.198,83
Totale	278054	52628,82

Tabella 11.

Nell'analisi precedentemente fatta abbiamo visto che questo costo, con l'utilizzo del solo impianto fotovoltaico, diminuisce solo del 9,50%. Uno storage di 30kWh risolve questo problema, facendo risparmiare fino al 90% dei costi della bolletta.

FASCIA ORARIA	RISPARMIO [€]	FRAZIONE %
F1	17.830,64	100%
F2	10.079,48	80%
F3	17.759,06	80%

Tabella 12.

Il risparmio totale è di €45.669,18€ che ripartito in 12 mensilità risulta pari a €3.805,76 mensili.

Anche in questo caso il costo dell'impianto viene finanziato tramite un sistema leasing di 84 rate da €2.009,00 + Riscatto 1% €1459,00

Il bilancio annuale fornisce:

Rata annuale	€24.108,00
Risparmio fattura elettrica	€45.669,18
Guadagno annuale netto	€21.561,18

CONCLUSIONE

In sintesi, l'azienda Tralfo potrebbe realizzare un impianto fotovoltaico con l'ausilio di uno storage per un totale di 145.891,00€. Riassumendo i dati principali, ricordo che:

- la superficie disponibile in questione è pari a circa 2'200 mq;
- saranno montati 334 pannelli con potenza nominale (o di picco): 100kWp, di dimensioni 1660x990x50
- l'energia producibile dall'impianto sarà di 132000Kwh più uno storage da 30Kwh
- Il guadagno annuale netto sarà di €21.561,18

Grazie a questi dati ho stimato il tempo di recupero dell'investimento che sarà possibile avere in circa 4 anni.

Alla luce dei valori ottenuti, suggerisco alla Tralfo di realizzare l'impianto fotovoltaico con l'ausilio di uno storage, come emerge dai calcoli effettuati nell'elaborato, è più conveniente rispetto ad al primo caso e si recupera in tempi brevi. Inoltre, è una tecnologia innovativa che sta prendendo molto campo e può rendere l'immagine dell'azienda più affidabile e all'avanguardia. E' altresì un investimento sicuro, dati i pochi componenti elettro-meccanici presenti nell'impianto e data la fonte di energia che non dovrebbe esaurirsi prima di 5 miliardi di anni. Inoltre ricorrere a energie alternative e rinnovabili significa ridurre la dipendenza economica nei confronti dei combustibili fossili con conseguente miglioramento della vivibilità e della sostenibilità ambientale.

Bibliografia

Appunti del corso di Fisica Tecnica tenuto dal prof Corvaro F.

Groppi F., Zuccaro C., Impianti solari fotovoltaici a norme CEI, editoriale delfino, 2005

Rota S., Elettricità dal Sole “Guida all’impiego, nei piccoli impianti, dei pannelli fotovoltaici e generatori eolici”, Sandit libri, 2005

A. Tognoni, “Pannelli fotovoltaici: tecnologie e sistemi di puntamento” Università degli studi di Pisa, a.a. 2005/2006.

Ringraziamenti

Merito importante per la stesura di questa tesi è da rivolgere al professor Francesco Corvaro che non mi ha mai fatto mancare il suo supporto durante questi mesi. A lui va anche il merito per avermi fatto appassionare al mondo del solare fotovoltaico e tutto quello che circonda questa fonte rinnovabile. Ringrazio i miei genitori per non avermi mai fatto mancare nulla durante il percorso di triennale, prima o poi tutte le ansie e le preoccupazioni che vi ho gentilmente donato dovevano essere ripagate. Un grazie speciale a Lorenzo, la persona che più di tutte è stata capace di capirmi e di sostenermi nei momenti difficili, a cui sono incredibilmente grata per la vicinanza e il supporto sia durante le faticose sessioni d'esame invernali ed estive così come nella vita di tutti i giorni. Al mio piccolo ma grande fratello, che nonostante sia il mio "fratellino" è un grande uomo. Sempre pronto ad ascoltarmi e a darmi consigli. Ogni volta che ho bisogno di lui, nonostante i chilometri che ci separano, è sempre presente. A Ilaria, l'amica che non potrei mai smettere di amare, la mina vagante a cui devo la maggior parte delle mie risate in questi anni. Voglio rivolgere un pensiero di ringraziamento anche a Celeste e Arianna: che hanno condiviso con me gioie e dolori, hanno sempre saputo avere una parola di riguardo ed incoraggiamento e per questo rimangono con affetto nel mio cuore. Voglio ricordare tutti i miei amici e parenti, chi ancora qui con me a supportarmi tutti i giorni e chi da lassù a vegliare su di me. Vi ringrazio di cuore per esserci stati sempre. Per ultimo ma non meno importante, non dimentico anche gli aiuti di tutti i componenti dell'azienda Tralfo per avermi supportato e fornito tutti i dati necessari per la stesura di questo elaborato. A loro vanno i miei più sentiti ringraziamenti.