

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**TECNOLOGIE ELETTROTERMICHE PER IL
RICICLO DI MODULI FOTOVOLTAICI IN c-Si**

RELATORE: CH.MO PROF. DUGHIERO FABRIZIO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA

CORRELATORE: ING. DONI ANGELO
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA

LAUREANDO: POZZA STEFANO

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

SOMMARIO.....	V
INTRODUZIONE.....	V
1 QUESTIONE AMBIENTALE.....	1
1.1.1 RISPARMIO ENERGETICO	1
1.1.2 MIGLIORE SFRUTTAMENTO DELLE RISORSE DISPONIBILI	2
1.2 IL PROTOCOLLO DI KYOTO	3
1.2.1 INTRODUZIONE.....	3
1.2.2 PRECEDENTI	3
1.2.3 IL PROTOCOLLO DI KYOTO.....	4
1.2.4 OGGETTO DEL PROTOCOLLO	6
1.2.5 PRODUZIONE DI ENERGIE DA FONTI RINNOVABILI.....	6
1.3 IL PACCHETTO CLIMA- ENERGIA 20/20/20 UE.....	7
2 PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI.....	9
2.1 ESEMPI DI SFRUTTAMENTO DI ENERGIE RINNOVABILI.....	10
2.1.1 IDROELETTRICA (di vario tipo: a serbatoio, ad acqua fluente, a marea).....	10
2.1.2 EOLICA (onshore ed offshore).....	11
2.1.3 FOTOVOLTAICO (classico ed a concentrazione)	12
2.1.4 SOLARE TERMODINAMICO	13
2.1.5 GEOTERMICO.....	14
2.1.6 BIOMASSA	15
2.2 PROBLEMATICHE DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI.....	16
2.3 I NUMERI DELL'ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI.....	16
2.3.1 LA SITUAZIONE ITALIANA	16
2.3.2 LA SITUAZIONE EUROPEA.....	19
2.3.3 LA SITUAZIONE MONDIALE.....	20
3 INTEGRAZIONE DEL PROCESSO “VERDE”	23
3.1 IL PROCESSO “VERDE”	23
3.1.1 REALIZZAZIONE ED INSTALLAZIONE.....	23
3.1.2 NORMALE FUNZIONAMENTO.....	24
3.1.3 DISMISSIONE.....	24
3.2 NORMATIVA VIGENTE.....	25
3.3 SITUAZIONE ATTUALE: ENTI ATTIVI IN MERITO	27
3.4 SITUAZIONE ATTUALE: TECNOLOGIE ESISTENTI	29
3.4.1 METODO SOLARWORLD PER MODULI IN SILICIO CRISTALLINO.....	29
3.4.2 METODO FIRSTSOLAR PER MODULI IN FILM SOTTILE	30
3.5 SVILUPPI FUTURI PER IL RICICLO	31
4 CONVERSIONE FOTOVOLTAICA.....	33
4.1 EFFETTO FOTOVOLTAICO	33
5 IL MODULO FOTOVOLTAICO.....	37
5.1 IL MODULO CRISTALLINO.....	38

5.1.1	SILICIO MONOCRISTALLINO	38
5.1.2	SILICIO POLICRISTALLINO (O MULTICRISTALLINO).....	39
5.2	IL MODULO IN FILM SOTTILE	40
6	IL MODULO CRISTALLINO	43
6.1	MATERIALI IMPIEGATI.....	44
6.1.1	VETRO	44
6.1.2	ALLUMINIO	45
6.1.3	SILICIO	45
6.1.4	ARGENTO.....	46
6.1.5	INCAPSULANTE (EVA).....	46
6.1.6	MULTISTRATO TERMOPLASTICO (di vario tipo).....	46
6.1.7	POLIMERI VARI (Junction box)	47
6.2	DIMENSIONI E SPESSORI.....	47
6.3	ASSEMBLAGGIO DEI MODULI CRISTALLINI.....	48
7	RISCALDAMENTO PER PERDITE DIELETTRICHE.....	49
7.1	POTENZA TRASFERITA.....	49
8	LAMINAZIONE PER RADIOFREQUENZA	51
9	MATERIALI DI INTERESSE PER LA LAMINAZIONE A RADIOFREQUENZA	53
9.1	CARATTERISTICHE FISICHE ED ELETTRICHE	53
9.1.1	INCAPSULANTE (EVA).....	54
9.1.2	BACKSHEET (MUTLISTRATO VARI).....	54
9.2	REPERIMENTO CARATTERISTICHE VOLUTE	56
9.2.1	RICHIESTA AI PRODUTTORI.....	57
9.2.2	DETERMINAZIONE SPERIMENTALE.....	57
9.3	VALORI IMPIEGATI.....	58
10	DELAMINAZIONE PER RADIOFREQUENZA	59
10.1	APPLICAZIONE DI UN CAMPO ELETTRICO AD ALTA FREQUENZA	60
10.1.1	TENSIONE.....	61
10.1.2	FREQUENZA.....	61
10.2	APPLICAZIONE DI UN'ADEGUATA PRESSIONE TRA ELETTRIDI E MODULO FOTOVOLTAICO.....	62
10.2.1	COMPONENTI DEL PROCESSO DI RICICLO	62
11	SIMULAZIONI A PC.....	65
11.1	SCHEMA DI PRINCIPIO.....	66
11.1.1	DEFINIZIONE DELLA GEOMETRIA "GEOMETRY"	67
11.1.2	MESHING DEL DOMINIO DI CALCOLO "MESHING"	68
11.1.3	DEFINIZIONE DEL PROBLEMA "APPLICATION"	70
11.1.4	DEFINIZIONE DELLE PROPRIETÀ FISICHE "PHYSICS"	71
11.1.5	RISOLUZIONE DEL PROBLEMA "SOLVING PROCESS".....	73
11.1.6	POST-PROCESSING E VALUTAZIONE DEI RISULTATI "RESULTS".....	75
11.2	CONSIDERAZIONI SULLE SIMULAZIONI ALL'ELABORATORE.....	79

12	PROVE SPERIMENTALI.....	81
12.1	STUDIO DEL GENERATORE AD ALTA FREQUENZA	81
12.1.1	GENERATORE AD ALTA FREQUENZA QINTO 3013M.....	82
12.1.2	CAVO COASSIALE DI INTERCONNESSIONE RG 214	86
12.1.3	DOPPIO CAVO IN FIBRA OTTICA	86
12.1.4	ADATTATORE DI CARICO PFM 3000 A.....	87
12.2	DISEGNO PRELIMINARE DEL CONDENSATORE DI LAVORO.....	90
13	PROVE SPERIMENTALI IN DIVERSE CONFIGURAZIONI OPERATIVE.....	93
13.1.1	RISCALDAMENTO DI UN SOLO FOGLIO DI BACKSHEET	94
13.1.2	RISCALDAMENTO DI UN SOLO FOGLIO DI INCAPSULANTE, “EVA”	95
13.1.3	RISCALDAMENTO DI UNA PORZIONE DI MODULO COINCIDENTE CON LE DIMENSIONI DI UNA CELLA FOTOVOLTAICA.....	96
13.1.4	RISCALDAMENTO DI UNA PORZIONE DI MODULO COINCIDENTE CON LE DIMENSIONI DI QUATTRO CELLE.....	97
13.1.5	RISCALDAMENTO DI UN INTERO MODULO FOTOVOLTAICO	98
14	CONCLUSIONI.....	99
15	BIBLIOGRAFIA.....	101
16	RINGRAZIAMENTI	103

SOMMARIO

L'esplosione del mercato fotovoltaico in Europa e pure in Italia dell'ultima decina di anni ha comportato l'installazione di milioni di moduli fotovoltaici su ogni metro quadrato esposto al sole, dai tetti delle abitazioni alle coperture dei capannoni per finire con gli impianti a terra sui campi coltivati fino a poco tempo fa.

Facendo riferimento ad una vita media stimata per tali dispositivi che si aggira tra i venti ed i trent'anni, almeno stando a quanto affermano i costruttori, si capisce chiaramente che tra una decina d'anni ci si troverà a dover fare i conti con un volume di moduli da dismettere non indifferente.

Le attuali tecnologie esistenti per il riciclo dei moduli fotovoltaici, pur consentendo il riciclo di un'elevata percentuale dei materiali presenti, sono affette da problemi legati all'economicità dei processi ed in parte alla produzione di gas tossico-nocivi.

Ciò che si è cercato di verificare nell'ambito di questa tesi è la possibilità di attivare una metodologia per il disassemblaggio dei moduli fotovoltaici che non comporti la formazione di gas tossico nocivi unitamente ad un processo rapido che consenta quindi al contempo di limitarne i costi.

La possibilità di riscaldare gli elementi polimerici presenti nel modulo, mediante riscaldamento per perdite dielettriche come avviene già in fase di laminazione dei moduli stessi, lascia ben sperare circa la possibilità di industrializzare tale metodologia ottenendo al contempo il riciclo di una percentuale maggiore dei materiali impiegati.

INTRODUZIONE

La richiesta di energia, compresa quella elettrica, va di pari passo con lo sviluppo socio-economico della popolazione, in passato gli Stati occidentali si sono affidati essenzialmente all'energia ricavata da combustibili fossili con le conseguenze a livello ambientale che tutti conosciamo.

La crescita che stanno avendo e che avranno ancor più in futuro i Paesi in Via di Sviluppo (PVS) comporta e comporterà la necessità di produrre ancor più energia di quanta se ne produca oggi, non volendo però aggravare le condizioni del nostro pianeta occorre trovare fonti energetiche meno inquinanti.

Una via imboccata ormai da tempo a livello globale ed in maniera ancor più accentuata dall'Unione Europea sta nello sfruttamento delle cosiddette " energie rinnovabili " che non comportano, almeno direttamente, emissioni di gas inquinanti.

Tra le fonti energetiche rinnovabili maggiormente sfruttate negli ultimi anni, in ragione dell'abbondanza della quale gode, vi è l'energia solare ovvero la conversione dell'energia con la quale viene irradiata la Terra in energia elettrica o termica.

Inutile evidenziare l'enorme proliferazione dell'installazione di moduli fotovoltaici sui tetti delle abitazioni, sulle coperture dei capannoni, a terra nei campi agricoli, il tutto agevolato da incentivazioni statali che hanno premiato in maniera massiccia tale tecnologia.

Il mercato degli impianti fotovoltaici è quindi stato aiutato nel fare emergere questa tecnologia ed è forse stato pure un po' viziato per quanto riguarda i reali costi dei relativi prodotti, siano essi celle, moduli o inverter, in ragione del fatto che ogni soggetto della filiera voleva e vuole beneficiare della generosità dello Stato, almeno per quanto riguarda l'Italia.

La prova ne è il fatto che i produttori stranieri, essenzialmente del sud-est asiatico riescono a contenere i costi di produzione, agendo sulla manodopera ma forse non solo, riuscendo ad offrire componenti a prezzi competitivi sebbene a volte dalla qualità non proprio eccellente.

La tecnologia fotovoltaica sino ad oggi non si è trovata a fare i conti con il fine vita dei moduli installati vista la giovane età di tale tecnologia ma si troverà ad affrontare in maniera pesante tale problema tra circa una decina d'anni quando inizieranno ad essere sostituiti i moduli installati ormai più di dieci anni fa.

Attualmente i volumi dei moduli da riciclare sono esigui, si pensi che essenzialmente fino agli anni '90 i soli impianti fotovoltaici installati erano di enti sperimentali quali l'ENEL o l'ENEA, con modesta capacità installata quindi e numero di moduli molto contenuto.

Bisogna aspettare il primo conto energia (2005-2007) per iniziare a parlare di una crescita esponenziale dei moduli fotovoltaici installati ed in ragione di ciò si può affermare che i volumi di moduli fotovoltaici da dismettere inizieranno ad essere consistenti non prima del 2020-2025, essendo tra l'altro pessimisti sulla vita stimata dei moduli stessi.

Gli attori del mercato legato al fotovoltaico si sono quindi finora occupati solamente della fase iniziale del ciclo di vita dei moduli ed in ragione di ciò non si può certo dire che non siano riusciti ad abbattere i costi di produzione visto che i moduli fino ad una decina d'anni fa avevano costi proibitivi mentre oggi sono molto più abbordabili.

A dire il vero vi sono già alcuni grossi produttori che hanno iniziato a pensare al riciclo dei loro stessi prodotti, soprattutto per poter reimpiegare gli scarti di produzione inevitabili, ma le tecnologie finora messe a punto non consentono un riciclo efficiente e con costi contenuti.

Il lavoro di tesi è stato incentrato su una rapida analisi delle tecnologie oggi impiegate e sulla valutazione della possibile applicazione di un processo elettrotermico oggi impiegato in molti settori produttivi ma non in questo: il **Riscaldamento per Perdite Dielettriche**.

Tale processo di riscaldamento è impiegato in molte applicazioni industriali che richiedono tempi rapidi e riscaldamento localizzato di materiali dielettrici per consentire lavorazioni che altrimenti sarebbero difficilmente eseguibili per altra via: incollaggio, essiccazione, riscaldamento rapidi.

L'idea che sta alla base di questo lavoro di tesi è che nel modulo sono presenti materiali dielettrici, se si riesce a riscaldare questi e portarli a temperatura adeguata, alla temperatura di rammollimento nella fattispecie, allora forse è possibile disassemblare il modulo senza ricorrere all'incenerimento dei polimeri come viene fatto invece oggi, almeno per i moduli in silicio cristallino.

Operativamente si è ricercato materiale inerente il settore del fotovoltaico dapprima in generale per poi scendere nel dettaglio dei materiali specifici impiegati, delle tecnologie oggi utilizzate, delle normative europee in fatto di dismissione e riciclo dei moduli stessi.

Si è proseguito quindi con simulazioni all'elaboratore elettronico mediante l'impiego di software dedicato alle applicazioni elettrotermiche per verificare la fattibilità teorica del processo una volta considerati i parametri e le dimensioni dei moduli fotovoltaici e dei materiali impiegati nello specifico.

Appurato che in linea teorica il processo risultava fattibile si è quindi concluso il lavoro procedendo con qualche verifica sperimentale di quanto simulato al computer ovvero disponendo un sistema di riscaldamento, per perdite dielettriche, in scala e valutando la correttezza e lo scostamento da quanto precedentemente simulato.

I capitoli che seguono introducono dapprima il problema della produzione di energia, anche quella elettrica, e le conseguenze negative che ne possono derivare al pianeta, quindi sono state analizzate in maniera rapida alcune delle fonti energetiche rinnovabili che non comportano, almeno direttamente, emissioni di gas ad effetto serra né inquinamento di altro genere.

L'attenzione viene quindi posta sul fatto che pur essendo considerate tali tecnologie come "verdi", in realtà comportano emissioni inquinanti più o meno pesanti soffermandosi sulla tecnologia fotovoltaica, analizzata in questa tesi se non altro per quanto riguarda i moduli cristallini.

Brevi cenni sulla conversione fotovoltaica consentono a questo punto di addentrarsi nello specifico dei moduli fotovoltaici ed in particolare nei moduli in silicio cristallino, la maggior parte dei moduli prodotti fino ad ora ed attualmente in produzione analizzando i materiali impiegati e le dimensioni caratteristiche per quanto riguarda il processo di riscaldamento per perdite dielettriche.

Un'analisi, anche in questo caso rapida, del procedimento di riscaldamento per perdite dielettriche fornisce a questo punto le conoscenze necessarie per una valutazione preventiva dell'applicabilità di tale tecnologia al caso specifico andando in seguito ad introdurre il procedimento di laminazione per perdite dielettriche oggi impiegato e brevettato.

Una volta noto il processo di laminazione per perdite dielettriche viene quindi introdotta la possibilità di de-laminare il modulo con la medesima tecnologia, adottando gli accorgimenti più opportuni, definiti in sede di simulazione con il software applicativo per applicazioni elettrotermiche Cedrat® Flux®10.4.2.

Subito dopo le simulazioni al computer vengono introdotte le prove sperimentali eseguite e da eseguire prima di poter affermare che tale procedura è realmente efficiente ed applicabile mediante un confronto inevitabile tra le simulazioni effettuate ed i risultati ottenuti al fine di validare o meno il procedimento di simulazione adottato.

Bisogna altresì ribadire che le prove sperimentali effettuate hanno sì lo scopo di confermare e/o smentire le simulazioni effettuate al computer ma in questa sede di valutazione preventiva della fattibilità tecnica del processo fanno solamente da cappello al lavoro di ricerca e studio eseguito a monte, lungi quindi dal dare un giudizio tecnico-critico sul processo fisicamente eseguito.

Le conclusioni, a fine elaborato, mirano infine a dare un giudizio sul lavoro effettuato, ad analizzare criticamente la possibilità di industrializzare tale procedimento contribuendo a rendere un po' più "verde" il settore fotovoltaico cristallino.

1 QUESTIONE AMBIENTALE

Ogni essere vivente sul globo terrestre ha dei bisogni primari da soddisfare per sopravvivere e proliferare, sia esso vegetale o animale e tra gli animali gli esseri umani non fanno eccezione alcuna. Gli esseri umani inoltre non si sono accontentati di soddisfare i loro bisogni primari ma hanno invece sempre cercato di migliorare la loro condizione di vita in modo tale da riuscire ad avere un'esistenza migliore, andando a creare essi stessi dei bisogni secondari.

L'unione dei bisogni primari e dei bisogni secondari genera un insieme di condizioni da soddisfare che richiedono fondamentalmente energia, la quale può essere impiegata in agricoltura per cercare di soddisfare alcuni dei bisogni primari o in un cellulare o altro apparato tecnologico nel tentativo di soddisfare i nostri sempre maggiori bisogni secondari.

Le forme energetiche sfruttate dall'uomo dal passato ad oggi sono molto cambiate inevitabilmente; se infatti in principio l'energia sfruttata derivava unicamente dalla forza muscolare (umana ed animale), in seguito queste sono andate scomparendo per lasciare il posto ad altre forme quali l'energia termica, idraulica, meccanica, chimica per culminare nella fonte energetica dinamica per eccellenza ovvero l'energia elettrica.

Oltre ad essere cambiate, nel corso dei secoli, le forme energetiche sfruttate dall'uomo nella ricerca di soddisfare i propri bisogni, è cambiata pure la quantità di energia necessaria a soddisfare tali bisogni e per una semplice equazione se aumentano i bisogni aumenta pure la quantità di energia necessaria.

Bisogna certo dire che ogni processo, industriale e non, col tempo viene inevitabilmente migliorato ed in genere subisce un miglioramento anche dal punto di vista dell'energia richiesta con una riduzione progressiva man mano che si migliorano tutti i vari procedimenti intermedi.

Questo risparmio in termini energetici dovuto a processi e procedimenti ormai standardizzati non va ad incidere comunque sulla generale tendenza ad aumentare della domanda di energia visto che si creano ogni giorno nuovi bisogni in ognuno di noi e siamo sempre di più in questo ormai piccolo pianeta.

Varcata la soglia dei sette miliardi di persone con consumi energetici totali mai raggiunti in precedenza sulla faccia della Terra, ci si è resi conto che non è possibile assicurare, come invece ci si vorrebbe auspicare, un tenore di vita a tutti gli esseri umani presenti, pari a quello dei Paesi occidentali.

Si è infatti cominciato a rivedere da qualche anno il modello di sviluppo, perseguito finora essenzialmente dal mondo occidentale in prospettiva di uno sviluppo, già galoppante, dei Paesi orientali al fine di non portare al collasso dell'intero pianeta.

I consumi energetici propri dei Paesi occidentali non possono essere copiati dai Paesi emergenti in quanto materialmente non sostenibile dal pianeta stesso, non vi sono al momento fonti energetiche che possano permettere di fare ciò.

Per combattere questa battaglia, nella quale vi è un tetto al consumo energetico globale, vi sono essenzialmente due strade percorribili e tutti i maggiori studiosi in materia indicano che bisogna perseguirle entrambe tentando di cercare un connubio vincente per l'intera umanità:

- Risparmio energetico;
- Migliore sfruttamento energetico delle risorse oggi disponibili.

A dire il vero vi è pure una terza strada da percorrere inevitabilmente che è quella della ricerca di nuove fonti energetiche e benché questa sia la più auspicabile, visto che potrebbe portare ad un migliore livello di vita per tutti, è di fatto la più difficile da seguire e quella che darà risultati in un futuro prossimo, di sicuro non a breve.

Per quanto riguarda la ricerca sullo sfruttamento di nuove fonti energetiche sono in atto oggi molti progetti che spaziano a tutto campo, dalla fusione nucleare all'energia geotermica all'energia solare catturata fuori dall'atmosfera; purtroppo però nessuna di queste al momento può rispondere ai problemi energetici globali

1.1.1 RISPARMIO ENERGETICO

Il primo passo che si può fare e che ciascuno di noi deve ovviamente compiere è quello di rivedere i propri stili di vita con la consapevolezza che non è più permesso sprecare energia visto che se economicamente oggi ciò non viene ad incidere molto, in futuro si potrebbero avere conseguenze molto pesanti non solo dal punto di vista economico ma anche dal punto di vista ecologico.

Anche in questo campo sono poste in essere moltissime attività a livello nazionale, comunitario ed internazionale e per risparmio energetico si intende il significato più generale del termine, senza scendere nello specifico del risparmio di energia elettrica.

Di per sé già il mercato impone una ricerca automatica del risparmio energetico visto che a parità di prodotto finale avrà un prezzo minore un oggetto prodotto con minore dispendio energetico e quindi si crea un meccanismo automatico di concorrenza che si riflette pure nella ricerca del risparmio energetico.

Tutto ciò avviene però finché gli investimenti in ricerca, in generale e quindi anche verso il risparmio energetico, vengono ricompensati dal mercato ovvero i produttori non vanno ad investire dove tale sforzo non sarà premiato dal profitto ed è proprio in questo ambito che entrano invece in gioco le regolamentazioni atte ad incrementare il risparmio energetico.

Ai vari livelli, nazionale, comunitario ed internazionale, come detto, entrano quindi in gioco diverse forme di stimolo e di incentivazione al risparmio energetico, volontario e obbligato, dagli ecoincentivi alle imposizioni di legge.

Se non è molto agevole verificare il risparmio energetico introdotto ad esempio nei nuovi elettrodomestici rispetto a quelli di solo qualche anno fa, visto che bisognerebbe andare a leggere la targhetta, più semplice è rendersi conto dell'eliminazione delle lampadine ad incandescenza, troppo poco prestanti rispetto a quelle fluorescenti compatte o a led di nuova concezione.

1.1.2 MIGLIORE SFRUTTAMENTO DELLE RISORSE DISPONIBILI

Come per il risparmio energetico anche lo sfruttamento delle risorse energetiche oggi disponibili deve seguire la medesima strada alla ricerca del miglioramento continuo, sia esso automatico come quello introdotto ancora una volta dal mercato, sia esso imposto da norme e leggi.

In quest'ottica si dovrà quindi cercare di apportare tutti gli accorgimenti possibili in sede di conversione energetica al fine di limitare le perdite e migliorare quindi il rendimento del processo e si dovrà d'altra parte cercare di sfruttare tutte le fonti energetiche oggi disponibili.

Bisogna inoltre fare in modo che queste siano sfruttate razionalmente anche se tale criterio a volte viene meno di fronte ad esigenze di mercato che impongono magari di sfruttare quelle più economiche ma tecnicamente non vantaggiose.

Tra le fonti energetiche oggi impiegate dall'uomo se ne possono distinguere due macro categorie, quelle che comportano l'emissione di gas dannosi o ad effetto serra, essenzialmente anidride carbonica (o biossido di carbonio, CO_2) e quelle invece che non presentano questo inconveniente:

- Fonti energetiche con emissioni di gas inquinanti;
- Fonti energetiche senza emissioni di gas inquinanti.

Ovviamente la suddivisione precedente fa riferimento ad emissioni direttamente connesse al processo impiegato per la conversione energetica, non a tutta la filiera a monte o a valle di essa come possono essere le emissioni legate a trasporti da e per la centrale elettrica.

Nella prima categoria rientrano tutte quelle conversioni energetiche che comportano la combustione di tipi vari di combustibili quali carbone, petrolio, gas, tutti combustibili fossili provenienti da giacimenti che naturalmente hanno una disponibilità limitata alla quantità di materiale contenuto nei giacimenti.

Nella seconda categoria invece vi confluiscono essenzialmente due tipologie di fonti energetiche, la prima è quella legata alle reazioni atomiche, che sfruttano quindi elementi presenti in natura (essenzialmente Uranio nelle applicazioni odierne) ma che non comportano l'emissione di gas inquinanti, almeno direttamente nel processo di conversione energetica.

La seconda tipologia di fonti energetiche rientrante nella categoria delle fonti senza emissioni di gas inquinanti riguarda invece tutte quelle risorse disponibili in natura in quantità pressoché illimitata e che non sono legate quindi a giacimenti ma bensì a fenomeni naturali quali possono essere la radiazione solare, il vento, il moto dell'acqua, il calore del terreno ed altre ancora.

Si vede quindi che a seconda del processo di conversione energetica impiegato si possono avere e non (e pure in quantità differenti), emissioni di gas inquinanti o ad effetto serra, primo tra tutti, come già anticipato, il biossido di carbonio (CO₂).

Quella delle emissioni di gas ad effetto serra è una questione molto ampia e complessa, trattata e dibattuta in tutte le sedi istituzionali a partire da quelle locali per finire a quelle internazionali e culminare con l'organismo apposito designato all'interno dell'Organizzazione delle Nazioni Unite.

A livello sovranazionale, visto che poi i provvedimenti nazionali non sono nient'altro che un recepimento dei provvedimenti decisi tra nazioni, si possono ricordare essenzialmente due forme di legiferazione riguardanti il problema delle emissioni di gas ad effetto serra.

Questi due provvedimenti sono:

- IL PROTOCOLLO DI KYOTO DELL'ONU;
- IL PACCHETTO CLIMA-ENERGIA 20/20/20 UE;

il primo dei quali è un provvedimento dell'Organizzazione delle Nazioni Unite, applicato seppure in modo diverso dagli Stati che vi hanno aderito e che l'hanno ratificato o meno mentre il secondo è un sistema di accordi e direttive comunitarie riguardanti quindi le Nazioni dell'Unione Europea ed anche in questo caso si hanno obblighi diversi per le varie Nazioni a seconda di diversi parametri.

1.2 IL PROTOCOLLO DI KYOTO

Viene chiamato in questa maniera, un po' informale, ciò che invece è un accordo ufficiale sancito tra quasi tutti gli Stati aderenti all'ONU riguardante la riduzione delle emissioni inquinanti da parte dei Paesi Sviluppati mentre ai Paesi in Via di Sviluppo viene lasciata la priorità di combattere problemi ben più gravi quali la lotta alla fame e alle guerre.

1.2.1 INTRODUZIONE

Bisogna premettere il fatto che l'adesione o meno al protocollo di Kyoto era ed è rimasta facoltativa ed è pure vero che alcune grosse aree sviluppate o in via di sviluppo (USA, RUSSIA ,CINA, INDIA) vi hanno aderito per poi applicare solamente in parte i progetti previsti o addirittura si sono ritirati dall'adesione.

Premessi quindi alcuni punti deboli del tanto acclamato protocollo contro i cambiamenti climatici indotti dall'attività umana, resta il merito di aver creato uno scomodo precedente che potrà avere ripercussioni anche in futuro in ambito politico internazionale.

Presupposto il fatto che i cambiamenti climatici degli ultimi 150 – 200 anni si possono imputare per una parte non trascurabile alle attività antropiche (dovute ad opera dell'uomo) e considerato che una riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra non può avere altro che effetti benefici, si è deciso di sottoscrivere, nel 1997, un protocollo di intesa per cercare di adottare un'azione comune che perseguisse tale fine.

1.2.2 PRECEDENTI

Punto dal quale bisogna partire per comprendere la ratifica di un protocollo ambientale internazionale com'è stato quello di Kyoto (1997) è la **Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici** (in inglese **United Nations Framework Convention on Climate Change** da cui la sigla **UNFCCC**) il quale è un trattato ambientale internazionale prodotto dalla **Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite** (in inglese **United Nations Conference on Environment and Development** da cui **UNCED**) tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992.

Nato come trattato non vincolante ovvero non imponendo limiti obbligatori alle singole nazioni, esso introduceva invece previsioni di aggiornamento che avrebbero invece posto dei limiti obbligatori, i cosiddetti "Protocolli" dei quali il più importante e famoso è appunto il **Protocollo di Kyoto** (1997). Le nazioni aderenti all'UNCED sono state divise tre diverse categorie a seconda del loro livello di sviluppo economico, e del loro apporto in passato alle emissioni di gas ad effetto serra:

- Paesi dell’Annesso I : Paesi Industrializzati;
- Paesi dell’Annesso II : Paesi Industrializzati che pagano per i costi dei Paesi in via di sviluppo;
- Paesi in Via di Sviluppo (PVS).

Le parti aderenti alla Convenzione si sono poi incontrate ogni anno a partire dal 1995 con l’obiettivo di rivedere e migliorare gli obiettivi dettati in prima istanza quasi solamente come una dichiarazione di ottimi intenti ma non obbligatori su alcun piano formale.

La Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici, in seguito indicata col più famoso termine “Protocollo di Kyoto” venne adottato nel 1997 durante la Conferenza tenutasi appunto nella città giapponese di Kyoto ma entrò in vigore solamente il 16 febbraio 2005 a seguito della ratifica anche da parte della Russia.

Le clausole del trattato infatti prevedevano che per l’entrata in vigore vi fosse l’adesione di almeno 55 nazioni e che quelle aderenti producessero almeno il 55% delle emissioni inquinanti, questo avvenne appunto dopo l’adesione della Russia.

Da ricordare è il caso degli Stati Uniti, essi dapprima vi aderirono quando l’allora presidente Bill Clinton confermò l’adesione stanziando con il bilancio del 2001 finanziamenti per ridurre le emissioni dei gas inquinanti del 7% rispetto a quelle del 1990, successivamente invece il nuovo presidente statunitense, George W. Bush, rinviò e rigettò la possibilità d’adesione per vari motivi, probabilmente soprattutto economici.

Attualmente gli Stati Uniti d’America sono l’unica nazione a non aderire al protocollo di Kyoto, cosa singolare ma che ci consente di riflettere sulle possibili cause profonde per una non adesione, prima di tutto l’onere economico del quale occorre farsi carico per limitare le emissioni di gas inquinanti.

Un altro fatto da registrare è come la crisi economica post crollo economico-finanziario del 2008 abbia appesantito ancor di più la situazione a livello finanziario tanto che più di qualche Paese vorrebbe rivedere i punti obiettivo da raggiungere entro la fine del 2012, caso eclatante è l’uscita dal protocollo da parte del Canada avvenuta il 12 dicembre 2011.

Se infatti l’obiettivo per il Canada era una riduzione delle emissioni pari al 6% rispetto a quelle del 1990, la verità è che nel 2009 le emissioni registrate sono state superiori di ben il 17% rispetto all’anno preso come riferimento, fatto sta che il governo canadese invocò i propri diritti legali per una fuoriuscita formale dal trattato internazionale, cosa fortemente osteggiata dall’opinione pubblica un po’ ovunque nel mondo, Italia compresa.

1.2.3 IL PROTOCOLLO DI KYOTO

Alla base di tutto sta l’ipotesi per la quale il riscaldamento del globo terrestre, almeno negli ultimi cento anni, è da imputare in maniera preponderante se non totalmente all’attività antropica, l’uomo infatti a partire dalla rivoluzione industriale ha emesso in atmosfera quantità sempre maggiori di gas ad effetto serra, legati ai vari processi industriali venutisi a sviluppare nel tempo.

I gas ad effetto serra, come evidenziato dallo stesso aggettivo con il quale vengono classificati, producono un effetto paragonabile a quanto avviene in una comune serra, come tutti ormai ben sanno, si può in realtà definire, in base all’effetto che producono, due effetti serra diversi: effetto serra *NATURALE* ed effetto serra *ACCELERATO*.

L’effetto serra *NATURALE* è il “responsabile”, se così lo si vuole chiamare, della stessa possibilità di vita sulla Terra poiché permette di mantenere all’interno dell’atmosfera condizioni climatiche che consentono appunto la vita; esso è dovuto in gran parte al vapore acqueo il quale cattura il calore irradiato dalla terra e lo diffonde in tutte le direzioni.

L’effetto serra *ACCELERATO* invece è quello dovuto all’attività antropica, esso è strettamente correlato quindi con l’attività umana e poiché si è registrato a partire dalla rivoluzione industriale un incremento di temperatura notevole rispetto a tutto il periodo documentabile precedente, si può affermare che tale relazione non sia casuale ma ben documentata.

L’effetto serra accelerato sta portando ad un innalzamento delle temperature, negli ultimi 50–100 anni, non trascurabile; in realtà si tratta di frazioni di un grado centigrado ma queste hanno implicazioni notevoli visto che l’innalzamento della temperatura comporta uno scioglimento delle calotte polari e dei ghiacciai che come effetto portano ad un innalzamento del livello del mare con conseguenze potenzialmente disastrose.

Oltre ad un innalzamento del livello del mare si hanno altri effetti come lo sconvolgimento dei fenomeni atmosferici che si possono registrare negli ultimi anni a seguito di uragani, tempeste

tropicali, monsoni ed alla diffusione di specie animali in aree geografiche dove una volta queste erano assenti come ad esempio squali, meduse e specie marine tropicali nel mar mediterraneo.

I gas ad effetto serra (in seguito per effetto serra si intenderà quello ACCELERATO se non specificato diversamente) si possono riassumere, anche se non sono i soli a causare tale effetto, nella lista seguente, in accordo con il protocollo di Kyoto: [1]

- Biossido di carbonio (anidride carbonica) (CO_2);
- Metano (CH_4);
- Ossido di Azoto (N_2O);
- Idrofluorocarburi (HFC);
- Perfluorocarburi (PFC);
- Esafluoruro di zolfo (SF_6).

L'attore principale dell'effetto serra accelerato è il BIOSSIDO DI CARBONIO (CO_2) chiamato comunemente col nome di ANIDRIDE CARBONICA, esso viene liberato in atmosfera ogni qualvolta si ha a che fare con la combustione di combustibili fossili (carbone, petrolio) poiché dalle reazioni chimiche che si sviluppano si hanno in generale:

- Conversione di energia chimica in termica (che giustifica il processo di combustione);
- Liberazione di vapore acqueo (H_2O);
- Liberazione di anidride carbonica (CO_2);
- Liberazione di altri elementi o composti di varia natura (CO , SO_2 , NO_x , ecc.).

Da recenti studi basati su carotaggi effettuati sui ghiacci della calotta antartica è emerso che i livelli di anidride carbonica in atmosfera sembrano aver subito variazioni massime del 10% durante i 10.000 anni antecedenti la rivoluzione industriale mentre a partire dal XIX secolo le concentrazioni sono aumentate del 30%, quindi verosimilmente in conseguenza della combustione di combustibili fossili, motore dello sviluppo economico e tecnologico di tutti i Paesi Sviluppati.

Il secondo, per ordine di importanza, tra i gas serra è il metano (CH_4) che ha una duplice origine:

- Naturale in conseguenza di processi di fermentazione in assenza di ossigeno come nelle zone umide e negli oceani;
- Umana a seguito delle attività di estrazione mineraria, sfruttamento di combustibili fossili, allevamento di bestiame (le piante fermentando nello stomaco degli animali producono e poi liberano questo gas), coltivazione del riso (essendo di fatto una zona umida artificiale) e dalle discariche (per il consueto fenomeno di fermentazione in assenza di ossigeno).

Vi sono, come è stato elencato poco sopra, numerosi altri gas ad effetto serra e probabilmente ve ne sono numerosi altri gas serra non citati dal documento in questione, si può dire però in linea generale che il loro apporto all'effetto serra è minore e per questo nei documenti ufficiali si fa sempre riferimento a grandezze in CO_2 equivalenti o grandezze in CARBONIO (C) equivalente.

Bisogna tenere ben presente che agli albori di una rivoluzione che sarebbe poi stata decisiva per il futuro dell'intera umanità com'è stata la rivoluzione industriale, non si avevano gli strumenti né si potevano immaginare le conseguenze che si sarebbero pagate perseguendo tale modello di sviluppo.

Oggi che qualche passo in avanti è stato mosso sia per quanto riguarda le conoscenze tecnico-ambientali sia per quanto riguarda i processi tecnologici applicabili in sede di produzione ma anche di cattura e segregazione del monossido di carbonio si possono in parte ripensare i nostri processi tecnologici e, perché no, invitare i Paesi che stanno emergendo in questo momento (India e Cina per citarne due) ad applicare tecnologie più rispettose dell'ambiente, naturalmente con l'aiuto, anche economico, dei Paesi che questo effetto serra accelerato l'hanno di fatto prodotto.

Se in principio infatti non ci si è posti alcun problema a riguardo di ciò che si andava a liberare nell'aria, nel tempo si è cominciato a preoccuparsi soprattutto a seguito di fenomeni mai registrati in precedenza come le piogge acide nel centro Europa, conseguenza dell'attività umana fortemente concentrata in tali aree geografiche.

Una volta quindi dato per assodato il fatto che il surriscaldamento è, almeno in qualche parte, dovuto all'attività umana, si è cercato di definire dei provvedimenti che tentassero di limitare il

surriscaldamento e poiché non è possibile agire, ad oggi, sulle cause naturali, si è almeno cercato di fare qualcosa sulle cause antropiche.

Non è oggetto di questa tesi elencare e dibattere sulle possibili conseguenze di un eccessivo riscaldamento del globo terrestre, è da ricordare tuttavia che una variazione climatica si ripercuote prima o dopo anche sull'uomo, con cambiamenti che possono essere gradualmente come l'innalzamento della temperatura di qualche frazione di grado in decine di anni ma possono anche portare ad effetti ben più pesanti come una riduzione delle precipitazioni o fenomeni atmosferici violenti come possono essere gli uragani o le tempeste tropicali che si stanno diffondendo anche in aree geografiche un tempo non toccate da questi fenomeni.

1.2.4 OGGETTO DEL PROTOCOLLO

Lo scopo del protocollo si può riassumere nei seguenti punti fondamentali [1]:

1. Miglioramento dell'efficacia energetica in settori rilevanti dell'economia nazionale;
2. Protezione e miglioramento dei meccanismi di rimozione e di raccolta dei gas ad effetto serra, non inclusi nel Protocollo di Montreal, tenuto conto degli impegni assunti in virtù degli accordi internazionali ambientali; promozione di metodi sostenibili di gestione forestale, di imboscamento e di rimboscamento;
3. Promozione di forme sostenibili di agricoltura, alla luce delle considerazioni relative ai cambiamenti climatici;
4. Ricerca, promozione, sviluppo e maggiore utilizzazione di forme energetiche rinnovabili, di tecnologie per la cattura e l'isolamento del biossido di carbonio e di tecnologie avanzate ed innovative compatibili con l'ambiente;
5. Riduzione progressiva, o eliminazione graduale, delle imperfezioni del mercato, degli incentivi fiscali, delle esenzioni tributarie e di sussidi, che siano contrari all'obiettivo della Convenzione, in tutti i settori responsabili di emissioni di gas ad effetto serra, ed applicazione di strumenti di mercato;
6. Incoraggiamento di riforme appropriate nei settori pertinenti, al fine di promuovere politiche e misure che limitino o riducano le emissioni dei gas ad effetto serra non inclusi nel Protocollo di Montreal;
7. Adozione di misure volte a limitare e/o ridurre le emissioni di gas ad effetto serra non inclusi nel Protocollo di Montreal nel settore dei trasporti;
8. Limitazione e/o riduzione delle emissioni di metano attraverso il suo recupero ed utilizzazione nel settore della gestione dei rifiuti, come pure nella produzione, il trasporto e la distribuzione di energia;

Fine ultimo del presente protocollo si può quindi rileggere come uno sforzo comune volto ad implementare un modello di sviluppo sostenibile, sia dal punto ecologico che sociale, visti i differenti impegni riservati ai Paesi industrializzati e ritenuti responsabili degli attuali cambiamenti climatici, Paesi industrializzati ma non ritenuti responsabili dei cambiamenti climatici e quindi non tenuti a ridurre le proprie emissioni inquinanti ed infine Paesi in via di sviluppo, nei quali è prioritaria la lotta alla fame e quindi anch'essi non tenuti a ridurre le proprie emissioni.

Bisogna dire che i Paesi che si sono industrializzati praticamente dopo il 1990, come ad esempio India e Cina, ratificanti il Protocollo di Kyoto ma non tenuti a ridurre le proprie emissioni inquinanti in atmosfera possono comunque decidere di applicare tali misure una volta constatata la cessata necessità di combattere la fame e quindi una volta raggiunto una buona qualità di vita all'interno del Paese stesso.

1.2.5 PRODUZIONE DI ENERGIE DA FONTI RINNOVABILI

Come espressamente indicato al punto 4 del precedente elenco, riportato nel testo originale del Protocollo di Kyoto, una delle azioni da perseguire nel tentativo di ridurre le emissioni inquinanti sta nella ricerca, promozione, sviluppo e maggiore utilizzazione di forme energetiche rinnovabili.

Una delle forme energetiche rinnovabili che ha subito uno sviluppo davvero esponenziale è stato ovviamente il *SOLARE FOTOVOLTAICO* anche se non sono da dimenticare numerose altre forme

sviluppate di recente o in fase avanzata di progetto come possono essere ad esempio: solare termico, solare termodinamico, geotermico, eolico, idroelettrico, marino e svariate altre (biomasse, bioetanolo, ecc).

Si può giustificare quindi uno sviluppo così massiccio del solare fotovoltaico proprio nel tentativo di raggiungere gli obiettivi fissati dal Protocollo di Kyoto di riduzione delle emissioni inquinanti andando cioè a diminuire la produzione termoelettrica classica (carbone e petrolio) a favore di quest'altra tecnologia definita "verde" e per fare ciò si è ricorsi al meccanismo degli incentivi statali.

Non è oggetto di questa tesi analizzare e dare un giudizio sul meccanismo degli incentivi statali al fine di promuovere questa tecnologia o questo settore tecnologico a scapito di altri, bisogna solamente rendere il merito di aver creato i presupposti per un rapido sviluppo di una tecnologia che ha visto raggiungere i propri migliori risultati proprio negli ultimi anni.

1.3 IL PACCHETTO CLIMA- ENERGIA 20/20/20 UE

A livello europeo, al fine di mettere in atto ciò che si era firmato nel 1997 a Kyoto, si è provveduto a stendere una serie di direttive comunitarie atte appunto a far raggiungere all'intera Unione Europea gli obiettivi dichiarati di una riduzione delle emissioni inquinanti pari all'8% rispetto a quelle registrate nel 1990.

Non solo, il protocollo di Kyoto prevede impegni fino al 2012, con il pacchetto di direttive emanate dall'Unione Europea si è voluto invece incrementare e continuare con impegni presi unilateralmente, senza l'adesione quindi di Paesi extraeuropei, verso una riduzione progressiva delle emissioni inquinanti.

Forse perché mossi da un senso di responsabilità più forte rispetto ad altre Nazioni, gli Stati membri dell'Unione Europea, negli organi rappresentativi, si sono quindi impegnati più di quanto non abbiano fatto tutte le Nazioni aderenti al Protocollo di Kyoto.

Noto ormai comunemente con il termine di "PACCHETTO CLIMA-ENERGIA 20/20/20" esso è stato in seguito recepito da ciascuno stato facente parte dell'Unione Europea così come avviene usualmente per qualsiasi direttiva comunitaria.

La soglia di riduzione delle emissioni inquinanti fissata nel protocollo di Kyoto per l'Unione Europea in una misura pari all'8 % è stata ripartita in quote assegnate ai vari Stati membri in ragione delle reali emissioni del 1990 ovvero si sono indicati target diversi ai singoli Stati membri.

Gli Stati con emissioni maggiori sono anche obbligati a perseguire riduzioni maggiori delle relative emissioni, viceversa gli Stati con emissioni minori sono gravati da obblighi meno restrittivi ed al limite ad alcuni è concesso di incrementarle per perseguire uno sviluppo dell'economia locale.

L'Italia è stata così destinata a ridurre le proprie emissioni del 6,5%, in luogo dell'8%, mentre altre nazioni ben più inquinanti nel 1990 sono state soggette ad una riduzione ben superiore come ad esempio la Germania che dovrà ridurre entro il 2012 le proprie emissioni del 21% rispetto a quelle emesse nel 1990.

Addirittura alcune nazioni dell'Unione Europea, a fronte del loro basso livello di industrializzazione sempre nell'anno preso come riferimento, si trovano autorizzate ad incrementare le proprie emissioni di valori non trascurabili come avviene per esempio per il Portogallo che è autorizzato ad incrementarle del 27%.

Se per quanto riguarda il Protocollo di Kyoto dunque i valori da raggiungere sono quelli elencati, a livello europeo si è deciso di fare di più, andando ad elevare le limitazioni delle emissioni inquinanti, così come previsto dal pacchetto clima-energia 20/20/20.

Di fatto questo pacchetto clima-energia è una serie di direttive comunitarie che analizzando ed andando a trattare specifiche tematiche riguardanti clima ed energia hanno alla fine portato alla definizione di una serie di obiettivi di carattere climatico ed energetico.

Gli scopi essenziali sanciti nel pacchetto, da raggiungere entro la data ultima del 2020 si possono riassumere nei seguenti:

- Riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra del 20 %;
- Produzione di energia da fonti rinnovabili per una percentuale pari al 20 %;
- Raggiungere un risparmio energetico rispetto alle previsioni sui consumi pari al 20 %;

Il sistema europeo di fatto risulta essere il primo esempio di meccanismo multinazionale di scambio di quote di emissioni ad essere entrato in vigore, tale meccanismo è previsto nel protocollo di Kyoto ma non risulta essere realizzato se non a livello europeo.

Tale meccanismo prevede un limite massimo delle emissioni concesse a ciascuno degli impianti ricadenti nelle categorie previste dal pacchetto, le aziende che sono in grado di contenere le relative emissioni entro il proprio limite possono quindi vendere le quote di emissioni eccedenti, viceversa le aziende che sfiorano i propri limiti possono acquistare titoli per le relative quote necessarie.

Questo mercato delle quote di emissioni di gas inquinanti è risultato di fatto un valido strumento di supporto alle imprese virtuose per la vendita delle relative quote ovvero di aiuto alle imprese in difficoltà nei confronti della limitazione delle relative emissioni grazie all'acquisto delle quote necessarie.

Le principali direttive comunitarie che unitamente formano il pacchetto clima ed energia 20-20-20 sono le seguenti:

- 2001/77/CE sullo sviluppo delle fonti rinnovabili elettriche con obiettivi senza sanzione;
- 2004/8/CE sulla promozione della cogenerazione;
- 2005/32/CE sulla progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia;
- 2006/32/CE sull'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici;
- 2008/98/CE relativa ai rifiuti;
- 2009/29/CE (a modifica della 2003/87/CE) al fine di perfezionare ed estendere il sistema comunitario sullo scambio di quote di emissione di gas a effetto serra.

Al di là delle singole tematiche affrontate in ciascuna di queste direttive comunitarie, il merito è comunque quello di dettare regole, limiti e sanzioni in tematiche precedentemente trattate singolarmente da ciascuno Stato.

In particolare quando si intende che il 20 %, per l'intera Unione Europea, dell'energia prodotta dovrà derivare da fonti rinnovabili si intende l'energia complessivamente prodotta ed in ogni sua forma sia sotto forma di elettricità, di calore o di qualsiasi altra natura.

All'Italia a seguito del pacchetto energia-clima 20/20/20 è stato imposto il limite minimo, da raggiungere entro il 2020, di produzione di energia da fonti rinnovabili pari al 17%, da ripartire essenzialmente tra produzione di energia elettrica, energia termica e trasporti.

Per quanto riguarda inoltre il settore trasporti viene definito un limite ulteriore ovvero entro la solita data del 2020 almeno il 10 % dei consumi di carburante per l'autotrazione dovrà derivare da biocarburanti, di provenienza non fossile quindi.

Tra gli spunti più ottimistici vi è infine la proposta di ratificare in futuro nuovi accordi per tentare di raggiungere traguardi ancora più elevati con una riduzione delle emissioni inquinanti del 30% entro il 2030 rispetto a quelle registrate nel solito 1990 o addirittura del 50% entro il 2050.

Se anche tali traguardi non fossero ratificati e/o raggiunti già la decisione di voler continuare sulla strada dettata dal protocollo di Kyoto può smuovere l'opinione pubblica e politica globale nella speranza che il modello europeo venga imitato, nessuno può infatti affermare che una riduzione delle emissioni inquinanti porti a danni.

2 PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI

Vale la pena di esporre sin da qui una differenza, a volte trascurata nel modo comune di parlare, che riguarda la differenza esistente tra i termini *RINNOVABILE* ed *ALTERNATIVA*, termini che molto spesso vengono usati come sinonimi ma che tali non sono.

Con il termine *RINNOVABILE* infatti si intende generalmente una fonte energetica il cui sfruttamento non ne comporta il relativo esaurimento potendo questa rigenerarsi almeno con la stessa velocità con la quale viene sfruttata ovvero non risulta esauribile nella scala dei tempi umani e si può quindi considerare inesauribile.

Viceversa con il termine di *ALTERNATIVA* si intende una fonte energetica non fossile ovvero diversa dagli idrocarburi o dal carbone come può essere considerata l'energia nucleare classica da fissione che impiega essenzialmente l'Uranio come combustibile nucleare, nel caso di energie alternative quindi non è intrinseca la caratteristica dell'inesauribilità essendo legata a giacimenti minerari finiti.

In definitiva le fonti energetiche rinnovabili sono particolari esempi di fonti alternative non essendo di origine fossile e presentando inoltre la caratteristica di essere inesauribile almeno nella scala dei tempi umani, secondo questa visione la fusione nucleare che sfrutta il Deuterio ed il Trizio potrebbe essere considerata rinnovabile essendo questi elementi disponibili in quantità praticamente infinita in natura.

La produzione di energia elettrica a partire da fonti rinnovabili deve per forza di cose essere un processo eco-compatibile, pena l'assurdo di impiegare fonti energetiche naturali e quindi non inquinanti ma con processi inquinanti, creando quindi un processo incoerente.

Se ciò in linea di principio è lineare e si potrebbe pensare pure semplice, di fatto non è così scontato da realizzare per vari motivi, a partire dal recepimento delle fonti energetiche, all'impiego di materiali non propriamente adatti avendo uno scopo dichiarato di ecologia per concludere con una dismissione degli impianti che deve anch'essa seguire il medesimo principio.

Soffermandoci sulle fonti energetiche cosiddette "rinnovabili" senza scendere, almeno per il momento, nel particolare analizzando tutta la filiera dei processi e dei materiali impiegati si possono delineare alcuni tratti comuni a tutte queste che si possono riassumere in:

- Disponibilità pressoché illimitata della fonte energetica sfruttata;
- Assenza di emissione di inquinanti legati al processo di conversione energetica.

Per disponibilità pressoché illimitata della fonte energetica sfruttata si intende il fatto che l'elemento cedente l'energia agli impianti di conversione riacquista, immediatamente o in seguito, naturalmente la medesima energia direttamente dall'ambiente ovvero ve ne sia una quantità sconsiderata o per tempi estremamente lunghi se paragonati con la vita umana.

Ciò si può vedere chiaramente nell'energia potenziale o cinetica posseduta dall'acqua di un torrente che una volta completato il proprio ciclo idrico ricadrà sotto forma di precipitazione e quindi riassumerà energia potenziale e, nel momento in cui torni in moto, pure energia cinetica.

Viceversa per quantità illimitata di energia ovvero disponibile per tempi estremamente lunghi rispetto alla vita umana si intende ad esempio l'energia ceduta dal Sole alla Terra per mezzo delle radiazioni elettromagnetiche, compreso quindi lo spettro del visibile ovvero della luce che colpisce la superficie terrestre.

Dati i tratti caratterizzanti le fonti energetiche rinnovabili, queste si possono distinguere in base alla fonte energetica primaria ed in base al processo di conversione effettuato, essenzialmente sono:

- Idroelettrica (di vario tipo: a serbatoio, ad acqua fluente, a marea);
- Eolica (onshore ed offshore);
- Fotovoltaico (classico ed a concentrazione);
- Solare termodinamico;
- Geotermico;
- Biomassa.

La produzione di energia, in generale elettrica ma anche di altro tipo come quella termica, va ad interagire con aspetti molto vari del pianeta Terra, da fenomeni esterni ad esso come la radiazione solare, a fenomeni legati alla vita sulla Terra, come l'energia da biomassa, ad agenti atmosferici com'è il vento, ed infine ad energia insita nel pianeta stesso com'è l'energia ricavabile dalla geotermia.

A dire il vero vi è una diatriba aperta per quanto riguarda il considerare l'energia geotermica una fonte energetica rinnovabile in quanto è stato dimostrato che l'energia geotermica ricavabile da un pozzo geotermico può diminuire anche del 30% nel giro di 10 anni, questo tipo di produzione necessita infatti della ricarica del pozzo geotermico stesso re immettendo nel sottosuolo il vapore estratto e conseguentemente condensato.

La produzione di energia elettrica a partire da fonti rinnovabili ha incontrato in passato un'applicazione limitata ai contesti nei quali essa fosse facilmente sfruttabile come avviene ad esempio nel caso degli impianti idroelettrici, sia pur di vario tipo.

Solo recentemente la produzione di energia da fonti rinnovabili ha assunto un aspetto più morale che tecnico nel tentativo di limitare le emissioni inquinanti e diversificare la produzione per non essere così dipendenti dai combustibili fossili come siamo invece oggi.

2.1 ESEMPI DI SFRUTTAMENTO DI ENERGIE RINNOVABILI

Analizzando le varie tipologie di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili si possono riscontrare pregi e difetti di ciascun processo di conversione, ma, mentre per alcuni di questi le tecnologie sono già definite ed ormai standardizzate, per altri processi invece non esistono dati a sufficienza per stabilire quali siano veramente i punti sui quali agire per migliorare tali processi.

2.1.1 IDROELETTRICA (di vario tipo: a serbatoio, ad acqua fluente, a marea)

La produzione di energia elettrica a partire dall'energia potenziale e cinetica posseduta dall'acqua è di sicuro la forma energetica rinnovabile sfruttata per prima dall'uomo, ancor prima di applicare un sistema turbina-alternatore è stata impiegata attraverso mulini idraulici per scopi quali la macinazione delle granaglie o altre applicazioni mediante la conversione in energia meccanica.

Dal punto di vista della produzione di energia elettrica è stata comunque molto sfruttata e ciò avviene ancora oggi in applicazioni sia grandi (idroelettrico classico) che in contesti minori (mini-idroelettrico), in questo secondo caso più grazie ad incentivi economici che non propriamente per la quantità di energia convertita.

Nella figura seguente si può vedere lo schema di principio di un impianto idroelettrico a bacino nel quale un corso d'acqua viene sbarrato da una diga al fine di accumulare una certa quantità d'acqua necessaria al funzionamento stabile dell'impianto.

A partire quindi dall'energia potenziale posseduta da quest'acqua accumulata entro la diga si ha dapprima la conversione in energia cinetica visto che l'acqua viene fatta defluire attraverso la condotta forzata.

Al momento dell'impatto contro le pale della turbina si ha quindi la conversione in energia meccanica ed infine mediante il generatore si ha l'ultima conversione in energia elettrica che verrà quindi immessa in rete [2].

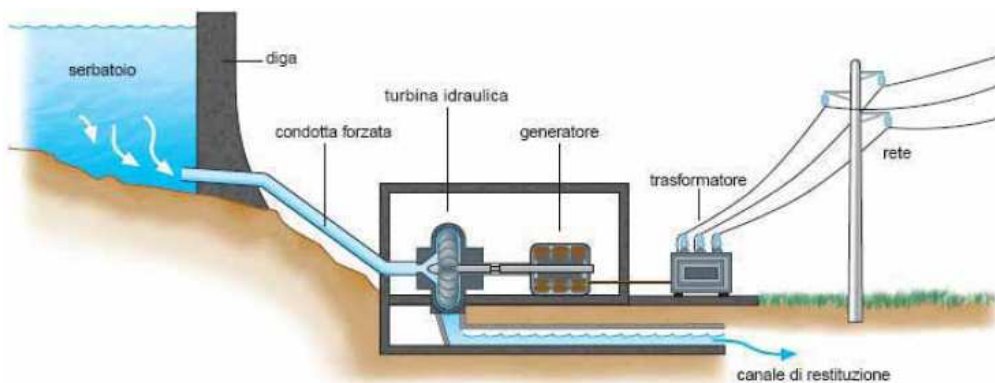


Fig. 2.1 Schema di principio di un impianto idroelettrico a bacino

Oltre al classico impianto idroelettrico a bacino vi sono altri impianti idroelettrici impiegati in contesti leggermente diversi come può essere il corso di un fiume nel quale il salto motore è limitato mentre la portata è notevole.

Diversamente ancora si comportano gli impianti a marea, peraltro poco diffusi, nei quali il salto motore è ancora una volta molto limitato, la portata è invece notevole ma soprattutto il moto si inverte ad ogni cambio di marea.

2.1.2 EOLICA (onshore ed offshore)

Anche questa fonte energetica è stata impiegata fin dall'antichità dall'uomo per vari scopi quali ancora una volta la macinazione di granaglie ed in alcune zone umide per azionare pompe in modo tale da permettere l'agricoltura in zone altrimenti paludose come nei Paesi Bassi.

Recentemente, a partire dagli settanta a seguito della crisi petrolifera, si è riscoperta questa tecnologia dimenticata per molto tempo a fronte di un costo per i combustibili fossili molto limitato ed è tornata in auge, applicata, in questa seconda giovinezza, alla produzione di energia elettrica.

Con le moderne tecnologie produttive si è riusciti poi a migliorare drasticamente il rendimento di queste macchine, limitarne i costi di produzione ed aumentarne la produttività tanto da attirare notevoli investimenti economici verso interi parchi eolici realizzati a terra, detti quindi onshore, ovvero in mare, detti offshore.

Il principio di funzionamento prevede la conversione dell'energia cinetica dell'aria in energia meccanica al contatto con le pale degli aerogeneratori e quindi in energia elettrica in appositi generatori calettati con l'albero motore.

La figura illustra i vari componenti dell'impianto di conversione [2].

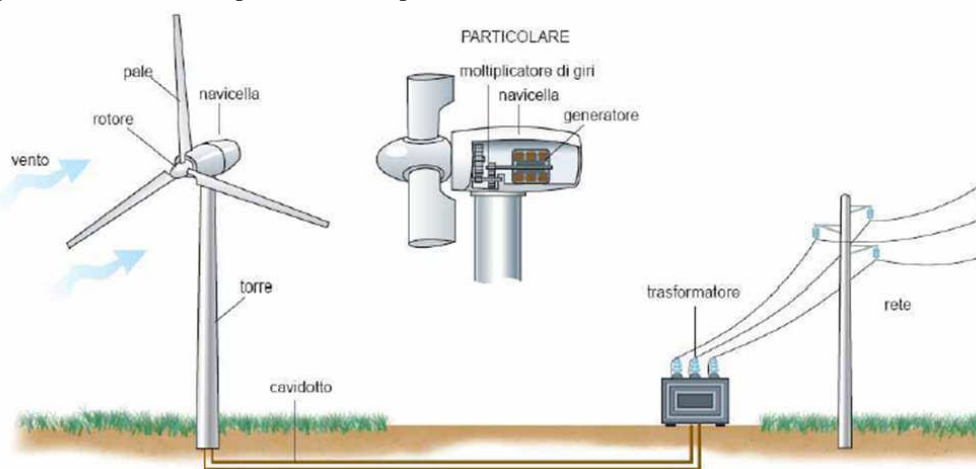


Fig. 2.2 Schema di principio di un impianto eolico

Da notare che mentre si è abituati ad avere a che fare con aerogeneratori ad asse orizzontale, esistono a dire il vero pure generatori ad asse verticale nei quali le pale assumono forme nettamente diverse dai primi, l'immagine seguente ne illustra un esempio [3]:



Fig. 2.3 Aerogeneratore ad asse verticale

Mentre nel caso di aerogeneratori ad asse orizzontale si deve prevedere un adeguato sistema di orientazione delle pale in modo tale che queste riescano a convertire la maggiore quantità possibile di energia, nel caso di aerogeneratore ad asse verticale, questo inconveniente è assente.

In questo caso infatti da qualsiasi direzione provenga il vento, le pale mostrano sempre la medesima superficie di impatto e non sono possibili però d'altra parte modifiche al profilo alare che viene colpito dal vento, come avviene invece con le pale di un generatore ad asse orizzontale.

2.1.3 FOTVOLTAICO (classico ed a concentrazione)

A differenza delle precedenti due tecnologie di conversione energetica, la conversione fotovoltaica è stata scoperta ed è stata perciò impiegata solamente in tempi recenti, a seguito della scoperta dell'effetto fotoelettrico scoperto da Edmond Becquerel (1820-1891) nei suoi studi sulle onde elettromagnetiche.

Non si può quindi dire che tale principio sia stato impiegato in campi diversi dalla conversione in energia elettrica visto che in questo caso non sono presenti conversioni intermedie come nei casi precedenti com'era l'energia meccanica in seguito convertita in elettrica.

La radiazione luminosa colpendo le celle fotovoltaiche riesce a strappare alcuni elettroni dalle orbite più esterne degli atomi degli elementi semiconduttori presenti riuscendo a creare una corrente, continua, che in seguito viene convertita in alternata da un opportuno inverter e quindi viene immessa in rete.

La figura riporta ancora una volta lo schema di principio del sistema di conversione dell'energia posseduta dalla radiazione luminosa in energia elettrica, questa può quindi essere immessa in rete nel caso di impianti connessi ovvero può essere immagazzinata in accumulatori nel caso di impianti ad isola [4].

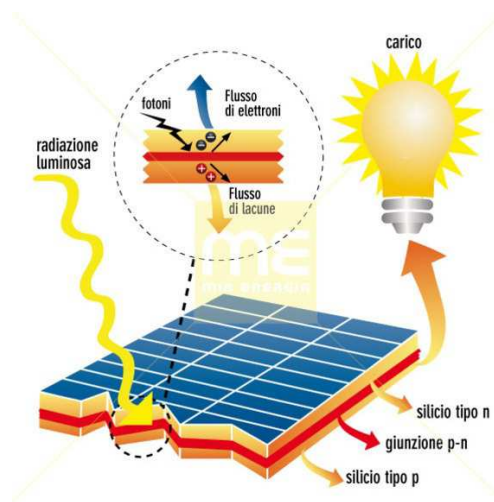


Fig. 2.4 Schema di principio di un impianto fotovoltaico

Il carico, nell'immagine rappresentato con una lampadina, può essere di fatto realizzato da una batteria di accumulatori destinati allo stoccaggio di energia elettrica in forma di energia elettrochimica ovvero può essere realizzato dalla connessione con la rete elettrica per mezzo di un opportuno inverter.

Per fotovoltaico classico si intende la produzione di energia elettrica a partire dalla conversione dell'energia che colpisce direttamente le celle fotovoltaiche esposte direttamente alla luce solare, viceversa per fotovoltaico a conversione si intende il processo di conversione dell'energia ricavata dalla radiazione solare opportunamente trattata e concentrata, mediante appositi specchi, da celle più piccole ma più prestanti.

2.1.4 SOLARE TERMODINAMICO

Questo tipo di conversione dell'energia posseduta dalla radiazione luminosa non sfrutta l'effetto fotovoltaico bensì si basa sulla concentrazione, a mezzo di appositi specchi, della radiazione su di un fuoco delle lenti paraboliche costituenti gli specchi nel quale fuoco è presente un tubo contenente un apposito fluido termovettore.

La radiazione luminosa così concentrata scalda il fluido termovettore portandolo ad elevata temperatura, circa 600 [°C], il quale fluido scambierà il proprio calore in appositi scambiatori per poter così sfruttare il calore per riscaldamento ovvero per far espandere il vapore prodotto a valle degli scambiatori, in apposite turbine a gas.

Per quanto concerne la produzione di energia elettrica si seguirà ovviamente la seconda strada, il calore viene ceduto al vapore il quale si espanderà in apposite turbine a vapore calettate con turboalternatori che provvederanno quindi alla finale conversione in energia elettrica.

A differenza degli impianti fotovoltaici questo tipo di impianto è in grado di funzionare anche in assenza di radiazione luminosa riuscendo a sfruttare il calore immagazzinato dal fluido termovettore che riesce a mantenersi ad elevata temperatura per qualche giorno anche in assenza di esposizione alla luce solare.

La figura illustra ancora una volta il principio di funzionamento di un impianto di produzione di energia elettrica mediante il principio denominato solare termodinamico [5].

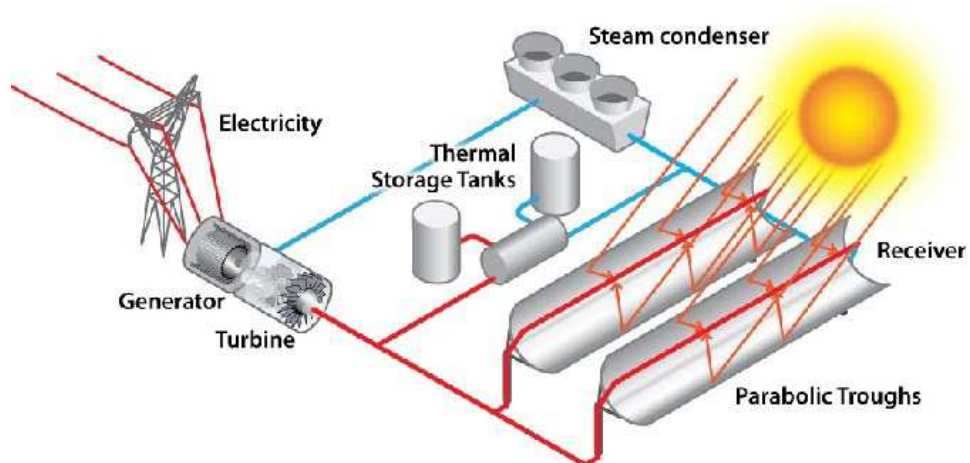


Fig. 2.5 Schema di principio di un impianto termodinamico

Si nota nello schema la presenza di contenitori termicamente isolanti in grado di mantenere il fluido termovettore ad elevata temperatura pur in assenza di radiazione solare potendo così produrre energia elettrica anche di notte, a differenza degli impianti fotovoltaici.

Effettivamente questo tipo di impianti non trova la diffusione di quelli fotovoltaici trattandosi di impianti ben più complessi e conseguentemente economicamente più onerosi da installare, non adatti quindi al singolo utente domestico della rete.

2.1.5 GEOTERMICO

Gli impianti geotermici sfruttano il calore del sottosuolo per riscaldare un fluido termovettore il quale può a sua volta cedere il proprio calore, mediante appositi scambiatori, a circuiti di riscaldamento per ambienti ovvero ad un circuito acqua-vapore convertibile quindi in energia elettrica in turboalternatori.

La localizzazione ideale di questo tipo di impianti è limitata alle aree geografiche interessate da fenomeni di risalita del calore e/o del vapore proveniente dal sottosuolo quindi in prossimità ad esempio delle cosiddette solfatare ovvero in aree vulcaniche.

Cosa da non sottovalutare è la ricarica idrologica del bacino geotermico, infatti asportando acqua e vapore da tale bacino questo potrebbe non fornire più vapore in seguito, per ovviare a ciò qualora le precipitazioni non dovessero bastare vengono creati degli appositi pozzi di ricarica attraverso i quali il vapore, condensato e raffreddato, viene reintrodotta nel ciclo geotermico.

Sebbene sia una tecnologia poco sfruttata per la produzione di energia elettrica, negli ultimi anni grazie a modifiche tecniche sta trovando successo nel campo del riscaldamento delle abitazioni grazie all'impiego di pompe di calore che riescono a ricavare calore anche dal fluido termovettore a bassa temperatura.

Questo impiego dell'energia geotermica consente in media di far fronte alle normali esigenze di riscaldamento ed acqua calda per usi sanitari sebbene a fronte di impianti non proprio semplicissimi vista la profondità alla quale bisogna giungere.

La figura illustra lo schema di principio di un impianto geotermico che a seconda delle caratteristiche geotermiche locali può consentire la produzione di energia elettrica o il riscaldamento degli edifici o addirittura entrambi [6].

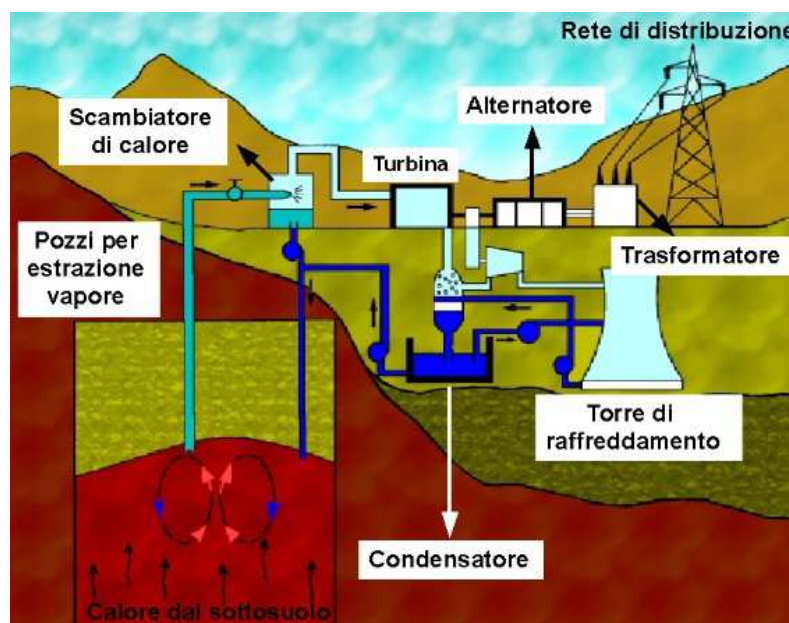


Fig. 2.6 Schema di principio di un impianto geotermico

Nella figura si vede chiaramente il ciclo di reiniezione dell'acqua nel sottosuolo una volta asportato il calore voluto, la non ricarica del pozzo geotermico può portare ad una riduzione della produttività del pozzo stesso.

2.1.6 BIOMASSA

Questi impianti consentono di ricavare energia dalla combustione di materiale biologico come può essere la combustione di legname o scarti di falegnameria ovvero dai gas liberati durante la fermentazione anaerobica degli stessi come avviene ad esempio per il metano liberato dai liquami animali.

Gli impianti che producono energia dalla combustione di legname ed altro materiale di origine organica si basano sul riscaldamento di un fluido termovettore o acqua direttamente che cedendo calore a del vapore, mediante la consueta espansione in turbina, permette la conversione in energia elettrica.

Quelli basati invece sulla combustione di gas liberati durante la fermentazione anaerobica di materiale organico prevedono la raccolta e quindi lo stoccaggio e la combustione dei gas liberati durante la fermentazione in apposite camere, di deiezioni animali ed altro materiale organico.

Un altro campo di impiego degli impianti a biomassa è il caso della combustione dei gas liberati durante la fermentazione in discarica della parte organica dei rifiuti solidi urbani, anziché finire direttamente in atmosfera questi vengono sfruttati per un utilizzo nobile sebbene vi sia la conseguente produzione di anidride carbonica a seguito della combustione.

Questo processo prevede l'emissione di gas inquinanti quali il biossido di carbonio ma è pur vero che il carbonio equivalente liberato era stato precedentemente fissato proprio dal materiale organico oggetto della fermentazione anaerobica senza andare a liberare carbonio fissato nei combustibili fossili.

Proprio in ragione di questo ragionamento l'energia derivante dalla biomassa si può considerare ancora una volta una fonte energetica rinnovabile visto che va a liberare in atmosfera la medesima quantità di anidride carbonica assorbita precedentemente.

L'immagine seguente riporta un esempio di impianto a biomassa, nella fattispecie si tratta di un impianto a biomassa allo stato solido come possono essere i residui di industrie del legno, della frazione organica dei rifiuti solidi urbani o assimilabili [2].

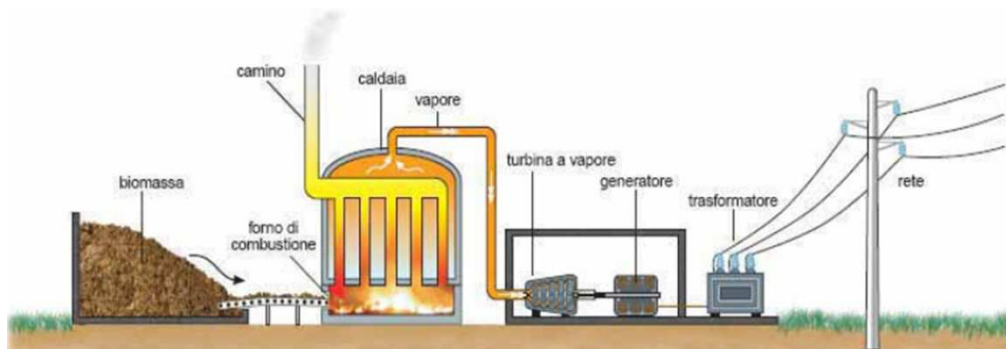


Fig. 2.7 Schema di impianto a biomassa allo stato solido

2.2 PROBLEMATICHE DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI

La produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili non è così semplice e non si presta così bene alle esigenze umane, come invece si vorrebbe, vista la disponibilità intermittente, grosso difetto difficilmente compensabile.

In genere infatti, salvo casi particolari come possono essere gli impianti geotermici o a biomassa, la produzione di energia non può essere decisa o pianificata ma deve bensì seguire la fonte primaria di energia.

Ad esempio nel caso di impianti eolici la produzione sarà dettata dalla presenza di vento ed a velocità idonea per il relativo sfruttamento, quindi a velocità né troppo alta né troppo bassa, viceversa negli impianti fotovoltaici la produzione è limitata anzitutto alle ore diurne ed in secondo luogo all'assenza di precipitazioni o nubi.

Come si vede diventa difficile riuscire a pianificare una produzione pressoché costante nell'arco delle ventiquattro ore giornaliere e pertanto la destinazione dell'energia prodotta da tali fonti dovrà per forza di cose andare a coprire la domanda di punta istantanea richiesta.

È pur vero che una massiccia integrazione di produzione da parte di fonti intermittenti ma non contemporanee può portare ad un certo grado di compensazione su di una rete estesa ma a questo punto intervengono altri problemi di trasmissione di elevata energia a notevole distanza con le relative problematiche connesse.

Nonostante questo problema non di poco conto è indubbio il fatto che l'energia prodotta può essere immessa in rete a patto della riduzione di energia d'altra provenienza come può essere quella proveniente da centrali termoelettriche o altre di base.

Come dice il termine stesso però le centrali di base devono funzionare a potenza pressoché costante viste le relative caratteristiche tecniche e quindi a questo punto sorgono due vie percorribili: la prima consiste nel vendere l'energia eccedente all'estero, l'altra integrare la potenza di base con quella prodotta da centrali non di base, a fronte di un costo maggiore, facile da ridurre in breve tempo in modo da poter accogliere quella intermittente prodotta da fonti rinnovabili.

2.3 I NUMERI DELL'ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI

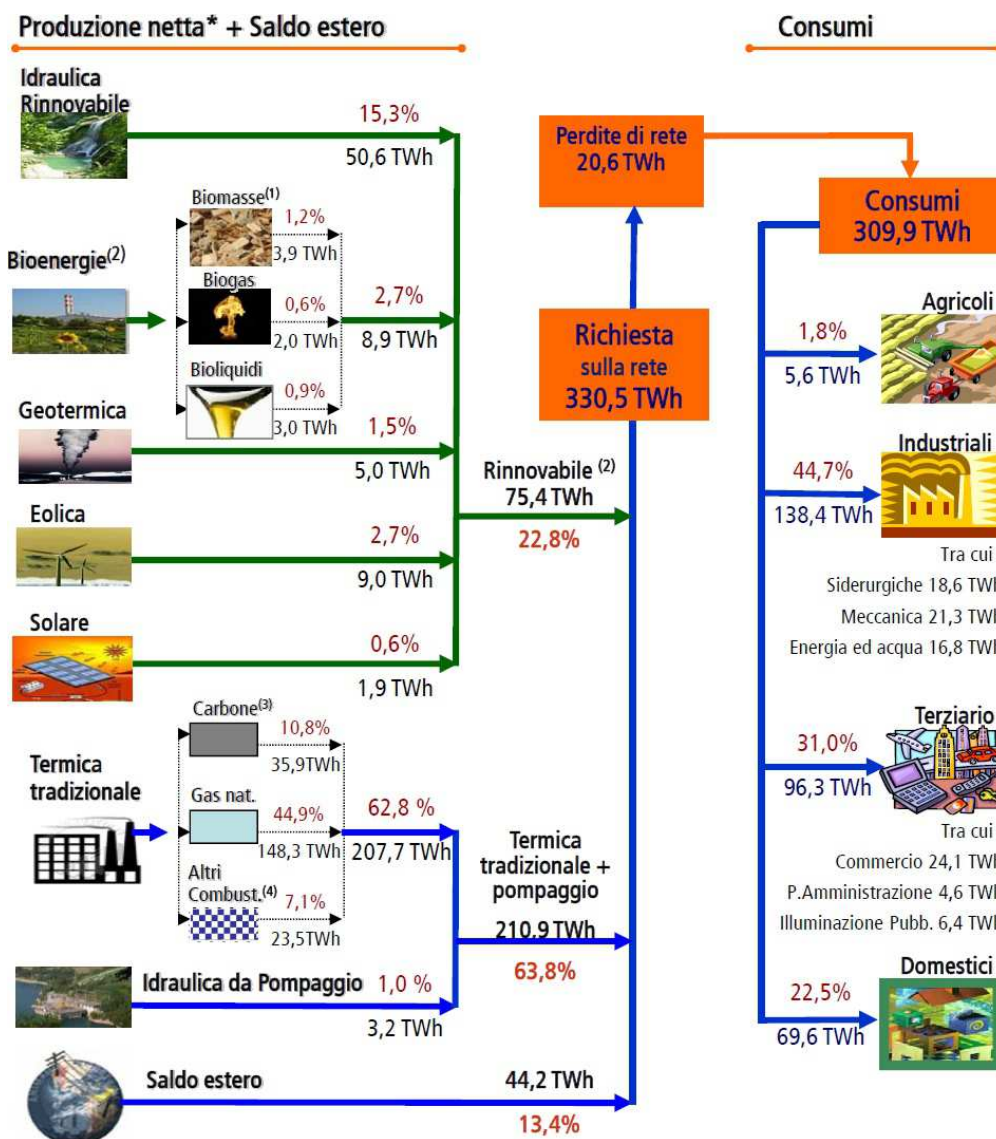
A tutti i livelli, nazionale, comunitario ed internazionale, è comunque in aumento la produzione di energia a partire da fonti rinnovabili, meccanismo incentivato quasi ovunque da prezzi di favore concessi dagli Stati stessi per ragioni varie, in Europa per far fronte al pacchetto clima-energia 20/20/20.

2.3.1 LA SITUAZIONE ITALIANA

Per quanto riguarda l'Italia la produzione di energia, in particolare quella elettrica, a partire da fonti rinnovabili gode di incentivi cospicui e forse mal ripartiti tra le diverse fonti, andando a premiare in maniera vistosa alcune tecnologie, tralasciando invece altre importanti fonti di energia rinnovabile.

Il Gestore dei Servizi Elettrici (GSE) provvede ogni anno insieme a Terna a redigere le statistiche nazionali sul sistema elettrico italiano, queste statistiche consentono facilmente di capire lo sviluppo del sistema elettrico ed anche la penetrazione delle fonti rinnovabili nella totale energia consumata in Italia.

Facendo riferimento agli ultimi dati aggiornati, nella fattispecie le statistiche ed i bilanci elettrici del 2010, si riesce a visualizzare la percentuale, sulla totale energia elettrica, prodotta a partire da fonti rinnovabili, come si può notare facilmente questa riveste una quota non trascurabile [7].



* Produzione netta: è la produzione lorda al netto dei servizi ausiliari e dei consumi da pompaggio

1) Include la parte biodegradabile dei rifiuti

2) Al netto dei rifiuti solidi urbani non biodegradabili, contabilizzati nella termica tradizionale

3) Carbone + Lignite

4) Al netto della produzione da biomasse, biogas e bioliquidi e dei consumi da pompaggio

Fig. 2.8 Bilancio elettrico e fonti rinnovabili in Italia alla fine del 2010

In particolare l'energia prodotta da fonti rinnovabili nel 2010 è stata pari al 22,8% della totale immessa in rete, tenendo quindi conto dell'energia acquistata dall'estero alla quale va eventualmente aggiunto un ulteriore 1% derivante dall'energia ricavata da impianti di pompaggio, con l'acqua pompata di notte quando vi è un eccesso dell'energia prodotta e sfruttata di giorno nelle ore di punta.

Confrontando poi le statistiche degli ultimi dieci anni si vede come la potenza lorda installata da fonti rinnovabile è passata da 18335 [MW] nel 2000 a 30284 [MW] nel 2010 con un incremento pari al 65 % [7].

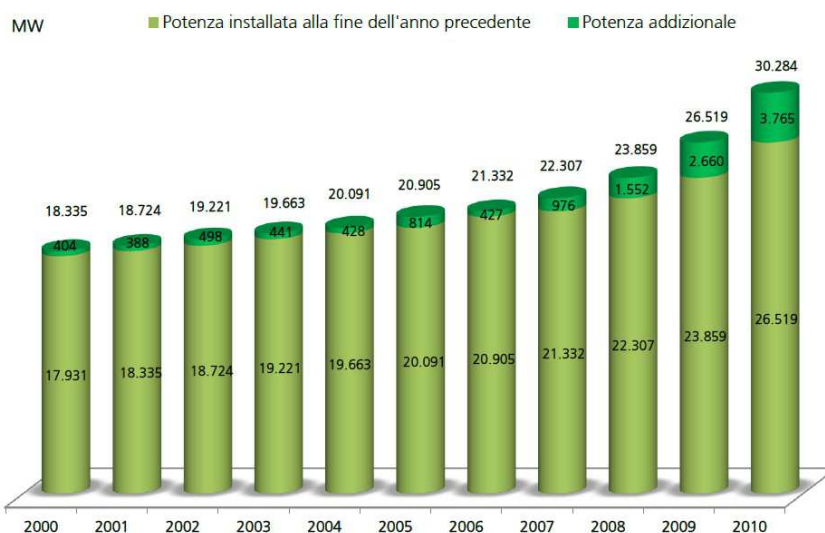


Fig. 2.9 Potenza lorda elettrica installata degli impianti da fonti rinnovabili

Come si vede chiaramente, favorita anche da meccanismi di incentivazione, la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili è andata aumentando gradualmente, addirittura negli ultimi due o tre anni la crescita ha subito incrementi ancora maggiori visti i generosi incentivi.

Volendo analizzare singolarmente le fonti energetiche rinnovabili negli ultimi dieci anni si riscontra che quelle che hanno subito un incremento, in termini assoluti, maggiore sono l'eolica e l'energia da biomasse, come si può vedere dal grafico sotto riportato [7].

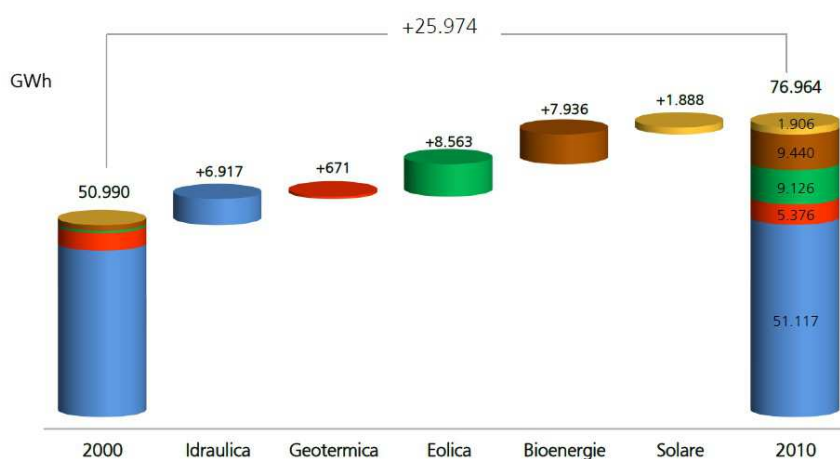


Fig. 2.10 Variazione della potenza lorda elettrica installata per fonte rinnovabile

Volendo analizzare la situazione in termini relativi e facendo ricorso ai dati Eurostat, purtroppo aggiornati solamente al 2009 si riscontra che la percentuale di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili ha subito in generale un calo dal 1999 al 2007 per poi iniziare un forte recupero con il picco coincidente con l'ultimo anno analizzabile dal sito ufficiale epp.eurostat.ec.europa.eu ovvero il 2009 [8].

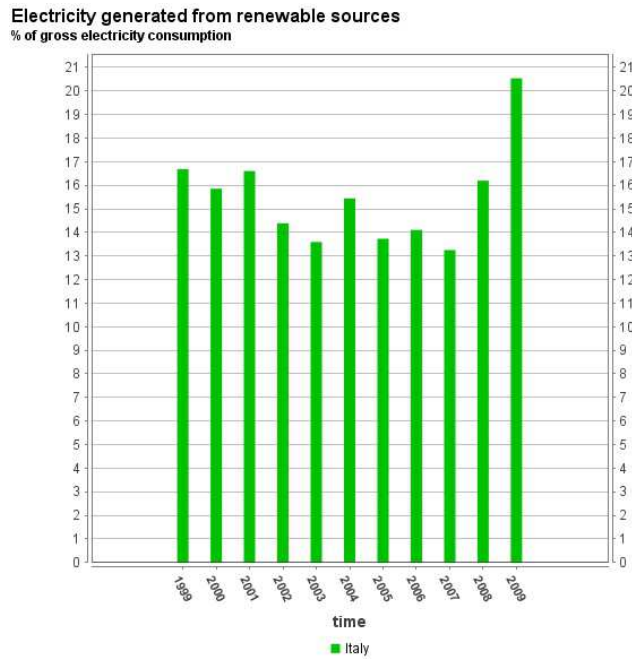


Fig. 2.11 Produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili in Italia dal 1999 al 2009

Non deve trarre in inganno il fatto di avere raggiunto già nel 2009 una produzione percentuale di energia da fonti rinnovabili superiori al 20%, il pacchetto clima-energia 20/20/20 prevede infatti una produzione di energia nel suo complesso del 17%, non solo per quanto riguarda l'energia elettrica.

2.3.2 LA SITUAZIONE EUROPEA

A livello europeo si registrano tendenze simili a quelle registrate in Italia, in Europa si è raggiunta la minima percentuale di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili nel 2002, successivamente questa ha iniziato a crescere ed anche in Europa, come in Italia, ha registrato una crescita esponenziale negli ultimi quattro o cinque anni [8].

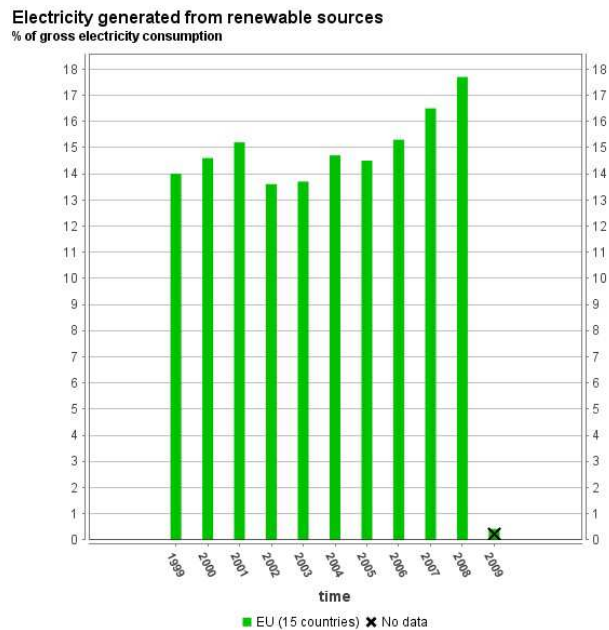


Fig. 2.12 Produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili in Europa dal 1999 al 2009

Facendo riferimento al grafico sopra riportato si nota che anche a livello europeo si riscontrano dinamiche simili a quelle italiane, sebbene si riscontri dal 2002, anno in cui si è toccato il minimo storico in fatto di percentuale di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, una crescita pressoché costante senza battute d'arresto come quella riscontrata in Italia nel 2007.

Analizzando la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, nell'ambito dell'Europa a 15, dal 2000 al 2010 si riscontrano incrementi importanti per quanto riguarda la tecnologia eolica, solare e da biomassa, questi incrementi sono stati diversi, a dire il vero, da Stato a Stato [9].

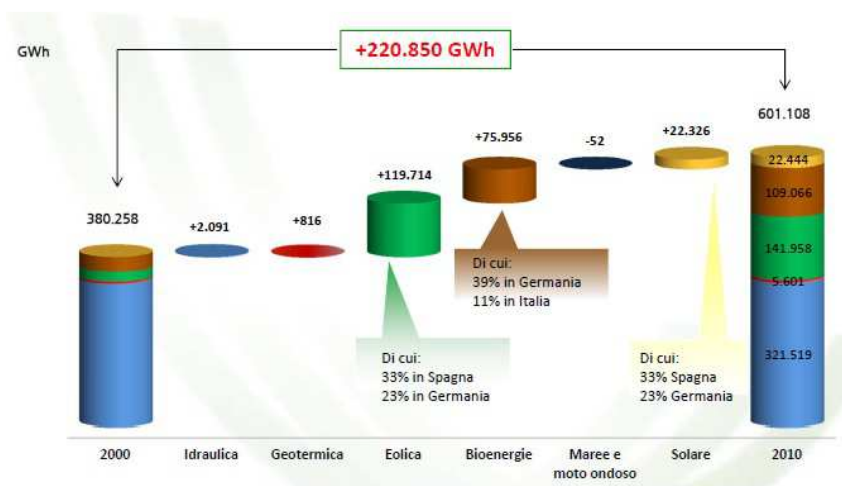


Fig. 2.13 Produzione di energia elettrica per singola fonte rinnovabile

Come si può vedere abbastanza agevolmente la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili è passata da circa 380 [GWh] nel 2000 a più di 600 [GWh] nel 2010 con un incremento di circa il 58%, abbastanza coincidente con la tendenza italiana.

2.3.3 LA SITUAZIONE MONDIALE

La situazione globale non si discosta di molto da quella nazionale e da quella europea, si registra in generale una tendenza alla crescita nell'impiego delle fonti energetiche rinnovabili benché non essendovi delle leggi così restrittive in materia, come il pacchetto energia-clima 20-20-20, tale crescita risulti dettata solamente o da condizioni di opportunità o da incentivazioni strettamente locali.

Il solo protocollo di Kyoto infatti non prevede misure e sanzioni tali da indurre le varie Nazioni aderenti e ratificanti il trattato a mettere in atto tutte le misure auspicabili per incrementare la produzione di energia da fonti rinnovabili o comunque non inquinanti.

Vi sono due grafici che illustrano in maniera rapida ed efficace la situazione a livello globale, il primo indica gli investimenti annui effettuati in nuova capacità produttiva di energia da fonti rinnovabili, il secondo la ripartizione percentuale di nuova capacità produttiva di energia tra impianti termoelettrici classici e impianti di produzione da energie rinnovabili [10].

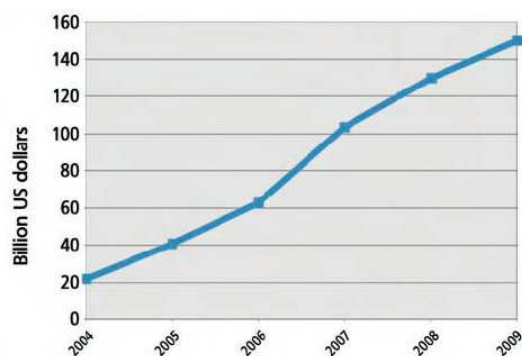


Fig. 2.14 Investimenti annuali in nuova capacità di produzione di energia da fonti rinnovabili

Si vede chiaramente che gli investimenti in capacità di produzione di energia da fonti rinnovabili dal 2004 al 2009 sono andati sempre in crescendo, segno di un interesse sempre maggiore verso le fonti rinnovabili, in particolare si tratta di investimenti sostanziosi avendo raggiunto nel 2009 circa 150 miliardi di dollari USA.

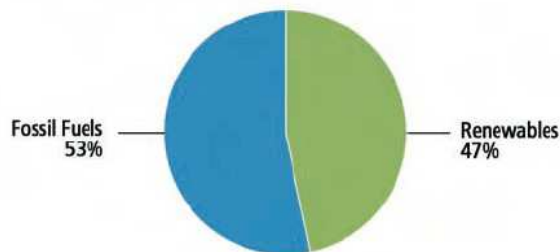


Fig. 2.15 Percentuale di investimenti in impianti a combustibili fossili e da energie rinnovabili [10]

Si riscontra un sostanziale pareggio, sempre nel 2009 visto che i precedenti dati si riferiscono proprio a tale anno, tra gli investimenti effettuati in impianti a combustibili fossili ed in impianti da energie rinnovabili, molto probabilmente le percentuali oggi sono quantomeno invertite ovvero gli investimenti sulle fonti rinnovabili hanno uguagliato se non superato gli investimenti sui combustibili fossili.

Infine quest'ultima, semplice figura illustra la differenza esistente tra la domanda globale annua di energia e la potenziale energia ricavabile da ciascuna fonte energetica, sia essa classica come il carbone, alternativa come l'energia nucleare o rinnovabile come l'energia solare che ogni anno raggiunge la superficie terrestre [11].

Appare chiaro che la domanda globale annua di energia si potrebbe ricavare da una porzione estremamente piccola della totale energia solare della quale il pianeta beneficia, risulta tuttavia impossibile sfruttarla a pieno vista l'impossibilità tecnica di ricoprire totalmente la superficie terrestre con moduli fotovoltaici.

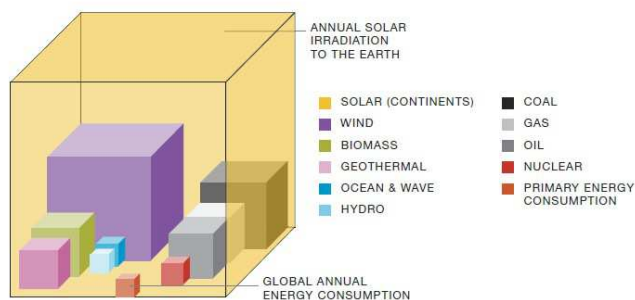


Fig. 2.16 Risorse energetiche globali

3 INTEGRAZIONE DEL PROCESSO “VERDE”

È vero che la produzione di energia elettrica a partire da fonti rinnovabili non comporta direttamente la liberazione di gas inquinanti ma bisogna pur sempre considerare la relativa produzione indiretta di gas ad effetto serra quale quella legata a

- REALIZZAZIONE ED INSTALLAZIONE;
- NORMALE FUNZIONAMENTO;
- DISMISSIONE;

degli impianti stessi, al fine di non usare in maniera inappropriata termini invece carichi di significato. Risulta a volte difficile stabilire le reali emissioni legate ad un processo industriale, lungi dal voler essere un'analisi approfondita, il capitolo che segue serve solamente ad evidenziare aspetti a volte non considerati dai più, forse perché presi dall'entusiasmo di parlare di fonti energetiche ad emissioni zero.

3.1 IL PROCESSO “VERDE”

Che cosa si intenda realmente per “verde” non è semplice da capire, i mass media utilizzano questo termine in modo forse troppo generoso visto che a volte viene designato tale un prodotto che comporti emissioni minori rispetto ad un diretto concorrente ma senza per forza indicare assenza di emissioni di gas inquinanti.

In seguito con il termine “verde” indicheremo solamente quei processi o quelle fasi di un singolo processo che comportano assenza di emissioni di alcun gas ad effetto serra, badando a fare un uso del termine ben più oculato quindi di quanto non avvenga ogni giorno sui mezzi di comunicazione.

Preoccupandoci nella fattispecie di impianti di produzione da fonti rinnovabili ed ancor più nello specifico di impianti fotovoltaici, bisogna ora considerare le diverse fasi di vita di un tale impianto, queste verranno analizzate, seppure in maniera semplice e rapida, singolarmente, ponendo l'accento sulle condizioni critiche.

Si procederà con ordine, seguendo il normale iter che caratterizza un impianto fotovoltaico, siano le celle impiegate nei relativi moduli di tipo mono ovvero poli cristallino.

3.1.1 REALIZZAZIONE ED INSTALLAZIONE

Al momento dell'installazione di impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili bisogna considerare non solo le eventuali emissioni di gas inquinanti in loco, dovute alla realizzazione dell'impianto ma bensì tutti i processi eseguiti precedentemente per giungere all'impianto finale.

Nel caso specifico, trattando appunto la produzione di energia a partire dai processi di conversione fotovoltaica bisogna considerare come vengono prodotti tutti gli apparati necessari alla realizzazione dell'impianto stesso, a partire dai moduli per considerare quindi gli inverter, i quadri, i cavi e tutto il materiale necessario.

Sin da questo punto appare chiaro che nonostante il principio di conversione fotovoltaica si possa considerare “verde”, altrettanto non si può dire per tutto quello che sta alle spalle, le tecnologie impiegate per produrre i vari apparati oltre ad essere in genere molto energivore, producono di riflesso svariate quantità di gas inquinanti legati alla realizzazione degli stessi.

In un Paese come l'Italia ad esempio l'energia elettrica stessa che viene prelevata dalla rete, per i vari processi industriali, è proveniente per buona parte da centrali termoelettriche a carbone, olio combustibile e gas, tutti combustibili fossili che rilasciano nell'aria notevoli quantità di inquinanti.

Volendo anche tralasciare il problema della provenienza dell'energia elettrica gli stessi processi produttivi di materiali componenti come il silicio, l'alluminio, i materiali plastici utilizzati nei vari componenti comportano la produzione di gas ad effetto serra.

L'installazione stessa dell'impianto comporta di nuovo assorbimento di energia, da parte della rete, che, come descritto poco fa, risulta essere proveniente per buona parte da impianti termoelettrici classici mentre le operazioni di installazione di per sé non comportano in generale la liberazione di quantità misurabili di gas inquinanti.

Fatte queste considerazioni, pur tralasciandone alcune altre molto semplici, si può dire che la fase di realizzazione ed installazione di un impianto fotovoltaico non si può considerare propriamente “verde” viste le conseguenti emissioni inquinanti.

L’ecologicità della produzione quindi può risiedere al massimo nella vera e propria conversione energetica, tralasciando una parte importante di tutto l’insieme unitamente, come si vedrà in seguito, alla fase della dismissione dell’impianto.

3.1.2 NORMALE FUNZIONAMENTO

Nel normale funzionamento di un impianto fotovoltaico si ha la conversione dell’energia irradiata dal Sole verso la Terra attraverso il processo fotovoltaico, questo, come verrà spiegato nel seguito, non comporta l’emissione di alcunché se non la fornitura ai morsetti di uscita del modulo di una certa quantità di potenza elettrica, caratterizzata dai relativi parametri di tensione e corrente.

Non necessitando di meccanismi di combustione si può quindi escludere l’emissione di gas inquinanti legati a tale tipologia di conversione energetica, nel caso specifico assente appunto.

L’assenza di liberazione in atmosfera di gas ad effetto serra permette quindi di considerare “verde” il processo di produzione di energia elettrica attraverso il meccanismo di conversione fotovoltaica, almeno limitatamente al funzionamento normale.

3.1.3 DISMISSIONE

Punto alquanto critico in tutto il processo di produzione di energia, a partire da impianti fotovoltaici, è di certo la dismissione degli impianti stessi una volta giunti al termine della loro vita produttiva ovvero una volta che la loro esigua produzione energetica ne giustifichi lo smantellamento a favore di un nuovo impianto.

È pur vero che gli impianti fotovoltaici subirono un primo importante incentivo al loro sviluppo a seguito della crisi energetica del 1973 ma di fatto iniziarono ad essere installati, da enti di ricerca e sviluppo, solamente dagli anni ottanta.

La vera e propria esplosione poi nell’installazione di impianti fotovoltaici si è avuta solamente negli ultimi anni, vista l’incentivazione sia a livello nazionale che a livello europeo in generale, al fine di giungere ai traguardi imposti dal pacchetto energia-clima 20-20-20.

Preso atto che i produttori di moduli fotovoltaici garantiscono una vita media dei loro prodotti che si aggira attorno ai 20, 25 anni, di fatto si verrà ad affrontare la necessità di uno smaltimento cospicuo di moduli fotovoltaici solamente tra 10, 15 anni.

Ciò giustifica l’assenza, allo stato attuale, di studi approfonditi sullo smaltimento di moduli fotovoltaici; non essendoci il problema sono limitate pure le risorse destinate allo studio di tale aspetto, sicuramente poco pressante.

Nonostante questo problema al momento non si stia ponendo, non si può trascurare un aspetto così importante nello studio e nella definizione di future strategie di sviluppo di tutto ciò che orbita attorno al mondo del fotovoltaico.

Attualmente, considerando sia i moduli in silicio cristallino che quelli in film sottile, esistono essenzialmente solo due metodologie per una dismissione efficiente dei moduli attraverso un riciclo dei materiali costituenti il pannello.

Non volendo trattare nello specifico, al momento, queste due metodologie di riciclo si può però dire che in entrambi i casi si ha la produzione di gas inquinanti e tossico-nocivi ovvero di acidi; entrambi i prodotti derivanti dal processo specifico necessitano di trattamenti idonei prima di poter essere liberati nell’atmosfera o viceversa il recupero, vista la loro pericolosità per gli esseri viventi.

Quanto appena affermato consente di dire con assoluta certezza che nemmeno la fase di dismissione dei moduli fotovoltaici risulta essere un processo “verde” come abbiamo invece voluto indicare i processi che non comportino l’emissione di gas ad effetto serra.

Se non si considera una dismissione organizzata ed efficiente dei moduli fotovoltaici le alternative rimangono poche tra le quali il trattamento in un inceneritore che comporta ovviamente emissioni inquinanti ovvero lo smaltimento in discarica che invece posticipa in data da destinarsi il problema di uno smaltimento definitivo.

3.2 NORMATIVA VIGENTE

Per quanto riguarda la normativa vigente in materia bisogna dire che quanto avviene in Italia è dettato essenzialmente dal recepimento di direttive comunitarie, così come avviene per moltissime altre materie, a livello internazionale invece la situazione è molto variegata e dipende dal singolo Stato.

Esistono a dire il vero in tutto il mondo condizioni differenti, in Giappone ad esempio negli anni '70 fu sperimentato un sistema di raccolta differenziata delle apparecchiature elettroniche che poi terminò rovinosamente ed in seguito furono e vengono tuttora trattati come normali rifiuti solidi urbani.

Negli Stati Uniti esistono delle leggi che coprono solamente il campo delle apparecchiature contenenti tubi a raggi catodici, per la presenza di gas dannosi per l'ambiente e per l'uomo mentre le rimanenti RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) vengono trattate come normali rifiuti urbani.

Lo stato attuale delle cose anche nella sola Europa non è a dire il vero molto chiaro, fino a non molto tempo fa, di fatto prima dell'entrata in vigore della direttive comunitarie 2002/95/EC e 2002/96/EC ovvero le cosiddette direttive ROHS e RAEE, i moduli come praticamente tutti gli altri rifiuti derivanti da apparecchiature elettriche ed elettroniche venivano considerati alla stregua di normali rifiuti solidi urbani.

Con l'avvento delle direttive sopracitate invece si è posta un po' chiarezza e si sono pure imposti limiti all'impiego di sostanze pericolose e regole sullo smaltimento di apparecchiature elettriche ed elettroniche visto che comunque contengono materiali potenzialmente inquinanti mentre sono stati tralasciati grossi filoni del campo elettrico/elettronico come possono essere considerati gli stessi moduli fotovoltaici.

La prima delle due direttive, la cosiddetta direttiva RoHS ovvero **Restriction of Hazardous Substances** (2002/95/EC) [12], si prefigge, come viene riportato nella traduzione ufficiale italiana della direttiva stessa, lo scopo seguente:

“La presente direttiva mira a ravvicinare le legislazioni degli Stati membri sulle restrizioni dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche e a contribuire alla tutela della salute umana nonché al recupero e allo smaltimento ecologicamente corretto dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche”.

Questa direttiva va quindi a fissare limiti e prescrizioni riguardanti la produzione di tutti gli apparati elettrici ed elettronici, compresi quindi i moduli fotovoltaici, viceversa lo smaltimento viene trattato in maniera più approfondita nella seconda delle due direttive.

In particolare mentre per tutte le apparecchiature elettriche ed elettroniche l'impiego del cadmio, metallo altamente tossico, è limitato, nei moduli fotovoltaici al telloruro di cadmio è invece permesso in quantitativi superiori, pena il non funzionamento ottimale del modulo.

La seconda delle due direttive citate, la cosiddetta direttiva WEEE (o RAEE) ovvero **Waste Electrical and Electronic Equipment** (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) (2002/96/EC) [13] va invece ad interessarsi del fine vita delle apparecchiature elettriche ed elettroniche ovvero del relativo riciclo, lo scopo di questa direttiva è il seguente:

“La presente direttiva reca misure miranti in via prioritaria a prevenire la produzione di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) ed inoltre al loro reimpiego, riciclaggio e ad altre forme di recupero in modo da ridurre il volume dei rifiuti da smaltire. Essa mira inoltre a migliorare il funzionamento dal punto di vista ambientale di tutti gli operatori che intervengono nel ciclo di vita delle AEE, quali ad esempio produttori, distributori e consumatori, in particolare quegli operatori direttamente collegati al trattamento dei rifiuti delle stesse.”

Entrambe queste direttive vanno ad interessare le apparecchiature elettriche ed elettroniche ma nell'appendice IA alla direttiva RoHS che definisce le apparecchiature alle quali vengono applicate queste procedure non compaiono né singolarmente i moduli fotovoltaici né gli impianti fotovoltaici nel loro complesso.

Sembrirebbe quindi che tali apparati non siano oggetto di trattamenti ad hoc come avviene invece per le apparecchiature elettriche ed elettroniche in generale ad esempio gli elettrodomestici, i giocattoli elettronici, la strumentazione elettrica in genere.

A seguito della prima stesura della normativa, di fatto avvenuta nel 2002, sono stati scritti ed emanati vari provvedimenti di modifica delle stesse, il tutto per adeguare le normative al progresso tecnologico seguito e quindi tendenti a migliorare e ad incrementare il riciclo di apparecchiature elettroniche.

Bisogna sicuramente ricordare l'aggiornamento delle stesse intervenuto con la ratifica della direttiva comunitaria 2011/65/EU che prevede una riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle

apparecchiature elettriche ed elettroniche, l'oggetto della stessa risulta essere, come riportato dalla traduzione ufficiale in italiano, il seguente:

“La presente direttiva istituisce norme riguardanti la restrizione all'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) al fine di contribuire alla tutela della salute umana e dell'ambiente, compresi il recupero e lo smaltimento ecologicamente corretti dei rifiuti di AEE”.

Come viene riportato però testualmente solo dopo poche righe, tale direttiva non viene applicata a molte apparecchiature elettriche ed elettroniche, tra le quali, ancora una volta, i moduli fotovoltaici:

“La presente direttiva non si applica: i) ai pannelli fotovoltaici destinati a essere utilizzati in un sistema concepito, montato e installato da professionisti per un impiego permanente in un luogo prestabilito, ai fini della produzione di energia da luce solare per applicazioni pubbliche, commerciali, industriali e residenziali.

Ancora una volta quindi i moduli fotovoltaici ed in generale gli interi impianti fotovoltaici non vengono considerati dalle direttive comunitarie, i motivi per i quali ciò avvenga non sono a dire il vero molto chiari ma si devono seguire tali direttive secondo quanto stabiliscono.

La pressione effettuata dalle associazioni di produttori di materiale fotovoltaico nei confronti degli organismi europei può certamente avere il proprio peso e ciò può essere dettato dalla necessità di tentare di mantenere la concorrenza con i produttori extra-europei, potenzialmente non tenuti a far fronte ai relativi costi.

Certamente l'assenza di metodi e tecnologie collaudati idonei ad un riciclo efficiente dei materiali impiegati negli impianti fotovoltaici fa sì che non vi sia una vera e propria spinta ad un metodo di riciclo degno di essere chiamato tale ma certamente senza regolamentazione in materia difficilmente si riusciranno ad ottenere risultati considerevoli.

La sola spinta morale verso un riciclo dei materiali non può infatti essere la sola motivazione che spinge produttori ed attori tutti del mondo del fotovoltaico a cercare di chiudere il ciclo del fotovoltaico, bisogna agire quindi con leggi e norme atte a perseguire tale fine.

Vi è al momento in discussione la possibilità di poter introdurre pure i moduli e più in generale gli apparati impiegati negli impianti fotovoltaici all'interno della categoria delle apparecchiature che necessitano di uno smaltimento e di un riciclo specifico come quello previsto per i rifiuti RAEE.

In particolare in data 19 gennaio 2012 il Parlamento Europeo ha emanato la seguente: [14]

“Risoluzione legislativa del Parlamento europeo del 19 gennaio 2012 relativa alla posizione del Consiglio in prima lettura in vista dell'adozione della direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) (Rifusione) (07906/2/2011 – C7-0250/2011 – 2008/0241(COD))”.

In tale testo si fa esplicito riferimento alla direttiva RAEE (o WEEE) e si afferma che in ragione di modifiche sostanziali da apportare alla stessa è opportuno provvedere, per ragioni di sicurezza, alla rifusione di tale direttiva.

Facendo pure riferimento agli obiettivi della politica ambientale dell'Unione Europea che sono la salvaguardia, la tutela dell'ambiente, la protezione della salute umana e l'uso accorto e razionale delle risorse naturali, afferma in particolare che tale politica è basata sul principio della precauzione, sul principio dell'azione preventiva ed in definitiva sul principio che *“chi inquina paga”*.

La risoluzione afferma che gli obiettivi della direttiva possono essere raggiunti senza includere nell'ambito di applicazione gli impianti fissi di grandi dimensioni, quali piattaforme petrolifere, sistemi di trasporto bagagli negli aeroporti o ascensori, il motivo di questa esclusione appare ancora una volta ignoto.

Vi è quindi una frase scritta in neretto, immediatamente dopo la definizione degli impianti esclusi, che merita di essere riportata così com'è scritta:

*“Tuttavia le apparecchiature che non sono progettate e installate precisamente in quanto elemento di detti impianti, idonee a svolgere la propria funzione anche ove non siano elementi degli impianti, devono rientrare nel campo di applicazione della presente direttiva. Si tratta per esempio di attrezzature di illuminazione o **moduli fotovoltaici**”.*

Proseguendo nella risoluzione si trovano numerosi altri riferimenti all'inclusione dei moduli fotovoltaici nel campo di applicazione della direttiva, nei meccanismi di incentivazione di recupero dedicate delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, in particolare si deve notare la citazione esplicita, ancora una volta, nell'allegato I e II riportanti appunto le apparecchiature alle quali applicare la direttiva.

Quella appena descritta comunque è pur sempre una risoluzione del Parlamento Europeo, in quanto tale viene pubblicata nella gazzetta ufficiale dell'Unione Europea ma non costituisce di fatto una Direttiva Comunitaria.

Una Direttiva Comunitaria infatti è un atto che il Parlamento adotta congiuntamente con il Consiglio per l'assolvimento dei compiti previsti dai trattati, ovvero nel caso specifico si ha la mancanza dell'adozione congiunta del Consiglio Europeo.

Quando il Consiglio Europeo venga a ratificare il medesimo testo approvato dal Parlamento si ha la vera e propria Direttiva con obbligo di recepimento da parte degli Stati Membri e quindi solo allora diventa a tutti gli effetti legge.

Viste le condizioni economico-finanziarie in cui versa l'intera Unione Europea è molto probabile che l'attenzione, le energie e di conseguenza i lavori degli organi europei verranno dirottati verso una rapida risoluzione di questi problemi, piuttosto che nei confronti di problemi di carattere ambientale, sebbene siano molto importanti.

Difficile quindi stabilire oggi se e quando il Consiglio Europeo procederà con l'adozione della risoluzione del Parlamento Europeo riguardante la rifusione, di fatto, della direttiva WEEE, certamente è stata posta l'attenzione sullo smaltimento dei moduli fotovoltaici, segno del crescente interesse anche da parte della politica e non solo degli addetti ai lavori.

Oltre alla politica pure l'opinione pubblica, sempre più sensibile alle tematiche ambientali, sta iniziando a prendere coscienza dei problemi legati allo smaltimento dei rifiuti e quindi sarà un passo obbligato inserire i moduli fotovoltaici nel campo di applicazione della direttiva WEEE.

Diverse associazioni ambientaliste infatti puntano ogni giorno il dito contro la politica che, secondo loro, risulta essere disinteressata alle tematiche ambientali in genere, poi accordi internazionali come il protocollo di Kyoto non possono fare altro che accelerare il cammino verso uno smaltimento consapevole anche dei moduli fotovoltaici.

Un ulteriore problema che non si deve dimenticare poi deriva dai possibili traffici illeciti tra Paesi sviluppati ed in via di sviluppo ovvero del possibile traffico di rifiuti tossici, anche RAEE quindi, dai primi verso i secondi con metodi di smaltimento poco efficienti ovvero in discarica.

Essendo vietato tale tipo di smaltimento nei primi ma concesso per mancanza di legislazione o semplicemente per condizioni di povertà nei secondi, si instaurano e già vengono intercettati, traffici illeciti che oltre a portare ad uno smaltimento non idoneo ed inquinante mettono pure a rischio l'incolumità umana trattando di fatto in maniera non idonea rifiuti tossici e pericolosi.

Vi è un trattato internazionale dell'Organizzazione delle Nazioni Unite, il cosiddetto **Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal** (Convenzione di Basilea sul controllo dei movimenti transfrontalieri di rifiuti pericolosi e del loro smaltimento) noto anche solamente per Convenzione di Basilea il quale è designato per ridurre i movimenti di rifiuti pericolosi.

Tale convenzione, definendo nei relativi allegati i rifiuti considerati pericolosi ed i relativi casi di applicazione, tenta di limitare, come detto, i traffici di rifiuti dai Paesi sviluppati verso quelli in via di sviluppo che verosimilmente potrebbero smaltirli in maniera non adeguata o per assenza di legislazione in materia o per un silenzio assenso in ragione di accordi illeciti quali tangenti o simili.

Il principio sancito dal trattato è quello poi ribadito pure dalle direttive europee secondo il quale i rifiuti dovrebbero essere smaltiti nello Stato in cui vengono prodotti così come dovrebbe pagare chi produce i rifiuti, da qui il meccanismo di costituzione di consorzi obbligatori per il recupero ed il riciclo di materiale prodotto e venduto in precedenza.

3.3 SITUAZIONE ATTUALE: ENTI ATTIVI IN MERITO

Con un occhio alle dinamiche di mercato si può certamente affermare che gli attori del libero mercato si stanno occupando, in questo momento, della ricerca di metodologie produttive che consentano di contenere i costi e quindi aumentare i margini di guadagno, com'è ovvio d'altra parte.

Pochi o nessuno invece si sta occupando dell'ultimo anello della catena, come lo si può immaginare, ovvero della fase di dismissione e di riciclo dei moduli fotovoltaici installati, soprattutto per l'assenza di volumi di materiale da trattare tali da giustificare investimenti comunque cospicui.

Facendo un parallelo però con i rifiuti solidi urbani, entrati di recente tra le maggiori attività illegali gestite dalle associazioni a delinquere, anche la dismissione dei moduli fotovoltaici potrà potenzialmente interessare in futuro le mafie, visti i volumi che certamente si verranno a creare.

Tra i pochi soggetti che si occupano oggi, almeno in linea teorica, di riciclaggio vi sono i grossi produttori di celle e moduli fotovoltaici e, più di recente, un numero crescente di produttori anche medio-piccoli, il tutto o quasi per una grossa questione di immagine.

Stanno quindi emergendo sia a livello nazionale che europeo ed extraeuropeo alcune realtà che intendono muoversi verso la direzione del riciclo efficiente dei moduli fotovoltaici installati ormai ovunque.

A volte queste realtà sono più o meno legate ad associazioni di produttori, progettisti e realizzatori di impianti fotovoltaici che per motivi vari, anche di immagine, si occupano anche della fase finale dell'impianto fotovoltaico, è il caso di EPIA (European Producers Industry Association) ad esempio. Altre volte invece questi organismi che si occupano dello smantellamento e del riciclo dei moduli e più in generale di tutto l'impianto fotovoltaico, sono pur sempre legati ad aziende produttrici di materiale fotovoltaico ma sono meno legate all'aspetto produttivo, forse per infondere maggior fiducia, questo è il caso di PV CYCLE ad esempio.

A livello nazionale esistono diverse realtà di questo genere, in parte nate per conto proprio, con lo scopo di promuovere un riciclo consapevole ma la maggior parte di queste nate a seguito di provvedimenti di legge atti a favorire l'adesione da parte dei produttori di materiale fotovoltaico a consorzi di riciclo del materiale fotovoltaico stesso.

Secondo quanto previsto infatti dal Decreto Ministeriale del Ministero per lo Sviluppo Economico di concerto con il Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare del 05/05/2011 [15], il cosiddetto *QUARTO CONTO ENERGIA*, gli impianti che entreranno in esercizio successivamente al 30 giugno 2012 dovranno presentare, oltre alla documentazione prevista per gli impianti che entrano in servizio entro tale data, ulteriore documentazione riguardante il riciclo dei moduli installati.

In particolare, oltre a documentazione non espressamente inerente l'ambito di questa tesi, dovrà fornire: *"a) certificato rilasciato dal produttore dei moduli fotovoltaici, attestante l'adesione dello stesso a un sistema o consorzio europeo che garantisca, a cura del medesimo produttore, il riciclo dei moduli fotovoltaici utilizzati al termine della vita utile dei moduli;"*.

L'emanazione del presente decreto ha fatto sì che si instaurasse automaticamente una filiera, al momento se non altro di principio, per la quale si sono costituiti a livello nazionale già diversi consorzi per il riciclo dei moduli fotovoltaici ovvero che sistemi già esistenti nel territorio nazionale si attrezzassero per il riciclo di questo nuovo tipo di rifiuti.

È il caso ad esempio di COBAT (Consorzio Obbligatorio per le BATterie al piombo esauste e i rifiuti piombosi) che il giorno 11 ottobre 2011 ha istituito assieme al comitato IFI (Industrie Fotovoltaiche Italiane) la nascita della prima filiera, secondo quanto dichiarato nel loro sito internet (www.cobat.it) [16], tutta italiana per la raccolta, il riciclo e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici.

Si tratta in realtà ancora di una filiera in linea teorica visto che, da quanto si riesce ad apprendere, non esistono ancora impianti per il recupero e lo smaltimento dei materiali costituenti i moduli ma segna comunque un passo avanti verso la costituzione di un sistema efficiente di riciclo visto che ad oggi in Europa ne esiste solamente uno in Germania.

Un altro esempio di consorzio che si è, per così dire, ammodernato al fine di poter gestire questo tipo di rifiuti, che come si vedrà in futuro diverrà un rifiuto potenzialmente prezioso, è REMEDIA (consorzio di gestione ecosostenibile di rifiuti tecnologici ovvero RAEE).

Sicuramente da qui al 30 giugno 2012 si costituiranno nuovi organismi o consorzi già esistenti si adegueranno a questo tipo di rifiuti visto che l'adesione ad uno di questi sistemi certificati diverrà passo obbligato per poter usufruire degli incentivi statali.

Viceversa non aderendo ad un sistema certificato per il recupero ed il riciclo di moduli fotovoltaici significherà rimanere fuori dal mercato visto che ancora ad oggi il mercato legato al fotovoltaico si regge grazie agli incentivi statali.

A livello europeo, si deve per forza di cose nominare PV-CYCLE (www.pvcycle.org) [17] un'organizzazione senza fini di lucro, volontaria, che raggruppa tutti i produttori ed importatori sui mercati europei di celle e moduli fotovoltaici la quale si occupa della raccolta, della gestione e del riciclo dei moduli fotovoltaici una volta giunti a fine vita.

L'associazione PV-CYCLE è stata fondata a Bruxelles il 5 luglio 2007 e a partire dal 2008 ha iniziato a diventare pienamente operativa grazie ad un gruppo di lavoro interdisciplinare che ha provveduto a definire obiettivi specifici ed accordi ambientali volontari tra quanti vi volessero aderire.

Ad oggi costituisce la più grande realtà europea e mondiale per quanto riguarda appunto la raccolta, la gestione ed il riciclo di materiale fotovoltaico con 205 punti di raccolta in tutta Europa e 240 membri aderenti che rappresentano approssimativamente il 90 % del mercato fotovoltaico europeo.

Un'altra associazione a livello europeo che si occupa almeno in parte del riciclo dei moduli fotovoltaici è EPIA (**European Photovoltaic Industry Association**) che pur rappresentando le industrie fotovoltaiche europee si occupano anche del fine dei moduli fotovoltaici.

Infatti EPIA è pure uno dei membri fondatori di PV-CYCLE, questo probabilmente per voler sottolineare la distinzione tra l'anima della produzione vera e propria di moduli raggruppando appunto le industrie fotovoltaiche, dall'aspetto ecologico riguardante il riciclo, ricordando appunto che PV-CYCLE è un'associazione senza fini di lucro.

3.4 SITUAZIONE ATTUALE: TECNOLOGIE ESISTENTI

Ad oggi, sebbene siano allo studio più di qualche metodo di riciclo di moduli fotovoltaici, sono state messe a punto solamente due tecnologie, effettivamente impiegate in processi di riciclo dei moduli, questi due colossi del fotovoltaico sono:

- SOLARWORLD con l'affiliata DEUTSCHE SOLAR;
- FIRSTSOLAR.

Queste due grosse imprese del fotovoltaico mondiale hanno sviluppato in separata sede due diverse tecnologie al fine di provvedere da un lato ad un riciclo dei moduli una volta giunti a fine vita ma anche per poter recuperare gli inevitabili scarti di produzione fisiologici di tutti i processi produttivi.

La prima delle due essendo uno dei più grossi produttori al mondo di celle e moduli fotovoltaici in silicio cristallino si è impegnato per la definizione di una metodologia per il riciclo proprio di tale tipo di moduli.

Questo primo processo di riciclo dopo essere stato messo a punto, collaudato e verificato ha funzionato però solamente per un breve periodo a partire dal 2003, i volumi di materiale da riciclare infatti non giustificano ad oggi il mantenimento in funzione di un tale processo, solamente in futuro troverà senso rimettere in moto tale processo.

La seconda azienda invece è uno dei più grandi produttori di moduli fotovoltaici in film sottile, anche questa in ragione della propria produzione industriale si è interessata ed applicata all'elaborazione di uno schema di riciclo del proprio tipo di moduli, sebbene ne abbia brevettato un metodo impiegabile per moduli in silicio cristallino [18].

A differenza di SolarWorld, FirstSolar sta già procedendo con il suo progetto di raccolta presso i propri clienti dei moduli installati in passato ora giunti a fine vita o semplicemente danneggiati in modo tale da avviarli ad un riciclo efficiente.

Il solo nominare il termine "Cadmio" suscita infatti nell'opinione pubblica timore e paura, in realtà il telloruro di cadmio è assai più stabile dei suoi costituenti [19] (Tellurio e Cadmio), insolubile in comuni solventi e secondo alcuni test eseguiti su topi è risultato che l'ingestione porta a conseguenze letali solamente ad alte quantità.

La decomposizione poi del CdTe (Telloruro di Cadmio) che può essere il solo modo per essere liberato in atmosfera si verifica solamente a temperature superiori ai 1000 [°C] ed anche in caso di incendio di un edificio sul quale sia installato questo tipo di moduli fotovoltaici, questo composto dovrebbe trovare una via per fuoriuscire dal modulo, cosa affatto scontata.

Proprio in ragione di un tale timore nell'opinione pubblica però FirstSolar pubblicizza ed interviene direttamente in loco per il recupero dei propri moduli senza richiedere al cliente finale nemmeno la consegna in punti appositi, in seguito provvede quindi al relativo riciclo coprendo tutto il ciclo di vita del modulo.

3.4.1 METODO SOLARWORLD PER MODULI IN SILICIO CRISTALLINO

Il metodo sviluppato da SolarWorld presso l'affiliata Deutsche Solar a Freiberg (Germania) si basa sul recupero e sul riciclo di moduli in silicio cristallino essendo questo il prodotto principe del gruppo, quindi potendo sviluppare potenzialmente un ciclo di recupero degli scarti di produzione.

La metodologia consiste nelle seguenti tappe da eseguire in sequenza [20]:

RACCOLTA E PREPARAZIONE: I moduli fotovoltaici vengono raccolti e vengono staccate le cassette di connessione elettrica (junction box) e le cornici in alluminio.

INCENERIMENTO INCAPSULANTE: I moduli vengono portati e mantenuti ad elevata temperatura fino al completo incenerimento del materiale incapsulante (EVA).

SEPARAZIONE DEL VETRO: Una volta rimosso il materiale incapsulante si può separare il vetro dalle celle fotovoltaiche.

RICICLO VETRO E CELLE: Il vetro e le celle così ricavate vengono avviati a due processi distinti di riciclo e recupero per poter essere riutilizzati.

Lo schema di seguito riportato illustra la metodologia implementata da SolarWorld:

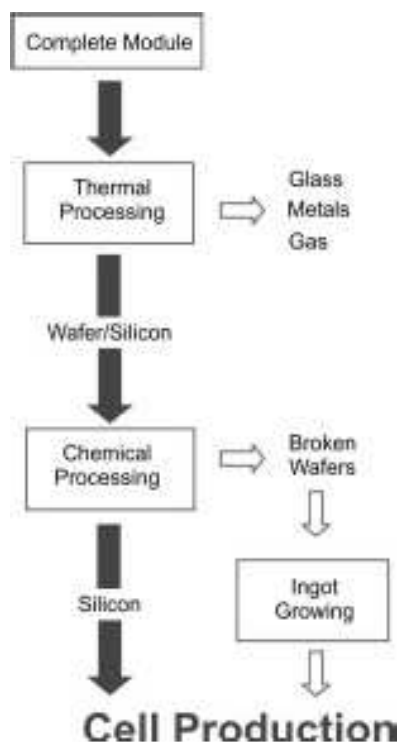


Fig. 3.1 Schema di riciclo SolarWorld

3.4.2 METODO FIRSTSOLAR PER MODULI IN FILM SOTTILE

Il metodo sviluppato da FirstSolar, grosso produttore di moduli fotovoltaici in film sottile si sofferma ovviamente sul possibile riciclo di moduli della medesima tipologia per ovvi interessi economici e di immagine visto che il pubblicizzare la possibilità di un completo riciclo dei propri prodotti può portare solamente ad un incremento dei volumi d'affari.

La procedura prevede le seguenti tappe, da eseguire ovviamente nella sequenza descritta [21]:

RACCOLTA: I moduli vengono raccolti e caricati in un tritatore che riduce i moduli in pezzi di grosse dimensioni.

FRAMMENTAZIONE: I pezzi così ottenuti vengono quindi ridotti alle dimensioni di circa 4-5 [mm] in due passi successivi.

RIMOZIONE FILM SEMICONDUCTORE: Il film semiconduttore viene rimosso mediante l'aggiunta di acido e perossido di idrogeno (acqua ossigenata) in un tamburo in acciaio inossidabile che ruota lentamente contenente appunto i pezzettini di modulo ed i reagenti aggiunti.

SEPARAZIONE SOLIDI-LIQUIDI: Il tamburo viene quindi svuotato lentamente in un classificatore dove viene separato appunto il vetro dal liquido mediante una semplice vite senza fine rotante verso l'alto, ovvero mediante una classica vite di Archimede.

SEPARAZIONE VETRO-MATERIALE LAMINATO: Un vaglio vibrante separa il vetro dai pezzi più grandi di materiale laminato (incluso comunque tra due strati di vetro).

RISCIACQUO DEL VETRO: Il vetro viene lavato per rimuovere eventuali residui di materiale semiconduttore che rimane fisicamente sul vetro; quindi il vetro così ripulito viene confezionato per il successivo riciclo.

PRECIPITAZIONE: Il liquido ricco di metallo viene pompato all'unità di precipitazione quindi i composti metallici vengono precipitati in tre fasi a pH crescente.

DISIDRATAZIONE/ESSICAZIONE: I materiali precipitati vengono concentrati in un apposito serbatoio. Il materiale semiconduttore grezzo così derivante viene confezionato per creare materiale semiconduttore da impiegare in nuovi moduli.

Quello riportato di seguito è lo schema pubblicizzato direttamente da FirstSolar in apposite brochure:

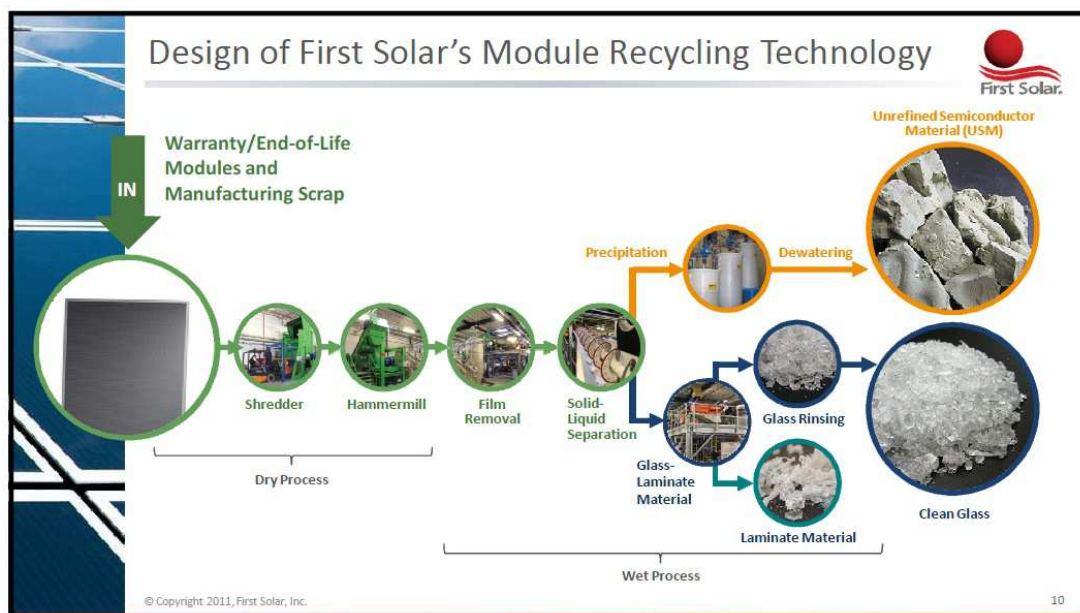


Fig. 3.2 Schema di riciclo FirstSolar

3.5 SVILUPPI FUTURI PER IL RICICLO

Ad oggi l'assenza di volumi consistenti di moduli fotovoltaici da trattare funge da freno verso un effettivo recupero e riciclo, SolarWorld di suo ha già sospeso i processi di riciclo, FirstSolar, stando a quanto afferma, sembra che li stia mantenendo attivi ma di sicuro a ritmi molto blandi.

Certamente in futuro si dovrà provvedere al ripristino, allo studio ed all'implementazione di nuove metodologie di trattamento dei moduli fotovoltaici, di qualsivoglia genere, in particolare i volumi che si verranno a creare, tra una decina d'anni almeno, verranno ad abbattere i costi di trattamento che oggi non vengono ripagati dal solo riciclo di vetro ed alluminio.

Entrambe le tecnologie esaminate consentono di giungere a buoni livelli di recupero delle materie prime impiegate nei moduli, con percentuali di recupero che si aggirano attorno al 90 %, tuttavia ciò che oggi non si riesce a recuperare con le tecnologie esistenti sono i materiali incapsulanti e di fondo del pannello.

L'incenerimento ovviamente ne provoca la distruzione con le relative emissioni di gas inquinanti che devono essere, come detto, appositamente trattati prima di essere liberati in atmosfera, d'altra parte il trattamento FirstSolar non consente comunque di recuperare tali materiali e bisogna provvedere in questo caso a trattare i reagenti anziché i fumi.

Il riciclo in futuro dovrà portare ovviamente a recuperare più materiale possibile dai moduli fotovoltaici, compatibilmente con processi più eco-compatibili di quanto non siano oggi, al fine di poter dichiarare "verde" pure la fase di dismissione dei moduli fotovoltaici e non solo la pura conversione fotovoltaica.

Riuscire a separare in maniera solida i materiali incapsulanti e di fondo senza causarne l'incenerimento o la dissoluzione in acido rappresenta di certo un passo in avanti non di poco verso un riciclo più efficiente.

Questi materiali così separati, che di fatto sono termoplastici, potranno essere quindi reintrodotti mediante processi termici in altri prodotti ovvero trattati opportunamente potranno essere impiegati come materiali isolanti in ambito edilizio.

Per poter asportare in forma solida questi materiali si dovranno mettere a punto tecnologie ad hoc ponendo l'attenzione d'altra parte verso i consumi, energetici ed economici in genere, in modo tale da rendere economicamente oltre che ecologicamente conveniente riciclare i moduli dismessi.

Oggi ciò non è giustificato purtroppo dal basso costo delle materie prime, in particolare il silicio in seguito alla forte espansione della produzione da parte di Paesi emergenti come la Cina, non giustifica economicamente il riciclo per il successivo reimpiego dello stesso mentre può ancora trovare senso il riciclo del vetro e dell'alluminio che impiegano peraltro metodologie più semplici e consolidate.

4 CONVERSIONE FOTOVOLTAICA

Alla base della produzione di energia elettrica mediante l'impiego dei moduli fotovoltaici sta il processo di conversione fotovoltaica secondo il quale l'energia posseduta dai fotoni che colpiscono il modulo viene convertita in energia elettrica mediante la produzione di una corrente continua che può essere prelevata dai morsetti del modulo stesso.

Il dispositivo elementare in grado di convertire l'energia solare in energia elettrica viene detto *Cella Fotovoltaica* proprio per il fatto di consentire tale conversione energetica, per ottenere tuttavia energia in quantità apprezzabili c'è bisogno di connettere opportunamente più celle formando un cosiddetto *Modulo (o Pannello) Fotovoltaico* o addirittura delle *Stringhe* costituite dall'interconnessione di più moduli.

L'ordine di grandezza della potenza che è possibile prelevare dai moduli o dalle stringhe di moduli varia quindi da poche centinaia di Watt fino a qualche milione di Watt in impianti particolarmente estesi ed opportunamente dimensionati.

4.1 EFFETTO FOTOVOLTAICO

L'effetto fotovoltaico venne per la prima volta notato da Edmond Becquerel (1820-1891) il quale lavorando con celle elettrolitiche con elettrodi in platino si accorse che l'intensità della corrente elettrica aumentava esponendo la cella alla luce solare e si rese pure conto che tale fenomeno dipendeva anche dal colore della luce incidente oltre che dalla relativa intensità.

Questi depositò nel 1839 all'Accademia delle Scienze di Parigi la sua "Memoria sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari" di fatto dando il via alla storia del fotovoltaico sebbene i costi ed i rendimenti iniziali ne restrinsero il campo di utilizzo e si dovette aspettare l'avvento dei semiconduttori prima che tale tecnologia potesse svilupparsi a pieno.

Fu Albert Einstein (1879-1955) a spiegare presentando un articolo scientifico nel 1905 la natura dell'effetto fotoelettrico in termini quantistici confermando la teoria di Max Planck (1858-1947) secondo il quale la radiazione elettromagnetica, anche quella luminosa, è costituita da parti elementari, i cosiddetti *quanti*.

Solamente nel 1954 venne prodotta la prima cella fotovoltaica in silicio monocristallino all'interno dei *Laboratori Bell* dagli scienziati Person, Fuller e Chapin costituendo la pietra miliare di quel che sono divenuti poi i moderni moduli fotovoltaici.

Il silicio necessario per la produzione delle celle fotovoltaiche sfruttanti tale materiale come supporto lo si riuscì ad ottenere in maniera efficiente e ad elevata purezza solamente in seguito al processo messo a punto da Jan Czochralski (1885-1953) e noto appunto con il nome dello stesso ricercatore ovvero come *Processo Czochralski*.

Senza voler scendere troppo nei dettagli della fisica che sta alla base della conversione fotovoltaica, si può comunque descrivere in maniera rapida e semplice ciò che succede in modo tale da chiarire ciò che avviene dentro ad ogni singola cella fotovoltaica, sia essa in silicio (mono o poli cristallino) sia in film sottile.

Si deve partire dalla descrizione delle caratteristiche fisiche ed elettriche dei materiali:

- Isolanti;
- Conduttori;
- Semiconduttori.

Nei materiali *isolanti* gli elettroni di valenza sono legati all'atomo ovvero non possono muoversi e quindi migrare se sottoposti ad un campo elettrico, ciò almeno fino a quando non avvenga la scarica nel dielettrico con conseguenze peraltro rovinose e non desiderabili.

Nei materiali *conduttori* invece gli elettroni di valenza sono poco legati all'atomo ovvero se sottoposti ad un campo elettrico questi sono liberi di seguire l'azione del campo e muoversi e migrare dando luogo ad una corrente elettrica.

Infine nei materiali *semiconduttori* gli elettroni di valenza sono vincolati all'atomo come negli isolanti ma la differenza di energia tra la banda di valenza e la banda di conduzione è molto esigua vale a dire

che se questi ricevono una quantità di energia tale da poter passare dalla banda di valenza a quella di conduzione allora possono muoversi liberamente come nei materiali conduttori.

L'energia necessaria agli elettroni per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione può essere fornita dall'esterno ad esempio dalla luce mediante l'effetto fotovoltaico determinando quindi la possibilità tecnica di avere a disposizione elettroni per la costituzione di una corrente elettrica.

Avendo a questo punto a disposizione gli elettroni per costituire una corrente elettrica, non si ha comunque un generatore elettrico visto che manca un attore in grado di mettere in moto, ordinato, questi elettroni, questo moto può essere imposto da un leggero campo elettrostatico.

Il campo elettrostatico necessario a mettere in moto gli elettroni liberati dall'effetto fotovoltaico si può generare mediante una semplice giunzione P-N, ovvero drogando in maniera opportuna il supporto di silicio mono o poli cristallino in modo tale da ottenere da un lato una zona drogata P, dall'altra una zona drogata N.

La fase di drogaggio consiste nell'introdurre nella struttura cristallina, in questo caso del silicio, delle impurità in percentuale molto bassa (qualche parte per milione) di tipo diverso dai due lati della cella in modo tale che da un lato vi sia la presenza di un certo tipo di impurità, dall'altro lato di un'altra.

Le impurezze inserite nel reticolo cristallino del silicio devono appartenere rispettivamente al terzo ed al quinto gruppo della tavola periodica degli elementi in modo tale da creare nelle due regioni, P ed N, affiancate tra loro un eccesso di lacune o viceversa un eccesso di elettroni.

Ponendo a contatto le due differenti strutture, e ciò si ottiene drogando il supporto in modo diverso dall'uno e dall'altro lato, si instaura una corrente elettronica di ricombinazione dovuta appunto alla differente concentrazione di cariche elettriche positive e negative.

Ai margini di questa zona di contatto, a seguito della corrente di ricombinazione, si viene a creare un campo elettrostatico orientato secondo la disposizione dei drogaggi P ed N mentre la zona interna, detta zona di svuotamento diviene elettricamente neutra a seguito della migrazione degli elettroni andati a ristabilire l'equilibrio elettrico.

Come in un normale diodo anche in questa particolare giunzione P-N se viene applicato un campo elettrico concorde con quello intrinseco si ha un allargamento della regione di svuotamento e pertanto non si potrà instaurare una corrente che possa attraversare tale regione, viceversa se si va ad applicare un campo che va ad annullare il campo elettrostatico intrinseco si potrà instaurare una corrente che attraversa la regione di svuotamento.

L'energia posseduta dai fotoni che colpiscono la cella, come detto, viene quindi rilasciata in parte agli elettroni del semiconduttore consentendo a questi di passare dalla banda di valenza a quella di conduzione, rendendoli disponibili per formare una corrente elettrica.

Illuminando la cella si creano quindi delle coppie lacuna-elettrone in entrambe le zone P ed N, a questo punto il campo elettrostatico intrinseco separa gli elettroni in eccesso e fa loro attraversare la regione di svuotamento portandoli verso la zona N non consentendo più il loro ritorno alla zona P dalla quale sono venuti.

La presenza del campo elettrostatico impedisce infatti agli elettroni di essere accelerati in senso contrario a tale campo per effetto di attrazione e repulsione delle cariche elettriche.

La figura riportata di seguito chiarisce il meccanismo appena descritto: [22]

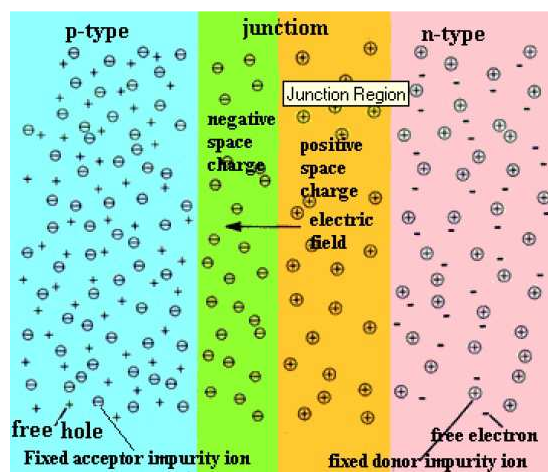


Fig. 4.1 Giunzione P-N di una cella fotovoltaica

Disponendo due elettrodi a contatto con le due diverse regioni, drogate in modo opposto, si riescono a catturare gli elettroni messi in moto dal campo elettrico intrinseco e se opportunamente connessi si può stabilire un circuito elettrico, esterno alla cella, che consentirà di sfruttare questa corrente elettrica per gli usi voluti.

L'elettrodo superiore dovrà ovviamente permettere alla radiazione luminosa di raggiungere la giunzione P-N, zona nella quale avviene di fatto la conversione energetica e pertanto sarà realizzato a forma di griglia in modo da poterne permettere l'illuminazione.

L'elettrodo inferiore invece potrà essere realizzato di qualsivoglia forma visto che non vi è la necessità di permettere l'attraversamento da parte della luce di questo, in genere è un sottile strato in materiale conduttore disposto sotto l'intera area della cella.

Richiuso il circuito elettrico infatti vi sarà un flusso elettronico che a partire dalla regione N, attraversando il circuito esterno, fluirà alla regione P e quindi verrà di nuovo fatto attraversare la regione di svuotamento dal campo elettrico intrinseco alla cella, se questa risulta illuminata.

Ovviamente per poter sfruttare in maniera adeguata le piccole correnti che si vengono a creare in una singola cella fotovoltaica ci sarà bisogno dell'interconnessione di più celle tra loro a formare un modulo fotovoltaico e/o di più moduli fotovoltaici tra loro a formare una stringa fotovoltaica.

Il materiale di supporto nel caso di cella fotovoltaica in silicio, sia esso mono o poli cristallino, è ovviamente il silicio del quale è costituita, il silicio presenta numero atomico 14 ovvero nella sua struttura atomica è caratterizzato dalla presenza di 14 elettroni dei quali 4 sono elettroni di valenza ovvero possono partecipare all'interazione con altri atomi presenti nelle vicinanze e se opportunamente eccitati possono passare in banda di conduzione.

Nei processi industriali oggi implementati, gli elementi usati per drogare il silicio sono di solito il Boro (terzo gruppo) per ottenere una struttura di tipo P, con eccesso di lacune, ed il Fosforo (quinto gruppo) per ottenere una struttura di tipo N, con eccesso quindi di elettroni.

La figura illustra ciò che di fatto avviene in un modulo fotovoltaico illuminato da radiazione luminosa: [22]

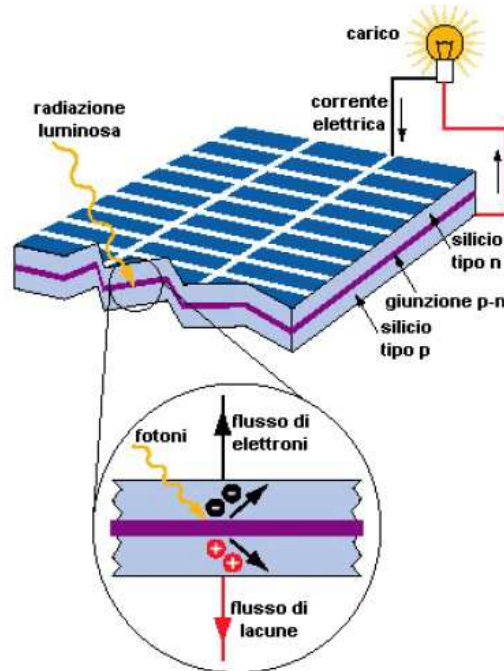


Fig. 4.2 Conversione fotovoltaica in un modulo illuminato dalla luce

Infine si può dire che il sistema può funzionare in due diversi modi: in isola o altrimenti detti *STAND ALONE* ovvero possono essere connessi alla rete elettrica detti *GRID CONNECTED* con la possibilità in quest'ultimo caso di poter vendere l'energia prodotta al distributore di energia elettrica se è previsto un tale tipo di contratto di scambio.

Gli impianti *Stand alone* risultano interessanti per applicazioni isolate dalla rete, in genere quindi localizzate lontano da possibilità di fornitura di energia elettrica mentre gli impianti *Grid connected*, che rappresentano la maggioranza degli impianti installati, presentano il notevole vantaggio economico derivante dalla possibilità di vendere l'energia prodotta in eccesso.

Per quanto riguarda il *Quarto Conto Energia*, come pure nei precedenti, si deve sottolineare che il decreto del Ministro dello Sviluppo Economico del 05/05/2011 [15], stando a quanto espressamente indicato al capoverso c3 dell'articolo 3, possono godere degli ecoincentivi riguardanti la produzione di energia elettrica da energia solare solamente gli impianti collegati in parallelo con il sistema elettrico ovvero *Grid connected*.

5 IL MODULO FOTOVOLTAICO

Punto di partenza per la produzione di energia elettrica dalla radiazione luminosa è la conversione fotovoltaica ovvero la conversione dell'energia posseduta dai fotoni in energia elettrica, con le relative grandezze caratteristiche elettriche di tensione e corrente.

Per fare ciò si fa ricorso al cosiddetto modulo fotovoltaico, esso può essere di natura diversa per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche (rigido o flessibile), fisiche (al silicio o basato su altri materiali semiconduttori) ma ciò che accomuna tutti i moduli è l'esigenza di essere connessi opportunamente in modo da poter fornire all'inverter o ai carichi elettrici applicati direttamente adeguati valori di tensione e corrente.

I moduli fotovoltaici, visti i volumi di mercato si possono considerare essenzialmente di due tipologie mentre altre tecnologie più recenti occupano volumi di mercato nettamente minori, queste due tipologie sono essenzialmente:

- MODULI IN SILICIO CRISTALLINO (MONO/POLI CRISTALLINO);
- MODULI IN FILM SOTTILE (a-Si, CdTe,CIGS,...).

Questi due tipi di moduli fotovoltaici occupano due fette di mercato molto differenti tra loro, in particolare la prima delle due, nel 2010 ha rappresentato circa l'80% dei moduli prodotti globalmente mentre il rimanente 20% viene suddiviso essenzialmente tra moduli in film sottile (silicio amorfo e Telloruro di Cadmio) e moduli CIGS (Diseleniuro di Rame-Indio-Gallio),appartenenti comunque alla famiglia dei moduli in film sottile.

È vero che il mercato è stato dominato negli ultimi trent'anni dalla tecnologia del silicio cristallino ma negli ultimi tempi sono giunte alla ribalta tecnologie innovative che stanno lentamente limando quote di mercato a questa tecnologia produttiva ormai considerabile matura.

Viceversa nuove tecnologie per la produzione di moduli fotovoltaici, pur presentando caratteristiche peggiori, hanno margini di miglioramento nettamente superiori, almeno potenzialmente.

Sostanzialmente la produzione di moduli in silicio monocristallino e policristallino è sostanzialmente equivalente sebbene le celle in silicio policristallino stanno guadagnando importanti quote di mercato sul silicio cristallino, più costoso.

I volumi prodotti storicamente e le previsioni future si possono riscontrare nel grafico di seguito riportato, si vede come sia previsto tra l'altro un aumento della quota di mercato da parte del film sottile a scapito del silicio cristallino: [11]

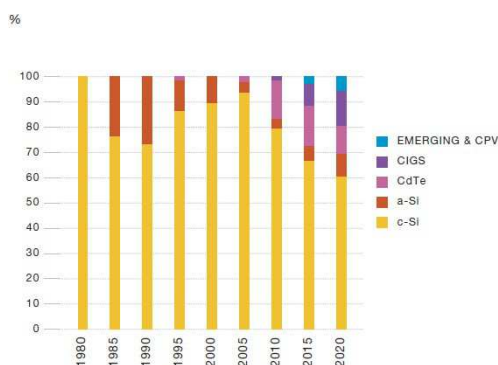


Fig. 5.1 Produzione annuale di moduli fotovoltaici

Si può facilmente notare come i moduli in silicio cristallino rappresentino la netta maggioranza sebbene la tecnologia in film sottile permetta impieghi altrimenti impossibili con la prima delle due tecnologie potendo realizzare dei moduli flessibili e non solamente rigidi come nel primo caso.

Si vuole peraltro fornire una semplice descrizione di entrambe le tecnologie oggi maggiormente diffuse sul mercato, altre tecnologie emergenti non verranno analizzate essenzialmente per i ristretti volumi di mercato e per la loro relativa bassa diffusione.

I diversi tipi di cella presentano caratteristiche fisiche ed elettriche diverse, oltre ovviamente ad avere costi diversi dettati dai relativi processi di produzione e dai costi delle materie prime impiegate pertanto dal punto di vista economico varrà la pena considerare diversi tipi di cella a seconda che l'impianto da installare goda o meno di incentivazioni statali sull'energia effettivamente prodotta. I rendimenti dei diversi tipi di cella e di moduli fotovoltaici commercializzati sono riportati nella tabella seguente: [11]

Commercial Module Efficiency

Technology	Thin Film					Crystalline Silicon		CPV
	(a-Si)	(CdTe)	Cl(G)S	a-Si/ μ c-Si	Dye s. cells	Mono	Multi	III-V Multi-junction
Cell efficiency	4-8%	10-11%	7-12%	7-9%	2-4%	16-22%	14-18%	30-38%
Module efficiency						13-19%	11-15%	~25%
Area needed per KW (for modules)	~15m ²	~10m ²	~10m ²	~12m ²		~7m ²	~8m ²	

source: EPA 2010. Photon International, March 2010, EPA analysis. Efficiency based on Standard Test conditions.

Fig. 5.2 Rendimenti dei moduli fotovoltaici in commercio

La tabella riporta pure l'area necessaria da impiegare con le diverse tipologie di modulo fotovoltaico per ottenere una potenza elettrica pari ad 1 [kW] in condizioni standard; com'è ovvio serve un'area maggiore al diminuire dell'efficienza della cella e del rispettivo modulo.

5.1 IL MODULO CRISTALLINO

Il modulo cristallino rappresenta, come detto, la maggior parte della produzione attuale e passata di moduli fotovoltaici, è stata di fatto la prima tecnologia a svilupparsi e proprio in ragione di questo fatto la si può ormai considerare una tecnologia matura sebbene vi siano ancora alcuni margini di miglioramento.

All'interno di questa tipologia si possono distinguere due diverse famiglie di celle fotovoltaiche caratterizzate dal modo di cristallizzazione del silicio stesso:

- SILICIO MONOCRISTALLINO;
- SILICIO POLICRISTALLINO (O MULTICRISTALLINO).

Pur differendo per il particolare procedimento di solidificazione del silicio fuso, entrambe le tecnologie prevedono la formazione di lingotti circa del diametro della cella, attorno ai 15-16 [cm], i quali vengono in seguito tagliati in direzione trasversale a lamine dello spessore delle singole celle e cioè circa 300 [μ m].

Questi moduli sono caratterizzati dal fatto che presentando un supporto rigido devono per forza di cosa assumere una consistenza rigida ovvero planare visto che le celle fotovoltaiche sono sottili lamine degli originali lingotti di silicio.

5.1.1 SILICIO MONOCRISTALLINO

Le celle in silicio monocristallino vengono chiamate così poiché la cella viene realizzata con silicio cristallizzato secondo un'unica orientazione, alla vista quindi la cella appare di un colore grigio scuro uniforme poiché se ne vede solamente una sezione omogenea del reticolo cristallino.

Il silicio infatti una volta fuso viene fatto solidificare seguendo un seme di partenza che viene fatto ruotare ed estratto a velocità opportuna dal silicio fuso; attorno a questo seme quindi cresce il lingotto e questo cristallo che si viene a formare segue questa orientazione preferenziale, salvo difetti di cristallizzazione peraltro possibili.

La forma del lingotto è circolare ed al fine di una migliore collocazione delle celle all'interno del singolo pannello queste necessitano di essere tagliate in modo tale da ottenere celle pressoché quadrate con gli spigoli arrotondati, si riesce al contempo a recuperare la maggior area possibile a partire dalla sezione circolare del lingotto.

Nella figura seguente si può vedere una cella fotovoltaica in silicio monocristallino ed il modulo fotovoltaico che ne deriva:

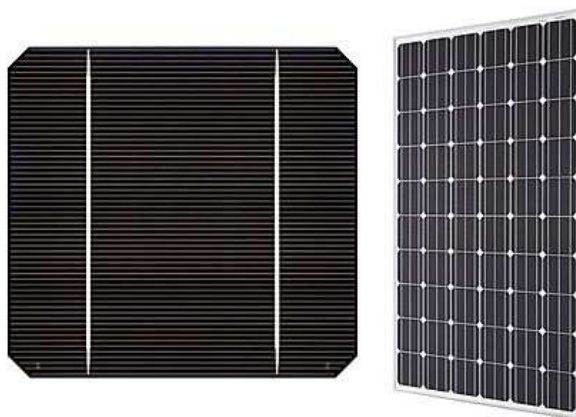


Fig. 5.3 Cella fotovoltaica in silicio monocristallino e relativo modulo fotovoltaico

Si notano subito gli spigoli arrotondati caratteristici delle celle in silicio monocristallino dovuti all'originale forma circolare del lingotto di provenienza, questa caratteristica permette una rapida distinzione dalle celle policristalline dalle sorelle in silicio policristallino.

Le celle in silicio monocristallino presentano modalità produttive più complesse rispetto alle celle in silicio policristallino per via della necessità di solidificare secondo un'orientazione definita e quindi vengono ad avere costi maggiori, tuttavia presentano caratteristiche elettriche migliori, come già evidenziato dalla tabella di confronto sopra riportata.

Nel caso in cui l'impianto sia remunerato attraverso incentivi statali, quali quelli odierni che premiano la reale produzione di energia elettrica, converrà considerare un iniziale investimento economico maggiore che però in virtù del maggiore rendimento delle celle in silicio monocristallino possono comportare una produzione elettrica maggiore e quindi un recupero dell'investimento effettuato in tempi più brevi con conseguente maggior guadagno a parità di durata degli incentivi, previsti di vent'anni [15].

5.1.2 SILICIO POLICRISTALLINO (O MULTICRISTALLINO)

Le celle in silicio policristallino vengono ottenute mediante la solidificazione di silicio fuso in appositi crogioli dalla forma rettangolare, la solidificazione senza una direzione predefinita porta alla formazione di più cristalli con orientazione diversa a seconda della formazione dei diversi centri di solidificazione.

Alla vista quindi la cella in silicio policristallino appare di colore essenzialmente grigio con riflessi bluastri più o meno intensi a seconda della direzione del cristallo ovvero della provenienza della luce che la illumina, questi riflessi sono dati però dal trattamento anti-riflesso effettuato a posteriori.

Inoltre la loro forma perfettamente quadrata e quindi la loro disposizione su di un modulo consente di ricoprire praticamente tutta l'area del pannello senza lasciare aree scoperte e quindi non produttive.

In questo caso quindi il modulo in silicio policristallino appare essenzialmente di colore grigio con riflessi bluastri caratteristici della diversa orientazione dei cristalli di silicio, l'area del modulo invece è pressoché totalmente coperta dalle celle fotovoltaiche senza buchi come nel caso del modulo in silicio monocristallino.

Anche in questo caso la figura mostra la cella fotovoltaica in silicio policristallino ed il relativo modulo fotovoltaico derivante dall'assemblaggio di più celle:



Fig. 5.4 Cella fotovoltaica in silicio policristallino e relativo modulo fotovoltaico

Pur essendo caratterizzate da rendimento elettrico inferiore, con le celle in silicio policristallino si riesce a coprire meglio l'area del modulo fotovoltaico e quindi a parità di dimensioni del modulo si riesce a recuperare un po' in termini di energia prodotta.

Pur considerando questo vantaggio dalla copertura pressoché totale dell'area del modulo si ha comunque una produzione specifica, ovvero per metro quadrato, inferiore rispetto ai moduli in silicio monocristallino.

Il vantaggio di montare questo tipo di moduli va ricercato quindi sul fattore prezzo, non necessitando di accorgimenti complessi come nel caso del silicio monocristallino si riescono a contenere i costi di produzione riuscendo quindi a mettere sul mercato moduli a prezzo inferiore.

Di fatto negli ultimi anni si è riscontrata un'essenziale parità tra le quote di mercato suddivise tra il mono ed il policristallino, si prevede invece che in futuro ci sarà un incremento della quota del silicio multi cristallino più economico e sul quale vi sono peraltro margini di miglioramento più ampi rispetto al monocristallino.

5.2 IL MODULO IN FILM SOTTILE

I moduli in film sottile sono caratterizzati dal fatto che il materiale semiconduttore nel quale avviene la conversione fotovoltaica viene depositato su di un supporto che può essere pressoché di qualsiasi natura.

Si possono quindi realizzare moduli in film sottile sia rigidi che flessibili, a seconda che il materiale sul quale viene depositato il semiconduttore sia rigido ovvero flessibile (in genere nastri) e pertanto i campi di applicazione sono i più disparati.

La deposizione del materiale semiconduttore avviene in spessori di pochi micrometri e pertanto i costi in termini di materiale semiconduttore si abbassano drasticamente passando di fatto da uno spessore di circa 300 [μm] di una classica cella in silicio ad uno spessore più di cento volte inferiore nei moduli in film sottile.

I moduli in film sottile impiegano materiali semiconduttori di diverso tipo, ad esempio:

- SILICIO AMORFO (a-Si);
- TELLORURO DI CADMIO (CdTe);
- ARSENIURO DI GALLIO (GaAs);
- DISELENIURO DI INDIO-RAME-GALLIO (CIGS).

e vi sono poi ulteriori tipologie di celle fotovoltaiche ma visti i ridotti volumi di mercato non saranno analizzate né menzionate.

Visivamente i moduli in film sottile si possono distinguere per il fatto che il colore risulta essere estremamente omogeneo essendo il materiale semiconduttore depositato superficialmente e quindi

ottenendo un'estrema uniformità, i contatti elettrici responsabili della cattura degli elettroni liberati dalla conversione fotovoltaica si estendono su tutto il modulo.

Vi è quindi l'assenza di celle fotovoltaiche interconnesse tra loro, semplicemente la parte attiva del modulo risulta essere l'area sulla quale vi è la deposizione del semiconduttore, in genere quasi tutto il modulo salvo eventualmente una piccola cornice esterna.

I moduli di questo tipo trovano largo impiego nei prodotti di largo consumo come le calcolatrici "a raggi solari" in ragione della semplicità con la quale si riescono a realizzare piccoli dispositivi da applicare poi ai dispositivi elettronici più disparati, addirittura carica-batterie per cellulari.

I supporti sui quali può essere depositato il semiconduttore, cuore della conversione fotovoltaica, possono essere tra i più disparati, si va da materiali plastici al classico vetro ad altri materiali ancora, potendo ottenere moduli fotovoltaici molto diversi dai classici rettangolari, ad esempio integrati in tegole per tetti o in supporti flessibili.

L'immagine seguente mostra un esempio di modulo in film sottile, su classico modulo rettangolare e su nastro flessibile:



Fig. 5.5 Modulo in film sottile su supporto classico e su nastro flessibile

Il segmento del mercato nel quale si possono inserire quindi i moduli in film sottile risulta essere in parte diverso da quello dei moduli in silicio cristallino, si prevede tra l'altro una copertura del mercato per una quota pari al 40% entro il 2020.

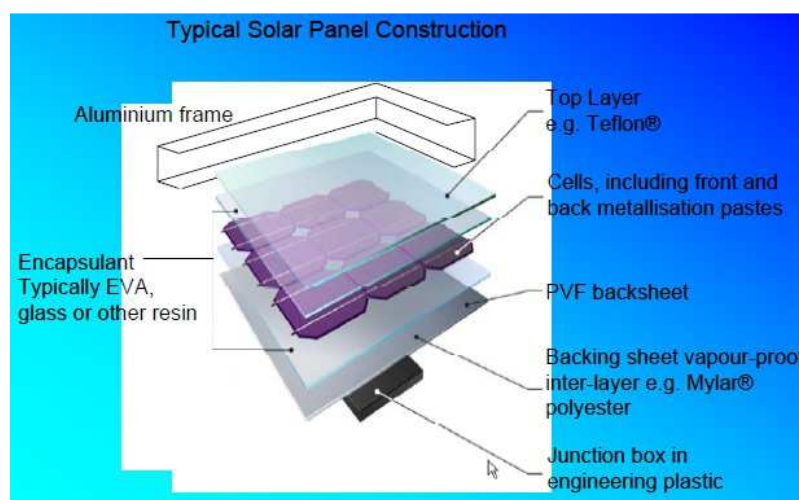
6 IL MODULO CRISTALLINO

Un'analisi preliminare di un modulo fotovoltaico può essere svolta dal punto di vista fisico analizzando i vari componenti costituenti il modulo stesso, nel caso specifico si analizzerà un modulo cristallino essendo oggetto di studio di questo lavoro di tesi.

I componenti di un modulo fotovoltaico in silicio cristallino, a partire dal lato superiore (esposto alla radiazione solare) e proseguendo verso il basso, si possono riassumere in:

- Alluminio (Cornice esterna);
- Vetro o strato superficiale in altro materiale;
- Incapsulante;
- Contatto superiore in pasta d'argento;
- Cella fotovoltaica;
- Contatto inferiore in pasta d'argento;
- Incapsulante;
- Vetro o Backsheet;
- Casseta di connessione elettrica o junction box;

L'immagine riportata di seguito mostra chiaramente la collocazione dei vari componenti costituenti nell'insieme il modulo fotovoltaico: [23]



1. Fig. 6.1 Composizione di un modulo fotovoltaico in silicio cristallino

Nella figura si nota che lo strato superiore è indicato con il termine di Top Layer, in genere esso è realizzato in vetro vista la resistenza meccanica che dev'essere garantita nei confronti degli agenti atmosferici quali grandine e neve.

Questi componenti occupano in percentuali diverse l'intera massa del modulo, si possono considerare brevemente i seguenti ordini di grandezza: [24]

Component	Symbol	kg	%
Glass		17,024	76,000
Frame	Al	2,464	11,000
Polymers		1,501	6,700
Copper	Cu	0,150	0,670
Silver	Ag	0,001	0,005
Tin	Sn	0,002	0,010
Lead	Pb	0,001	0,003
Silicon	Si	0,500	2,230
Junction box		0,269	1,200

Fig. 6.2 Composizione percentuale di un modulo in silicio cristallino

Come si vede chiaramente i materiali che costituiscono in percentuale maggiore il modulo fotovoltaico sono:

- Vetro 76%
- Alluminio 11%
- Polimeri 6,7%
- Silicio 2,23%

Ha senso considerare il riciclo dei materiali sopracitati se non altro per la percentuale dell'intero modulo che essi costituiscono, circa il 96%, si riesce così a ricavare il maggiore profitto da un'eventuale vendita dei materiali recuperati e si riduce al contempo il volume del materiale da smaltire come rifiuto non riciclabile.

I materiali che comunque non si riuscissero a recuperare possono essere impiegati per usi meno nobili ma non per questo meno importanti ad esempio per coibentazioni in ambito edilizio, viceversa sarebbero destinati allo smaltimento in discarica o diversamente in termovalorizzatori.

6.1 MATERIALI IMPIEGATI

Si possono brevemente analizzare i vari materiali impiegati in modo da avere un quadro più chiaro anche per quanto riguarda l'eventuale riciclaggio successivo degli stessi, trattati singolarmente:

6.1.1 VETRO

Il vetro rappresenta in percentuale di massa, rispetto all'intero modulo, la parte preponderante e vista l'ormai consolidata tecnologia nel riciclaggio dei materiali vetrosi sarà importante il recupero del vetro separato dagli altri materiali in modo da poterlo inviare presso i centri usuali adibiti al riciclaggio del vetro.

D'altra parte il vetro risulta essere intimamente legato al resto del modulo in quanto durante la produzione del modulo stesso esso viene fatto aderire alle celle fotovoltaiche ed al materiale di fondo (backsheet) attraverso fogli di materiale incapsulante appositamente riscaldato che una volta raffreddato funge da legante molto resistente tanto da impedire eventuali fessurazioni del modulo e quindi il distacco tra vetro e base del modulo.

Il vetro impiegato nei moduli fotovoltaici deve presentare eccellenti qualità ottiche quali la trasparenza, l'assenza di impurità inglobate nella massa vetrosa ed una buona resistenza agli agenti atmosferici siano essi chimici (piogge acide, inquinanti nell'aria,ecc) o siano essi fisici (neve, grandine,ecc).

Tutte queste qualità fanno sì che il modulo possa convertire la maggiore quantità possibile di radiazione luminosa in energia elettrica evitando dispersioni o riflessioni dovute ad eventuali impurità presenti nel vetro stesso e possa resistere agli inevitabili attacchi chimici e fisici ai quali esso verrà sottoposto nel corso della propria vita operativa stimata in almeno 20-25 anni.

Nello specifico si tratta di vetro temperato, ultrachiaro ed a bassissimo contenuto di ferro e piombo che eventualmente può essere trattato per ottenere una superficie a buccia d'arancia al fine di migliorare l'assorbimento della radiazione luminosa ed evitarne dispersioni per riflessione.

6.1.2 ALLUMINIO

Pur rappresentando una percentuale in massa nettamente inferiore rispetto al vetro, l'alluminio gode di un mercato affermato alle spalle e quindi di un valore notevolmente superiore e ad oggi questo è forse l'unico materiale che ha economicamente senso recuperare per poi avviarlo al riciclaggio visto che per i materiali che seguiranno ciò non si potrà più affermare, in generale.

D'altra parte ha senso il recupero se non altro dell'alluminio poiché esso rappresenta la cornice del modulo stesso ed è quindi la parte del modulo più facile da staccare dal resto del pannello senza comportare costi e procedure onerosi.

Il riciclo inoltre dell'alluminio risulta essere molto vantaggioso anche in termini energetici visto che per produrre 1 [kg] di alluminio a partire da scarti dello stesso serve meno di 1 [kW], contro i 13-14 [kW] necessari partendo dal minerale (bauxite).

Innumerevoli i futuri impieghi dell'alluminio, materiale che gode pure esso di una filiera di riciclo assai consolidata visti i prezzi sempre più alti anche sul mercato internazionale note le buone qualità meccaniche di leggerezza, resistenza agli agenti atmosferici e le eccellenti qualità elettriche che lo vedono sempre più spesso valido sostituto del ben più caro rame.

Nei moduli fotovoltaici esso viene impiegato essenzialmente per le relative proprietà fisiche e meccaniche, la leggerezza innanzitutto visto che per motivi vari il pannello deve risultare leggero per poter essere agevolmente installato sui tetti delle abitazioni o su telai idonei allo scopo.

La resistenza agli agenti atmosferici ne garantisce e ne preserva poi la struttura per l'intero arco della vita operativa, evitando che si formino fessurazioni nelle quali si può eventualmente infiltrare acqua o altri agenti corrosivi.

Non vengono invece sfruttate le relative proprietà elettriche di buon conduttore in quanto non partecipa al processo di conversione fotovoltaica, il fatto che il telaio sia a contatto con il potenziale di terra fa sì che il modulo si trovi con la cornice a livello equipotenziale con il terreno, cosa peraltro non rilevante.

6.1.3 SILICIO

Le celle fotovoltaiche pur essendo il cuore pulsante della conversione energetica e di fatto l'unica parte attiva del componente, rappresentano in percentuale sulla totale massa del modulo una quota davvero esigua visti gli spessori sempre minori che queste assumono al fine di contenere i costi totali del modulo.

Con l'avvento della produzione di massa da parte di Paesi emergenti come la Cina il costo del silicio e dei relativi derivati, ovvero le stesse celle, hanno subito un drastico crollo dei prezzi che ad oggi non giustifica economicamente il riciclo delle celle fotovoltaiche.

Si deve ricordare che al fine di non avere infiltrazioni di aria, acqua o quant'altro le celle vengono incapsulate tra vetro e foglio di backsheet (o eventualmente di nuovo vetro nel caso di moduli impiegati per applicazioni particolari) e tale processo risulta essere il più critico da investire nel momento in cui si voglia disassemblare il modulo per il successivo riciclo.

Particolarmente difficoltosa risulta infatti essere, almeno allo stato attuale, la separazione delle celle fotovoltaiche dal resto del modulo poiché il materiale incapsulante, essenzialmente EVA (Etilen Vinil Acetato), dopo il processo di laminazione a caldo viene ad eliminare tutte le cavità d'aria presenti tra vetro e celle ma al contempo nel fare ciò va pure ad incollarsi alle celle unendole quindi al vetro da una parte ed al foglio di backsheet dall'altra.

Diversi brevetti sono depositati per quanto riguarda il riciclo di celle fotovoltaiche essenzialmente basati su trattamenti chimici tali da riportarle allo stato di silicio per essere quindi triturate e rifuse in nuovi lingotti e riprendere il ciclo di produzione delle celle.

Come detto però i prezzi sul mercato delle celle fotovoltaiche non giustificano l'impiego di tali tecnologie in modo standardizzato, si può quindi dire che i brevetti ad oggi siano depositati senza il fine di applicarli a livello industriale.

6.1.4 ARGENTO

Presente in percentuale davvero molto esigua (0,005%) e non giustificante di fatto ad oggi, da solo, un processo di riciclo di tale materiale, gode però di un valore sul mercato molto elevato, essendo di fatto legato alla quotazione dell'oro nei mercati internazionali.

Un suo riciclo potrà d'altra parte essere giustificato e potrà raggiungere costi minori in futuro in previsione di un maggior volume di moduli fotovoltaici da riciclare e di una sempre crescente quotazione del materiale nelle borse di scambio.

Esso costituisce i contatti a griglia della faccia esposta alla radiazione luminosa della cella fotovoltaica ed almeno in parte anche della faccia non esposta, tale materiale viene impiegato per le eccellenti qualità elettriche visto che data la sua conducibilità è in grado di catturare facilmente gli elettroni liberati durante la conversione energetica da luminosa ad elettrica.

Non vi sono attualmente sul mercato materiali con caratteristiche elettriche paragonabili e volendo spingere l'efficienza dei moduli il più possibile non è concepibile sostituire tale materiale con qualunque altro sebbene siano allo studio moduli con contatti a base di rame, dal prezzo ovviamente inferiore.

6.1.5 INCAPSULANTE (EVA)

Il materiale incapsulante rappresenta di certo, in termini di massa, una percentuale davvero esigua (6,7% considerando tutti i polimeri presenti), al limite difficile da quantificare ma per l'oggetto della tesi riveste un'importanza davvero degna di riguardo.

In genere come incapsulante vengono utilizzati fogli di EVA, acronimo che sta per Etilene Vinil Acetato (Ethylene Vinyl Acetate), che nel processo di laminazione a caldo, riscaldandosi appunto, vanno ad occupare tutte le intercapedini che si formano tra la cella ed il vetro sovrastante e tra la cella ed il materiale di backsheet.

Punto fondamentale per l'oggetto di tesi è determinare se questo materiale, del quale i dati sono difficilmente reperibili visti i numerosi brevetti industriali vigenti sullo stesso, si possa riscaldare per perdite dielettriche in opportuni forni a radio-frequenza al fine di poterlo portare ad una temperatura di rammollimento tale da facilitare la successiva separazione meccanica delle celle e dal vetro e dal materiale di backsheet.

Fisicamente, allo stato vergine ovvero prima di essere laminato nel modulo, si presenta come un sottile foglio semitrasparente mentre al tatto si presenta morbido e gommoso.

6.1.6 MULTISTRATO TERMOPLASTICO (di vario tipo)

Salvo casi eccezionali, essenzialmente per uso architettonico, il materiale di fondo del modulo fotovoltaico può essere di diverso tipo, visti inoltre gli sviluppi tecnologici in fatto di materiali impiegati.

Storicamente si è impiegato un materiale polimerico non trasparente prodotto dalla DuPont® e noto con il nome commerciale di Tedlar®, in seguito invece, probabilmente anche per ovviare ai costi ed alle limitazioni imposti dai brevetti industriali si sono cominciati ad impiegare e si impiegano a tutt'oggi altri materiali multistrato sempre a base di polimeri termoplastici.

Ad esempio uno dei materiali da noi analizzati è un materiale multistrato costituito da un primo strato (lato cella) costituito da uno speciale materiale o addirittura direttamente EVA atto a facilitare l'adesione del foglio di EVA su di esso, quindi un adesivo per incollarlo allo strato intermedio di PET (Poli Etilene Tereftalato), un secondo strato di adesivo ed infine un ultimo strato di PET di colore diverso a seconda del colore voluto (in genere bianco ma anche nero o trasparente).

Questo materiale multistrato viene prodotto attraverso appositi laminatoi che assemblano, scaldano e quindi pressano i materiali costituenti per poi fornire ai produttori di moduli fotovoltaici bobine da centinaia di metri del materiale già pronto per l'impiego nei moduli.

Assume particolare interesse l'analisi di un possibile riscaldamento per perdite dielettriche pure di questo materiale al fine di ottimizzare quello che sarà alla fine il processo di de-laminazione del pannello fotovoltaico.

6.1.7 POLIMERI VARI (Junction box)

Di fatto è la cassetta nella quale avvengono le connessioni elettriche tra i terminali del modulo fotovoltaico ed i cavi di collegamento che vanno dal pannello all'inverter; vista la durata temporale che essa dovrà garantire viene realizzata in materiale plastico ed a seconda del materiale specifico costituente può essere facilmente separata dal resto del modulo ed avviata ad un ciclo di recupero adeguato.

La rimozione dal pannello di questo dispositivo risulta essere abbastanza agevole essendo fissata all'esterno dello stesso e non essendo quindi sottoposta a processi che la rendano intimamente aderente al resto del modulo, il tutto sarà eventualmente agevolato mediante l'impiego di solventi.

A seconda della qualità del modulo trattato possono essere presenti eventuali diodi di by-pass del modulo stesso al fine di non compromettere la produzione dell'intera stringa nella quale il modulo risultava essere installato, questi diodi è bene che siano trattati a parte secondo lo schema RAEE.

Nel caso in cui non fosse possibile una successiva polimerizzazione per un riciclo vero e proprio può comunque essere macinata ed impiegata in edilizia come materiale isolante direttamente o in appositi pannelli.

6.2 DIMENSIONI E SPESSORI

Appurato che la cornice di alluminio e la cassetta di connessione elettrica possono essere rimosse in maniera agevole all'inizio del processo di riciclo dei moduli, occorre analizzare ciò che rimane del pannello originariamente considerato.

Il modulo rimane costituito a questo punto solamente dai materiali laminati in sede di produzione ovvero procedendo dall'alto da vetro, eva, celle fotovoltaiche, eva e foglio di backsheet; schematicamente lo si può immaginare come riportato di seguito:

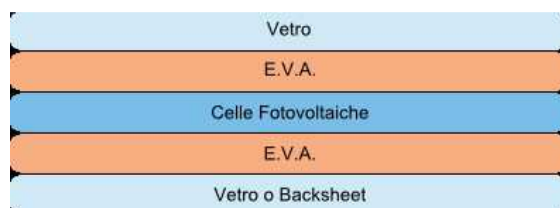


Fig. 6.3 Stratificazione di un modulo in silicio cristallino

I diversi componenti occupano, nella sezione, spessori diversi, in particolare si può affermare grosso modo le dimensioni caratteristiche sono circa le seguenti:

- Vetro	3	[mm];
- Eva	200-1100	[μ m];
- Celle fotovoltaiche	150-300	[μ m];
- Eva	200-1100	[μ m];
- Backsheet	350	[μ m].

Leggendo i numeri riportati si capisce quindi che l'immagine risulta essere parecchio fuori scala, in particolare mentre il vetro da solo occupa circa 3 [mm], i rimanenti materiali occupano uno spessore che va da circa 1 [mm] a quasi 3 [mm], al massimo quindi lo spessore viene occupato per metà dal vetro e per l'altra metà dai rimanenti materiali.

Parlando in termini pratici si capisce subito che si ha a che fare con spessori esigui di materiale ed inoltre si ha una differenza abbastanza evidente tra lo spessore del vetro e quello dei rimanenti materiali.

Una separazione meccanica che abbia cura di distinguere i diversi materiali costituenti risulta essere parecchio difficoltosa, ad oggi addirittura non realizzabili in termini economici accettabili visto che con il metodo di riciclo Deutsche Solar® i materiali polimerici vengono inceneriti.

La messa a punto di una tecnologia che permetta la separazione efficiente dei diversi strati, ciascuno trattato singolarmente è di certo quanto di più auspicabile si possa pensare benché ciò sia molto difficile da realizzare fisicamente.

Se non una separazione netta di tutti i materiali almeno la possibilità di poter raccogliere separatamente il vetro dalle celle fotovoltaiche ancora dai materiali polimerici impiegati come incapsulanti e come foglio di fondo risulta essere un ottimo traguardo.

Ciò permetterebbe infatti di poter avviare il vetro al relativo processo di riciclo, così come per l'alluminio separato precedentemente, le celle fotovoltaiche ad un trattamento pure designato ad hoc ed infine i materiali termoplastici ricavati a cicli di trattamento adeguati ovvero all'impiego come isolanti o per altri scopi ancora.

6.3 ASSEMBLAGGIO DEI MODULI CRISTALLINI

Senza scendere nel dettaglio della produzione dei vari materiali impiegati nel modulo in silicio cristallino, di seguito si analizzerà la produzione o meglio l'assemblaggio di questi materiali per ottenere il modulo finito e pronto per essere installato.

Il modulo cristallino viene prodotto facendo aderire tra loro gli elementi base descritti in precedenza, prestando attenzione che non rimanga aria ovvero alcuna impurità tra i vari strati costituenti, pena la possibilità del verificarsi di fessurazioni nel modulo con la conseguente riduzione di vita del modulo stesso.

L'adesione dei vari strati è garantita, come accennato, da fogli di EVA che fungono sia da collante, sia da riempitivo; i moduli infatti vengono pressati da apposite presse riscaldate che danno al modulo la pressione necessaria per far uscire eventuale aria imprigionata tra i vari strati e il calore necessario a rammollire l'EVA.

Tale processo avviene in apposite presse che oltre a fornire la pressione tale da far aderire i vari strati costituenti provvedono alla creazione del vuoto, mediante apposita camera, in modo tale da agevolare ancora una volta la fuoriuscita dell'aria dal modulo.

Una volta raggiunta infatti la temperatura di rammollimento dell'EVA questa assume una consistenza tale da poterle permettere di riempire tutte le cavità d'aria eventualmente presenti, il tutto grazie alla pressione che viene esercitata tra gli strati costituenti il modulo ed il vuoto creato appositamente.

Quindi, una volta lasciati raffreddare, i moduli divengono di fatto un corpo unico con l'ausilio esterno della cornice in alluminio che ne facilita il montaggio e l'installazione mentre l'apporto alla consistenza meccanica del modulo stesso risulta essere davvero esigua.

7 RISCALDAMENTO PER PERDITE DIELETTRICHE

Il riscaldamento per perdite dielettriche è una particolare tipologia di riscaldamento elettrico ad alta frequenza basato sull'effetto termico che si manifesta nella massa di un materiale dielettrico sottoposto all'azione di un campo elettrico ad alta frequenza. [25]

Tale effetto è dovuto a fenomeni di polarizzazione relativi agli spostamenti microscopici delle cariche elettriche, legate ai relativi atomi, ed al passaggio diretto di correnti di conduzione che si manifestano in presenza di cariche libere che si manifestano sotto l'effetto del campo stesso.

Nei materiali dielettrici tuttavia si ha quasi sempre bassa conducibilità sicché si può trascurare la componente dovuta alle correnti di conduzione mentre si devono considerare gli spostamenti microscopici dovuti al tentativo, da parte delle cariche legate, di seguire il campo elettrico ad alta frequenza imposto dall'esterno.

Il processo elettrotermico di riscaldamento per perdite dielettriche consente di riscaldare direttamente il materiale dielettrico infatti i materiali dielettrici sono quasi tutti caratterizzati anche da bassa conducibilità termica ovvero volendo riscaldare questo tipo di materiali dall'esterno con tecnologie classiche servirebbero tempi notevoli con i relativi oneri economici.

Inoltre si correrebbe il rischio di ottenere un profilo termico molto pericoloso con la superficie che va a riscaldarsi molto, al limite troppo, mentre il cuore potrebbe anche non raggiungere la temperatura voluta.

Il riscaldamento per perdite dielettriche invece consente di riscaldare direttamente il materiale dielettrico pressoché in maniera uniforme agendo su tutta la massa del dielettrico stesso provocando gli spostamenti microscopici delle cariche elettriche, prima descritti, essenzialmente in tutto il materiale.

Un altro vantaggio che si riscontra sta nella durata del processo con questo tipo di riscaldamento, non dovendo attendere transitori termici dovuti alla conduzione del calore dall'esterno verso l'interno ma andando a scaldare direttamente tutta la massa di dielettrico questi vengono ridotti drasticamente.

Per applicare il campo elettrico al materiale dielettrico da riscaldare si deve realizzare una geometria simile ad un condensatore a facce piane e parallele, almeno in prima battuta, entro le cui armature inserire il materiale da riscaldare.

Le armature del condensatore costituiscono gli elettrodi che vanno ad applicare il campo ed il materiale interposto da riscaldare assume il ruolo del dielettrico del condensatore ovvero il sistema complessivamente si comporterà a seconda della permittività relativa del dielettrico interposto.

Le variabili di questo sistema originale di riscaldamento risultano quindi essere la geometria, le caratteristiche fisiche dei materiali che intervengono nel processo e le grandezze elettriche imposte dall'esterno ed origine del campo elettrico applicato al dielettrico.

Senza scendere nello specifico della teoria che sta dietro il riscaldamento per perdite dielettriche, eventualmente si potranno consultare testi specifici in materia come *"Appunti di Elettrotermia"* di Sergio Lupi, si possono fare delle semplici considerazioni su tale tecnologia di riscaldamento.

Innanzitutto bisogna dire che questa tecnologia risulta essere abbastanza recente sebbene abbia mosso i primi passi già dagli anni '30 presso i laboratori *Bell* del New Jersey (USA), infatti la diffusione di questo tipo di riscaldamento ha iniziato ad emergere solamente negli ultimi vent'anni di fatto.

Punto cruciale per un riscaldamento efficace del materiale dielettrico oggetto del riscaldamento è che questo presenti caratteristiche fisiche tali da consentirne un riscaldamento rapido ovvero che sia particolarmente sensibile alla frequenza di lavoro del sistema.

7.1 POTENZA TRASFERITA

La potenza che viene sviluppata in calore all'interno del dielettrico sede del riscaldamento si può desumere grosso modo a priori in base a considerazioni teoriche basate sulle caratteristiche del materiale sede del riscaldamento, della geometria del dispositivo realizzato e delle grandezze elettriche imposte dalla sorgente del campo elettrico alternato.

Dalla letteratura scientifica si può ricavare facilmente la potenza specifica [W/m^3] trasformata in calore nel materiale riscaldato, questa risulta essere funzione dei seguenti parametri:

- Pulsazione angolare	ω
- Campo elettrico applicato	E^2
- Permittività dielettrica del vuoto	ϵ_0
- Permittività dielettrica relativa del mezzo (parte reale)	ϵ'
- Fattore di perdita	$\tan \delta$

In accordo con la nota formula:

$$p = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon' \tan \delta$$

appare chiaramente il diverso peso dei vari parametri elettrici e fisici al fine del trasferimento di potenza all'oggetto sede del riscaldamento voluto.

Come si vede, volendo trasferire più o meno potenza all'oggetto, si può agire sui parametri fisici del mezzo sede del riscaldamento (ϵ' o $\tan \delta$) ovvero sui parametri del generatore del campo elettrico applicato (ω o E^2) essendo ϵ_0 una costante.

Fissato quindi il mezzo da sottoporre al riscaldamento non resta altro da fare che agire o sul livello del campo elettrico applicato o agire sulla pulsazione e quindi sulla frequenza del medesimo campo al fine di variare la potenza sviluppata in esso.

Non compare esplicitamente nella formula sopra riportata ma si deve invece ricordare che i parametri fisici dei materiali sottoposti a riscaldamento sono essi stessi dipendenti dalla pulsazione angolare (o frequenza) del campo elettrico applicato.

La scelta della frequenza del campo elettrico applicato non è libera e non può pertanto essere variata fino a determinare la frequenza più adatta per lo specifico materiale da riscaldare, infatti la scelta della frequenza è vincolata da normative di legge.

In Europa, nell'ambito delle applicazioni industriali, scientifiche e mediche (applicazioni ISM) sono concesse solamente due frequenze, in Gran Bretagna a dire il vero pure una terza:

- 13,56 [MHz] \pm 0,05%;
- 27,12 [MHz] \pm 0,6%.

In Gran Bretagna, come detto, si può scegliere pure la frequenza di 40,68 [MHz] \pm 0,05%, tuttavia questa frequenza non essendo impiegabile in Italia non verrà considerata tra le possibili scelte per l'impiego specifico.

Vista la dipendenza dei parametri dei materiali con la frequenza, sarà potenzialmente ben diverso applicare ad uno stesso materiale un campo elettrico a 13,56 [MHz] o a 27,12 [MHz] perché sarà diverso il comportamento del materiale alle due diverse frequenze per quanto riguarda la permittività dielettrica (parte reale) ϵ' e per quanto riguarda pure il fattore di perdita $\tan \delta$.

L'acqua ad esempio ha un comportamento in frequenza, per quanto riguarda i due parametri fondamentali per il riscaldamento per perdite dielettriche, che presenta un picco attorno ai 2450 [MHz] mentre scendendo in frequenza presenta una sella per poi tornare ad avere valori abbastanza elevati già a partire dai 27,12 [MHz] e ancor più elevati a 13,56 [MHz].

I materiali dielettrici che si vogliono scaldare presenteranno presumibilmente caratteristiche diverse dall'acqua e verosimilmente avranno valori elevati di perdita attorno alle frequenze applicate per il riscaldamento per perdite dielettriche visto che comunque oggi si ha già il riscaldamento di materiali termoplastici per radiofrequenza e proprio alle suddette frequenze standardizzate.

Per quanto riguarda il livello del campo elettrico applicato si dovrà fare attenzione invece a non superare valori critici per il sistema, il valore critico per eccellenza risulta essere la rigidità dielettrica, dell'aria o del dielettrico da riscaldare, ma anche valori di campo che possono determinare perdite per effetto corona.

Al fine di mantenere elevato il rendimento del processo che di fatto si aggira attorno al 50%, si deve infatti cercare di limitare tutte le fonti di dissipazione di potenza che non comportino il riscaldamento del mezzo come può essere l'effetto dovuto ad eventuale effetto corona che si presenti alle armature del condensatore di lavoro.

Un'altra fonte di contenimento delle perdite fisiologiche del processo di riscaldamento sta nell'ottimizzazione degli elementi impiegati per la generazione del campo ad alta frequenza ovvero dei sistemi a valvole integrati.

8 LAMINAZIONE PER RADIOFREQUENZA

Le tecniche classiche di laminazione dei moduli consistono in presse riscaldate a resistori con opportuni dispositivi atti a creare il vuoto per favorire quindi la fuoriuscita dell'aria dalle intercapedini presenti inevitabilmente nel modulo, il calore viene quindi trasferito al modulo solamente per conduzione.

Una metodologia alternativa alla laminazione dei moduli fotovoltaici mediante presse appositamente riscaldate è quella di laminare gli stessi impiegando presse riscaldanti ad alta frequenza che vanno ad agire quindi solamente sui materiali dielettrici e sensibili al campo elettrico applicato.

Tale metodologia è brevettata negli Stati Uniti da parte di Ceralink® [26] ed essa consiste essenzialmente in un processo di laminazione ottenuto pressando assieme i classici elementi costituenti il modulo unitamente all'applicazione di un campo elettrico ad alta frequenza, nella fattispecie a 27,12 [MHz].

In particolare l'azienda detentrica del brevetto afferma di poter laminare il singolo modulo con cicli della durata che varia tra mezzo minuto e tre minuti con riduzione dell'energia impiegata del 90 % ovvero con una notevole riduzione dei costi rispetto alle tecnologie tradizionali con presse riscaldate a resistori.

Se anche tali dati non fossero totalmente veritieri, cosa peraltro poco probabile vista la relativa pubblicazione, di certo si deve comunque far presente il fatto che andando a riscaldare direttamente i materiali dielettrici e nella fattispecie incapsulanti, non è necessario attendere gli eventuali transistori termici necessari al trasferimento del calore dall'esterno fino all'incapsulante.

Ancora una volta viene quindi ribadito il fatto che quella del riscaldamento per perdite dielettriche è una tecnologia emergente ma potenzialmente molto utile in termini di tempo, visto che almeno fino al 2007 questo metodo di laminazione non era ancora stato brevettato.

Forse perché l'azienda è specializzata nell'ambito dei materiali e non nella produzione di apparecchiature industriali viene sponsorizzata nel relativo sito internet (www.ceralink.com) la possibilità di collaborare con l'azienda stessa al fine di stabilire una partnership per la produzione di presse a radiofrequenza da rivendere poi ai produttori di moduli fotovoltaici.

Un semplice schema del processo brevettato è pure pubblicizzato all'interno del medesimo sito con l'immagine di seguito riportata:

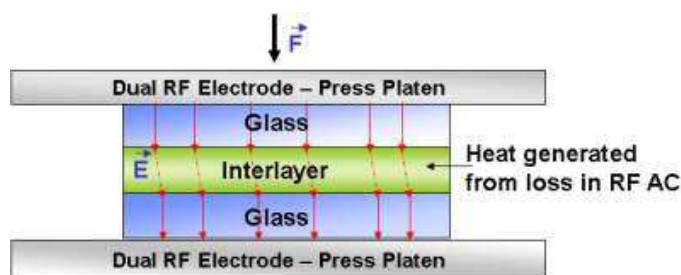


Fig. 8.1 Principio di laminazione per radiofrequenza

Appare semplice comprendere tale processo, evidenziato in applicazione diversa dal caso del modulo fotovoltaico essendo chiaramente assente la cella fotovoltaica, gli stessi infatti promuovono lo stesso procedimento per gli usi più disparati, dalla produzione di vetro decorativo con strato interno colorato al caso di possibile inglobamento di led.

Unico punto critico del processo si può eventualmente riscontrare nel momento in cui tale procedimento venga applicato ad un modulo fotovoltaico nella sua struttura più classica quindi con un materiale di backsheet impiegato come fondo e non vetro.

In tal caso infatti la il backsheet, se sensibile ai campi elettrici ad alta frequenza, una volta riscaldato si troverebbe direttamente a contatto con una piastra della pressa e quindi andrebbe analizzata la possibilità di un'eventuale adesione tra il backsheet e la pressa stessa.

Questo dubbio risulta, a dire il vero, almeno in parte sfatato dal brevetto che indica tra le possibilità anche quella di laminare materiali compositi con uno strato esterno di policarbonato; resta da verificare però se il policarbonato è sensibile ai campi elettrici ad alta frequenza.

Fermo restando che alcuni piccoli problemi possano ancora sussistere vista il brevetto depositato così recentemente, si deve però evidenziare la possibilità tecnica di laminare i moduli fotovoltaici attraverso il riscaldamento per perdite dielettriche e perché no, forse anche la possibilità di delaminarli.

9 MATERIALI DI INTERESSE PER LA LAMINAZIONE A RADIOFREQUENZA

Al fine di poter applicare un processo di riscaldamento per perdite dielettriche occorre conoscere a fondo i materiali che si vogliono riscaldare in modo tale da poter progettare un efficiente sistema di riscaldamento calibrato appunto sul materiale voluto.

Bisogna innanzitutto dire che i materiali dielettrici presenti nei moduli fotovoltaici sono di vari tipi, in particolare nel corso degli anni si sono impiegati materiali sempre diversi essendo questo un settore di recente sviluppo ed essendo quello dei materiali un campo molto dinamico.

Essenzialmente però si possono considerare i seguenti materiali:

- Etilen Vinil Acetato (EVA);
- Polivinilfluoruro (PVF) / Polivinildenfluoruro (PVDF) / Polietilene tereftalato (PET).

Commercialmente questi materiali sono noti con nomi propri, registrati ovviamente, come ad esempio Elvax[®], Tedlar[®], Kynar[®] o ancora Dymat[®] e pertanto non è semplice conoscerne le relative caratteristiche fisiche se non quelle previste da norme di omologazione o affini.

La conoscenza peraltro delle caratteristiche fisiche ed elettriche di tali materiali risulta indispensabile per non correre il rischio di progettare un sistema di riscaldamento che poi invece non riscalda nel modo voluto o non riscalda per niente.

9.1 CARATTERISTICHE FISICHE ED ELETTRICHE

Dal punto di vista fisico assume estrema importanza la verifica del comportamento dei materiali che si vogliono riscaldare per perdite dielettriche, cercando di capire se questi assumono quindi un comportamento termoplastico ovvero termoindurente.

In via preventiva si è quindi appurato che entrambi i materiali impiegati sono caratterizzati da un comportamento termoplastico ovvero una volta riscaldati essi tendono a rammollire potendo eventualmente essere manipolati per poi tornare ad uno stato rigido una volta raffreddati.

Le caratteristiche elettriche di tali materiali che interessano, al fine di valutarne l'effettiva possibilità di riscaldamento, sono le seguenti:

- PERMITTIVITÀ DIELETTICA RELATIVA (ϵ');
- FATTORE DI PERDITA ($\text{tg } \delta$).

Il valore della permittività dielettrica relativa ci consente di capire se il materiale si presta bene a trasmettere il campo elettrico imposto, in altre parole indica quanto il campo tenderà ad attraversare il mezzo ovvero ad evitarlo.

Il fattore di perdita invece indica quanto il mezzo tende a riscaldarsi per effetto della potenza che esso dissipa in se stesso per effetto dell'orientamento continuo delle cariche legate nei confronti del campo elettrico imposto.

Nel caso in cui si abbia un materiale con elevata permittività dielettrica ed un elevato fattore di perdita si avrà l'intercettazione di grossa parte del campo applicato ed un notevole riscaldamento, ottenendo quindi un riscaldamento molto efficiente.

Da ricordare ancora una volta che le caratteristiche sono variabili con la frequenza e quindi occorrerebbe conoscerle entro uno spettro di frequenza più o meno ampio in modo tale da poter decidere con quale frequenza provvedere al relativo riscaldamento e verificare se effettivamente tale processo di riscaldamento è possibile o meno.

La letteratura tecnico-scientifica fornisce queste caratteristiche per moltissimi materiali dielettrici tuttavia trattandosi di materiali di recente sviluppo e sotto la protezione di marchi registrati non è semplice ottenere dati in merito.

Alcune grosse aziende produttrici divulgano a dire il vero alcuni dati relativi ai loro prodotti ma in maniera abbastanza semplificata, in modo tale da non permettere la conoscenza di questi dati in modo preciso, per ovvi scopi commerciali.

9.1.1 INCAPSULANTE (EVA)

Come materiale incapsulante viene impiegato, praticamente sempre, l'Etilen Vinil Acetato, sigla EVA e conosciuto con nomi commerciali come Elvax[®] o Evatane[®], questo materiale consente di ottenere ottimi risultati in termini di adesione dei vari strati costituenti il modulo ed in termini di sicurezza contro la possibilità di fessurazione del modulo stesso.

Di questo tipo di materiale sono certamente note le caratteristiche oggetto delle norme di omologazione del modulo stesso come ad esempio la tensione di scarica del materiale stesso ovvero altre caratteristiche fisiche mentre caratteristiche elettriche così specifiche sono difficili da reperire.

La seguente tabella è un esempio di dati tecnici reperibili in internet, in letteratura tecnica infatti risulta forse ancor più difficile trovare dati attendibili vista la protezione data da brevetti industriali.

PROPERTY FEATURES	Test method	Unit	
Thickness sheet		µm	200 - 1100
Width sheet		mm	up to 1450
Core inside diameter		mm	76 or 152
Surface finish			Matt, rough or polished
Packaging			Aluminium bag
Interleaving foil			20 µm HDPE, optional
UNCURED PROPERTIES	Test method	Unit	(caliper 460 µm)
Electrical properties			
Dielectric strength	ASTM D149-09 Method A		
- Dielectric strength		MV/m	55.9 ± 0.7
- Breakdown voltage		kV	25.7 ± 0.4
DC resistance of insulating materials	ASTM 257-07		
- Volume resistance		Ω	3.18*10 ¹¹
- Volume resistivity		Ω m	1.59*10 ¹⁴
Mechanical properties			
Modulus	ISO 527-3	MPa	8.6
Nominal strain at break	ISO 527-3	%	592 ± 15
Tensile stress at break	ISO 527-3	MPa	6
Hardness Shore A	DIN 53 505	-	65 - 70
Other properties			
Water vapor transmission rate	ASTM F1249	g/(m ² day)	<52
Specific heat capacity	ASTM E1269	J/(g °C)	2.600
Transparency (390 - 1050 nm)	In house method	%	91-93
Density		g/cm ³	0,96
CURED PROPERTIES	Test method	Unit	(caliper 460 µm)
Gel content	Soxhlet extraction	%	80 - 93*
Adhesion to glass		N/cm	>80*
Refraction index Nd	ASTM D542-00	-	1.4809 ± 0.0002
Transparency (390 - 1050 nm)	In house method	%	91-93

* Value function of cure conditions.

Fig. 9.1 Esempio di scheda tecnica dell'EVA usato come incapsulante

Come si può vedere chiaramente non vi è nemmeno un accenno a caratteristiche elettriche degne di portare tale designazione, le uniche riportate infatti non forniscono alcun aiuto circa la determinazione della possibilità di un riscaldamento per perdite dielettriche.

9.1.2 BACKSHEET (MUTLISTRATO VARI)

Come materiale impiegato nel fondo dei moduli, detto anche backsheet, non vi è uniformità di impiego visto che vengono utilizzati materiali singolarmente come il Poli Vinil Fluoruro (PVF) o più

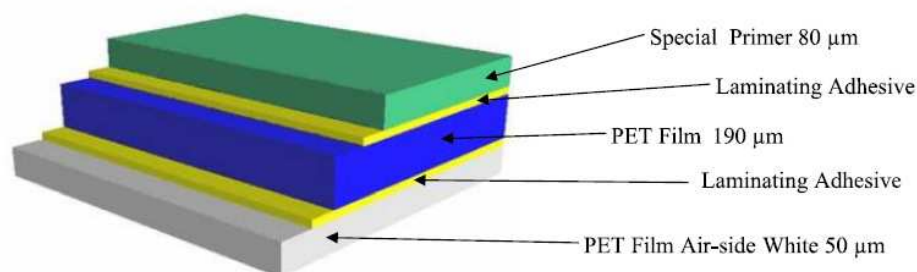
materiali laminati tra loro e composti essenzialmente da strati di Poli Etilene Tereftalato (PET) incollati tra loro mediante appositi adesivi.

Un esempio di backsheet, impiegato soprattutto in passato è il Tedlar® della famosa DuPont®, per questo come per quasi tutti i materiali impiegati come backsheet non esistono pubblicazioni delle relative caratteristiche elettriche, essendo protetti da brevetti come succede pure per i materiali incapsulanti.

Come avvenuto per i materiali incapsulanti anche per i materiali impiegati come fondo del modulo quindi non è semplice reperire le relative caratteristiche elettriche, probabilmente ancora una volta poiché tali dati non sono richiesti per legge ed i produttori badano bene a non divulgarli se non sono obbligati.

BACKSHEET FOR PHOTOVOLTAIC MODULES

FILMBACK PVS 190 is a laminate made with two layers of HIGH PERFORMANCE POLYESTER FILM: Cell-side is treated with a Special Primer with extremely high bond to EVA (Primer can be supplied in different colours). FILMBACK-PVS is properly suitable for Photovoltaic Cells module encapsulation thank to its long term resistance to hydrolysis and UV rays, its high voltage insulation features and its strong barrier to atmospheric agents (especially oxygen and humidity).



FILMBACK-PVS 190 MAIN FEATURES

- 1) Excellent resistance to atmospheric agents and outdoor exposure.
- 2) Strong barrier against oxygen and humidity permeation.
- 3) Long-term resistance to adhesive hydrolysis.
- 4) High voltage insulation.

TECHNICAL SPECIFICATIONS	UNIT	METHOD	VALUE
PET film Air-side White	micron	caliper	50
PET Inner layer thickness	micron	caliper	190
Primer white color thickness	micron	caliper	80
Laminate thickness	micron	caliper	320 +/- 5%
Unit weight	gr/sqm	10x10 weight	415 +/- 5%
Tensile strength (MD)	N/10mm	ASTM D-882	> 280
Tensile strength (TD)	N/10m	ASTM D-882	> 280
Elongation at break (MD)	%	ASTM D-882	> 110
Elongation at break (TD)	%	ASTM D-882	> 100
Heat shrinkage (MD) 150 ° C x 30'	%	ASTM D-1204	< 1,2
Heat shrinkage (TD) 150 ° C x 30'	%	ASTM D-1204	< 0,6
Layer peel strength	N/10mm	180° peel	> 5
EVA adhesion (primer coated side vs EVA)	N/10mm	internal	> 40
Moisture barrier at 38° 100 % RH	g/sqm x day	ASTM F-1240	< 2,47
Breakdown voltage	kV	ASTM D-149	> 25
Partial discharge test	VDC	IEC 60664-1	> 1050

Fig. 9.2 Esempio di scheda tecnica di un materiale di backsheet

Un esempio di scheda tecnica relativa ai materiali di backsheet è quello riportato poco fa, come si può velocemente notare le schede di incapsulanti e di backsheet si assomigliano molto ed anche in questo caso non si riesce a ricavarne le caratteristiche volute [27].

A dire il vero alcuni grossi produttori si spingono a fornire qualche caratteristica in più rispetto a quelle previste per legge, non temendo molto la concorrenza di piccoli produttori ma il modo in cui forniscono tali dati è piuttosto astuto.

Tali caratteristiche infatti vengono fornite in maniera abbastanza confusa o comunque in modo tale da non riuscire a ricavare dati certi e precisi fornendo quindi più una visione qualitativa che quantitativa delle caratteristiche tecniche espresse.

Un esempio dei dati ricavabili dai data sheet dei grossi produttori, come DuPont®, è quello che segue, in questo caso le cose migliorano rispetto al caso dell'EVA visto che è possibile ricavare, seppure in maniera grossolana, le caratteristiche di permittività dielettrica e di fattore di dissipazione in funzione della frequenza e della temperatura del materiale stesso, quindi facendo fronte contemporaneamente a due variabili indipendenti.

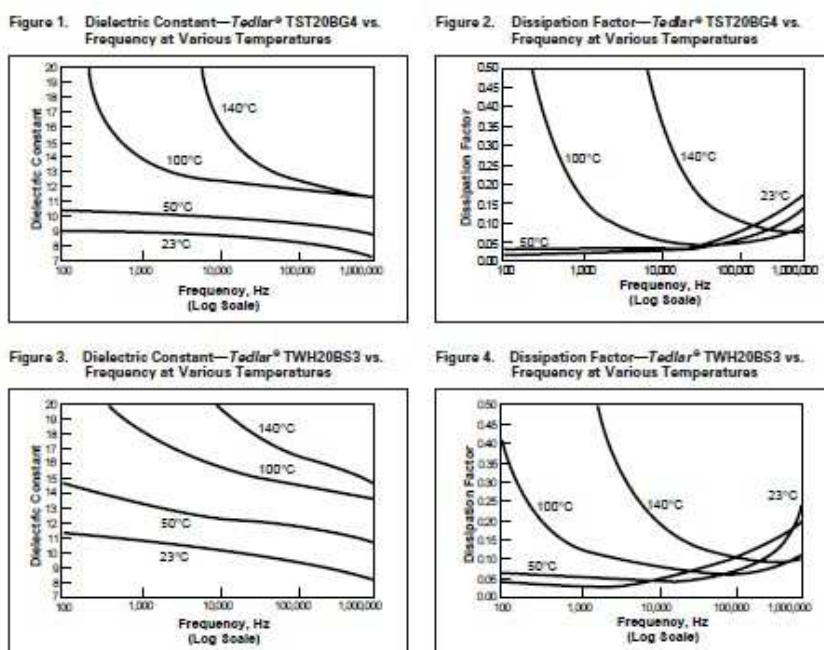


Fig. 9.3 ϵ' e $\tan\delta$ del Tedlar® in funzione della frequenza e della temperatura

Come si vede sin da subito il produttore pur rilasciando il valore della permittività e del fattore di perdita in funzione della frequenza e della temperatura, si tiene ben lontano dal rilasciare in maniera troppo precisa tali dati.

Infatti mette in atto alcune tecniche per dare l'impressione di fornire più dati dei concorrenti senza far capire che in realtà da queste caratteristiche non è ricavabile poi molto; ad esempio le caratteristiche sono stampate in piccolo e non vi è una griglia per facilitare la lettura dei dati.

In conclusione gli unici dati forniti in maniera precisa e soprattutto in condizioni standard e ripetibili sono quelli previsti dalle norme di prodotto che prescrivono ed obbligano il produttore a verificare ed a pubblicare tali caratteristiche.

9.2 REPERIMENTO CARATTERISTICHE VOLUTE

Non potendo contare sui data sheet forniti né dai produttori dei moduli fotovoltaici né tantomeno dai produttori dei materiali polimerici in essi impiegati, tali caratteristiche si sono dovute ricercare in maniera alternativa.

Nel tentativo di riuscire ad ottenere tali dati si è cercato di seguire due strade complementari:

- Richiedere tali caratteristiche elettriche direttamente ai produttori;
- Ricavare tali caratteristiche per via sperimentale.

Nessuna delle due strade percorse in parallelo ha lasciato ben sperare fin da subito circa l'esito ma sono state percorse, come detto, entrambe nella speranza di ricavare in maniera abbastanza certa le caratteristiche desiderate.

9.2.1 RICHIESTA AI PRODUTTORI

Seguendo questa via si è cercato di contattare i produttori di film polimerici impiegati rispettivamente come incapsulanti e come fondo nei moduli fotovoltaici per richiedere le caratteristiche elettriche volute ma non pubblicate.

Le risposte che si sono ottenute sono state le più disparate, dal semplice rifiuto alla fornitura di tali dati per motivi di riservatezza all'affermazione della non conoscenza di tali caratteristiche ancora alla richiesta del tempo necessario per reperire tali dati.

Le risposte migliori che si sono ottenute sono state alcune indicazioni di caratteristiche comunque già pubblicate in internet com'è avvenuto ad esempio per la DuPont®, nessuna delle aziende contattate ha fornito dati che non fossero già pubblicati sebbene le richieste fossero richieste per scopi scientifici e da parte di un ente universitario.

9.2.2 DETERMINAZIONE SPERIMENTALE

Constatato che il reperimento dei valori di permittività dielettrica relativa e fattore di perdita dell'EVA e del materiale di backsheet non era cosa agevole da ottenere richiedendola ai produttori si è deciso di percorrere pressoché unicamente la seconda strada.

Appurata l'esistenza di strumentazione scientifica in grado di ricavare in maniera abbastanza agevole le caratteristiche volute si sono attivati alcuni canali per cercare di ottenere tali dati da una misura sperimentale.

Si è ad esempio contattato un ateneo universitario per cercare di ottenere tali dati dal loro laboratorio di misure essendo nota la competenza tecnica ma è risultato impossibile ottenere i dati ricercati vista la banda di frequenze nella quale tale ateneo riusciva a fornire tali dati.

La banda entro la quale l'ateneo universitario riusciva eventualmente a fornire tali dati infatti va da 200 [MHz] a 50 [GHz], com'è ormai noto invece le scelte possibili in quanto a frequenza per il riscaldamento per perdite dielettriche sono solamente 13,56 [MHz] e 27,12 [MHz].

Come si vede quindi la banda di frequenze entro la quale poter misurare le caratteristiche volute si trova ben al di sopra delle possibili frequenze impiegabili in ambito industriale e noto il fatto che tali caratteristiche sono funzione della frequenza, gli eventuali risultati non si sarebbero potuti ritenere attendibili.

A questo punto si è cercato di prendere contatti con i produttori di tale tipo di strumentazione nella speranza di poter far uso dei relativi strumenti acquistando eventualmente il prodotto necessario ovvero effettuando tali misure con uno strumento preso in visione gratuita.

Un esempio della strumentazione adatta al nostro scopo è quella prodotta dalla Agilent®, divisione del gruppo HP® dedicata all'impiego professionale, mentre la HP® produce pure strumentazione tecnica ma con target diverso dagli enti di ricerca come quello universitario, nel caso specifico.

La strumentazione alla quale si sarebbe potuto far ricorso è ad esempio lo strumento *Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer* con banda di frequenza che varia tra 1 [MHz] e 3 [GHz] in grado di effettuare diverse valutazioni, come descritto dal relativo data sheet:

Impedance parameters:

$|Z|, |Y|, L_S, L_P, C_S, C_P, R_S(R), R_P, X, G, B, D, Q, \theta_Z,$
 $\theta_Y, |\Gamma|, \Gamma_X, \Gamma_Y, \theta_Y$

Material parameters (option E4991A-002):

(see "Option E4991A-002 material measurement (typical)"
on page 17)

Permittivity parameters: $|\epsilon_r|, \epsilon_r', \epsilon_r'', \tan\delta$

Permeability parameters: $|\mu_r|, \mu_r', \mu_r'', \tan\delta$

Fig. 9.4 Parte del data sheet della strumentazione Agilent

Come si può vedere lo strumento brevemente descritto è in grado di ottenere, impiegando opportuni accessori (16453A), le caratteristiche dielettriche del materiale volute ovvero la permittività dielettrica relativa in valore complesso ed il fattore di perdita.

Gli ostacoli che ci si è trovati di fronte a questo punto sono stati quello che tale strumento non era disponibile in visione gratuita, data la scarsa produzione di una strumentazione così particolare, e quindi il costo relativamente elevato (circa 45 mila euro) che non ha permesso l'acquisto dello stesso.

9.3 VALORI IMPIEGATI

Data la non reperibilità di valori certi riguardo la permittività dielettrica relativa ed il fattore di perdita dei materiali polimerici impiegati nei moduli si è deciso di procedere con i dati noti, pochi per la verità, per quanto riguarda le simulazioni al computer, riservando il diritto di validare tali simulazioni a seguito di prove sperimentali di verifica.

Non si tratta ovviamente di un metodo molto ortodosso ma nell'impossibilità di riuscire ad ottenere risultati migliori, almeno con i pochi mezzi e soldi a disposizione, si è scelto questa via un po' empirica ma non assurda essendo obiettivo del lavoro la verifica della fattibilità del riscaldamento non la determinazione delle caratteristiche dielettriche dei materiali.

10 DELAMINAZIONE PER RADIOFREQUENZA

Appurato che la tecnologia del riscaldamento per perdite dielettriche viene impiegata oltre che per molteplici altre applicazioni anche per laminare i moduli fotovoltaici, si vuole valutare l'effettiva possibilità di applicare la medesima tecnologia alla rovescia ovvero per de-laminare i moduli fotovoltaici.

La laminazione avviene facendo aderire tra loro i vari componenti permettendo all'aria di fuoriuscire e facendo sì che questa non possa rientrarvi riscaldando gli strati di EVA che una volta raffreddati fanno da incapsulante e riempitivo.

Valutate quelle che sono le tecnologie, pioniere in questo campo, applicate per il riciclo dei moduli fotovoltaici, si può affermare innanzitutto che vista la novità del settore non vi sono ragionevoli certezze per poter escludere l'eventualità di poter applicare questa tecnologia in questo contesto né sospetti a riguardo del motivo per cui nessuno l'abbia ancora applicata e/o brevettata visto appunto il recente interesse verso tale settore applicativo.

Vista la composizione del modulo fotovoltaico e note che siano le caratteristiche dei materiali polimerici in essi presenti si può affermare con ragionevole certezza che tali dispositivi si dovrebbero teoricamente riscaldare per il fenomeno descritto delle perdite dielettriche e in ragione di tale comportamento non si può nemmeno escludere la possibilità di riuscire a separare in maniera agevole i vari strati componenti a seguito di un adeguato riscaldamento.

I materiali polimerici presenti, come analizzato nei capitoli precedenti, presentano caratteristiche che li classificano come termoplastici ovvero in seguito ad un riscaldamento essi divengono via via più morbidi e malleabili e proprio grazie a questa loro proprietà essi vengono lavorati a caldo per poi prendere forma e caratteristiche definite una volta che si siano raffreddati.

Teoricamente essi mantengono le caratteristiche classiche dei termoplastici anche una volta subito un primo riscaldamento ed un conseguente raffreddamento tuttavia ciò dev'essere verificato al fine di sfatare eventuali dubbi riguardo ad un comportamento invece diverso una volta che ciò sia avvenuto.

In una prima fase sperimentale si realizzeranno degli elettrodi dalle dimensioni perfettamente uguali a quelle del modulo o porzione di modulo interposto, infatti si procederà con gradualità verificando la fattibilità tecnica dapprima su di una porzione di modulo dalle dimensioni di una singola cella fotovoltaica, con il rispettivo bordo, per poi andare a testare il medesimo processo su di una porzione grande quanto alcune di queste celle, nella fattispecie quattro, e solamente in un'ultima fase si procederà al trattamento di un intero modulo fotovoltaico.

L'idea è quella di portare i materiali polimerici ad una temperatura di rammollimento preferibilmente in maniera differenziata in modo tale da poter separare l'incapsulante (EVA) dal foglio di fondo (Multistrato di backsheet) e dagli altri materiali costituenti il modulo.

Una volta riscaldati questi materiali termoplastici bisogna valutare se si riesce ad asportare in maniera agevole e selezionata l'uno e l'altro polimero che al fondo del pannello si trovano incollati tra loro in maniera netta visto che non devono consentire infiltrazioni d'acqua o altri agenti.

Se si riesce a staccare il backsheet dall'EVA si può quindi continuare il processo riscaldando solamente ciò che vi rimane avendo già selezionato il materiale di backsheet ed avendolo già eliminato ed avviato ad un processo di smaltimento/recupero singolarmente.

Se il caso lo necessita si può inoltre riprendere la fase di riscaldamento andando a scaldare solamente il materiale incapsulante per poi separarlo dalla cella e dal vetro per avviare anche questo ad un processo di smaltimento/recupero singolarmente.

Riuscendo a separare questi materiali polimerici dalle celle in silicio e dal vetro infine si possono inviare anche questi ultimi due a processi di riciclo differenziati ma mentre per il vetro esiste una filiera ed un processo ben collaudati, per il silicio si è ancora agli albori sebbene siano già depositati alcuni brevetti a riguardo.

Lo schema sotto riportato illustra quelle che si possono intendere le fasi, in previsione, per un riciclo efficiente dei principali materiali contenuti in un modulo fotovoltaico, restano da affinare l'eventuale riciclo dei contatti delle celle in pasta d'argento e qualche altro piccolo dettaglio.

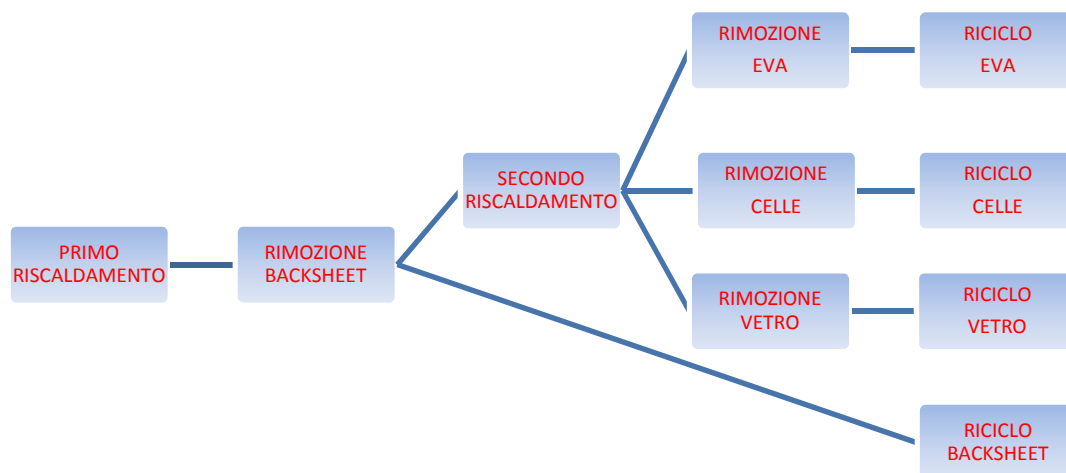


Fig. 10.1 Schema di principio del processo di riciclo

Il processo si può essenzialmente pensare costituito dalle seguenti componenti, applicate contemporaneamente:

- Applicazione di un campo elettrico ad alta frequenza;
- Applicazione di un'adeguata pressione tra elettrodi e modulo fotovoltaico.

Dal punto di vista pratico per poter riscontrare un effettivo riscaldamento del modulo e per non dilungarsi troppo in accorgimenti che verranno definiti in seguito si è deciso di procedere, una volta eseguite le simulazioni all'elaboratore, alla parte di verifica considerando 3 diverse dimensioni e configurazioni possibili:

- 1) Porzione di modulo delle dimensioni di una singola cella (compreso il rispettivo bordo)
- 2) Porzione di modulo delle dimensioni di alcune celle (quadrato di 4 celle totali)
- 3) Intero modulo fotovoltaico dalle dimensioni reali (circa 1 x 2 [m])

Quindi solamente in un'ultima fase sperimentale si provvederà a verificare il processo su di un vero e proprio modulo così come realizzato dai produttori, all'inizio lo scopo sarà solamente quello di validare le simulazioni effettuate al calcolatore ed ottimizzare i parametri fisici per l'ottenimento di un processo efficace e sicuro.

10.1 APPLICAZIONE DI UN CAMPO ELETTRICO AD ALTA FREQUENZA

Come evidenziato nel capitolo riservato all'introduzione del riscaldamento per perdite dielettriche l'ingrediente di base di un siffatto processo è la presenza di un campo elettrico alternativo ad alta frequenza.

Tralasciando un'inutile discussione riguardo alla definizione di che cosa si possa intendere per *ALTA FREQUENZA*, noi la considereremo tale se il campo generato rientra in una delle frequenze consentite per applicazioni industriali, scientifiche e mediche ovvero 13,56 [MHz] o 27,12 [MHz].

Si tratta operativamente di prendere i moduli fotovoltaici da riciclare (in una prima fase sperimentale considerando solamente quelli integri e non quelli danneggiati esteriormente), porli tra due elettrodi piani ed alimentando questi elettrodi con una tensione ad alta frequenza sottoponendo quindi il

modulo nel suo insieme ad un campo elettrico alternato proporzionale alla tensione imposta tra gli elettrodi.

Solamente una volta determinato che il processo si verifica in maniera efficace e senza problemi tecnici si provvederà a disegnare in maniera fine elettrodi che permettano prestazioni migliori e finenze tecniche trascurate in una prima fase di verifica sperimentale della fattibilità del processo. I parametri che caratterizzano il campo elettrico al quale sarà sottoposto il modulo, oltre alla forma d'onda che si riterrà, visto il generatore a disposizione, di forma ad *ONDA QUADRA* in questa prima fase sperimentale, sono di fatto:

- Tensione (Valore efficace);
- Frequenza.

10.1.1 TENSIONE

La tensione applicata agli elettrodi sarà limitata al più dalla massima tensione erogabile dal generatore ad alta frequenza, e dalla rigidità dielettrica dell'aria in modo tale da evitare scariche elettriche nel dielettrico aria qualora si vengano a creare situazioni critiche che vadano a sollecitare, dielettricamente parlando, i dielettrici che presentano permittività dielettrica più bassa ed essendo quella dell'aria pari a quello del vuoto (quindi unitaria) sarà di sicuro uno dei dielettrici interessati dal campo elettrico di maggiore valore.

Com'è noto l'aria presenta rigidità dielettrica, in condizioni standard di temperatura pari a 20 [°C] e pressione di 1 [atm], in configurazione tra due elettrodi piani, pari a **30** [kV/cm] [28] ma tale valore non tiene conto di numerose variabili quali l'umidità e la polarità della tensione applicata.

Al fine di garantire un margine di sicurezza contro la possibilità di avere scariche in aria si è deciso di adottare una tensione che comporti un campo elettrico di valore inferiore o pari ad un decimo della rigidità dielettrica dell'aria e quindi uguale o inferiore a **3** [kV/cm].

Con l'ausilio di simulazioni all'elaboratore si cercherà comunque di determinare il valore di tensione di alimentazione che consenta un processo più razionale possibile compatibilmente con limiti tecnici e limiti economici ovvero tempi di processo contenuti quanto più possibile.

Le simulazioni vengono affrontate nel capitolo successivo ma considerando lo spessore di un modulo fotovoltaico che è all'incirca di un centimetro, trascurando la cornice in alluminio che viene tolta dal modulo in una fase precedente la de-laminazione, qualora fosse applicata anche la massima tensione erogabile dal generatore ad alta frequenza, si rimarrebbe comunque entro limiti di sicurezza per quanto riguarda il pericolo di scariche elettriche in aria tra elettrodo ed elettrodo.

10.1.2 FREQUENZA

La frequenza di lavoro per tale dispositivo oltre che per ragioni prettamente fisiche legate alla frequenza più adatta per sviluppare un siffatto processo di riscaldamento per perdite dielettriche è anche dettata da ragioni tecniche legate alle frequenze impiegabili per scopi industriali così come definito dalla legge italiana in recepimento di direttive europee riguardo alla compatibilità elettromagnetica.

Nella fattispecie la scelta avviene tra le 2 frequenze ammesse di: [25]

- 13,56 [MHz] ± 0,05%
- 27,12 [MHz] ± 0,6%

A dire il vero vi sarebbe pure una terza frequenza, 48,12 [MHz] ± 0,05%, ma questa è concessa per applicazioni industriali, scientifiche e mediche (ISM) solamente in Gran Bretagna e perciò essa viene esclusa a priori dalle nostre scelte.

A livello pratico il Laboratorio di Elettrotermia dell'Università degli Studi di Padova (in seguito denominato con l'acronimo LEP) dispone di un generatore di tensione ad alta frequenza e nella fattispecie a 13,56 [MHz] e perciò, almeno in una prima fase di sperimentazione, si farà ricorso a tale dispositivo il quale consente di verificare l'effettivo riscaldamento del modulo per perdite dielettriche. Esula dall'oggetto di questo lavoro la valutazione della frequenza ottimale per ottenere un riscaldamento per perdite dielettriche, si ribadisce infatti ancora una volta che lo scopo della tesi è la

verifica della fattibilità tecnica del processo, non la definizione delle eventuali condizioni ottimali per ottenere ciò.

Valutazioni riguardanti l'impiego di un campo elettrico a 27,12 [MHz] in luogo di uno a 13,56 [MHz] verranno quindi fatte solamente in futuro, una volta constatato che il processo è realizzabile dal punto di industriale.

10.2 APPLICAZIONE DI UN'ADEGUATA PRESSIONE TRA ELETTRODI E MODULO FOTOVOLTAICO

Unitamente al campo elettrico ad alta frequenza si ipotizza di porre gli elettrodi a contatto con il modulo, sia da un lato che dall'altro, applicando una pressione adeguata al fine di eliminare l'aria che si viene ad interporre tra elettrodo e modulo evitando così il rischio di scariche in aria, la quale presenta ovviamente una rigidità dielettrica inferiore a quella dei vari componenti che costituiscono il modulo.

Il brevetto di laminazione con riscaldamento per perdite dielettriche infatti prevede l'applicazione di una certa pressione al fine di favorire l'eliminazione dell'aria interposta tra i vari strati potendo al contempo elevare il livello di tensione applicato agli elettrodi senza correre il rischio di scariche.

In quello che ipoteticamente sarà il processo di laminazione con riscaldamento per perdite dielettriche invece l'applicazione di pressione agli elettrodi ha il solo scopo di evitare il rischio di scariche in aria mentre si dovrà provvedere in maniera abbastanza rapida a staccare i vari strati costituenti il modulo prima che questo si raffreddi eccessivamente.

Se ciò infatti dovesse accadere comporterebbe la necessità di riscaldare nuovamente il modulo ed oltre a non avere certezze a riguardo di eventuali fenomeni circa il riscaldamento in più tempi dei medesimi materiali che si potrebbero deteriorare, comunque non è assicurata una perfetta adesione tra gli elettrodi e gli strati che di volta in volta vengono ad essere gli strati superficiali del modulo, con possibili deformazioni dovute all'azione termica.

Se quindi un primo riscaldamento è almeno in teoria cosa abbastanza fattibile, successivi riscaldamenti, andando ad adagiare gli elettrodi sugli strati sottostanti, potrebbero comportare degli inconvenienti quali una non perfetta adesione dell'elettrodo con la superficie o la possibilità di scariche in aria visto che l'azione termica può favorire l'insorgenza di bolle e rigonfiamenti dei materiali termoplastici riscaldati.

Come prima forma di pressione si adotterà la pressione fornita dalla forza peso di una massa adagiata sull'elettrodo superiore in modo tale che questo venga ad agire sullo strato superficiale di backsheet quindi con il modulo rivolto verso il basso, contrariamente alla disposizione nella sua installazione.

In un secondo momento si provvederà a determinare quale sia la pressione ideale al fine di favorire tale processo evitando rischi di scariche in aria ed al contempo consentendo un processo efficace ma rapido visto che comunque va a gravare sui costi di riciclo.

10.2.1 COMPONENTI DEL PROCESSO DI RICICLO

I componenti fondamentali del processo di riciclo così come ipotizzato sono i seguenti:

- Generatore ad alta frequenza
- Elettrodi di lavoro
- Applicatore di pressione

Per quanto riguarda il *GENERATORE AD ALTA FREQUENZA*, come già accennato verrà impiegato il generatore a disposizione del LEP ovvero un generatore di tensione alla frequenza di 13,56 [MHz] e dalle caratteristiche riportate nel capitolo riguardante le prove sperimentali.

Gli elettrodi di lavoro, anch'essi analizzati meglio nel capitolo appena indicato, saranno in una prima fase di forma circolare per evitare fenomeni di addensamento del campo elettrico e saranno in materiale amagnetico, nella fattispecie alluminio, onde evitare interazioni negative e potenzialmente pericolose con il campo ad alta frequenza imposto.

Infine l'applicatore di pressione sarà costituito da una massa la quale agirà sull'elettrodo superiore in modo tale da fornire con la propria forza peso la pressione necessaria ad eliminare l'aria eventualmente presente tra gli elettrodi ed il modulo fotovoltaico.

Questa massa dovrà ovviamente essere in materiale non sensibile ai campi elettrici ad alta frequenza per non far sì che questa si riscaldi correndo il rischio che raggiunga una temperatura pericolosa ma soprattutto per non far decadere il rendimento del processo essendo necessario che il calore si sviluppi nel modulo, non altrove.

Infine bisogna aggiungere che tutti questi componenti verranno analizzati in un secondo momento nella definizione di condizioni che permettano un processo stabile ed efficiente, non in questa sede di verifica dunque.

11 SIMULAZIONI A PC

Prima ancora di cominciare ad investire energie, tempo e materiale alla ricerca dell'effettiva possibilità di delaminare un modulo fotovoltaico, fisicamente, si è reso utile, ed ormai indispensabile nei moderni processi di ricerca e sviluppo, procedere preventivamente con una cospicua parte di simulazione all'elaboratore elettronico al fine di riscontrare eventuali errori nella definizione dei parametri ed al fine di ricavare dei risultati a livello teorico da confrontare poi con quelli ricavati sperimentalmente.

Facendo ricorso ai metodi di calcolo a disposizione del LEP si è deciso di proseguire con la simulazione mediante un software agli Elementi Finiti (FEM, Finite Element Method) il quale permette una maggiore libertà di definizione di vari parametri ed una maggiore accuratezza dei risultati rispetto ad un codice alle Differenze Finite.

Valutando le possibili frequenze di lavoro disponibili per applicazioni di riscaldamento per perdite dielettriche, che in Italia sono due ovvero 13.56 [MHz] e 27.12 [MHz] [29], si è constatato comunque che a tali frequenze e per le dimensioni degli oggetti ed apparecchiature utilizzate si possono ancora considerare le regole dell'elettrotecnica classica ovvero si possono trascurare i tempi di propagazione essendo la lunghezza d'onda nel vuoto, alle frequenze suddette, superiore alla decina di metri mentre le nostre dimensioni caratteristiche si aggirano sull'ordine del metro.

Fatte queste considerazioni e tenendo presente che oltre al problema elettrico si deve considerare pure il problema termico e quindi l'accoppiamento elettro-termico, si è deciso di proseguire con le simulazioni mediante il software della software house francese *Cedrat*[®] quindi facendo ricorso al software **FLUX**[®] e nella fattispecie nella sua versione **10.4**.

Tale software consente una modellizzazione sia in due dimensioni (in seguito 2D) sia in tre dimensioni (in seguito 3D), constatato però il fatto che la geometria della quale ci occuperemo si può considerare costituita da una dimensione preponderante rispetto alle altre due (nella fattispecie il modulo fotovoltaico ha una lunghezza molto maggiore rispetto alla larghezza ed allo spessore) si è optato per una modellizzazione 2D con vista in sezione in modo da non appesantire troppo il software di calcolo.

Il software si avvia accedendo ad una prima interfaccia, la cosiddetta **Flux Supervisor**, di definizione della cartella nella quale esso andrà successivamente a scrivere i file necessari alla simulazione; da questa interfaccia si richiamano le successive 3 interfacce di costruzione, soluzione e valutazione dei risultati ottenuti, nello specifico designate come: **Geometry and Physics**, **Direct** e **Results**.

Nella versione 10.4, in modellizzazione 3D, queste tre interfacce di Design, Solver e Post Processing sono integrati in un'unica applicazione con una sola interfaccia grafica per l'utente, viceversa utilizzando la modellizzazione 2D le tre procedure sono distinte in 3 diverse interfacce e quindi una volta definita la geometria e la fisica occorre chiudere tale finestra per accedere a quella di risoluzione ed infine chiudere pure questa per accedere alla finestra di post processing.

È da ricordare che oltre alle due tipologie di modellizzazione geometrica 2D e 3D vi è pure una terza modalità di modellizzazione denominata Skewed la quale consente di analizzare geometrie assialsimmetriche considerandone solamente un settore angolare, tale metodo di modellizzazione risulta essere molto utile ad esempio per analizzare i motori elettrici e tutte quelle configurazioni costituite da settori angolari ripetuti uguali a se stessi in successione.

È bene notare che il raggruppamento sotto un'unica interfaccia semplifica il lavoro e rende tutto il processo di modellizzazione, di simulazione e di analisi dei risultati molto più semplice mentre con tre diverse applicazioni, sebbene dal punto di vista dei risultati non cambi nulla, risulta però meno agevole ed è per questo motivo che dalla prossima versione di Flux le tre diverse interfacce verranno integrate in una unica anche per la modellizzazione 2D.

La figura seguente rappresenta l'interfaccia Flux Supervisor che l'utente incontra a video una volta lanciato il software Flux 10.4, come si vede si possono distinguere essenzialmente tre sezioni: la prima sulla sinistra riporta l'applicazione impostata (2D, 3D, skewed) e le relative applicazioni ad essa correlate, la sezione centrale riporta la cartella ed il relativo percorso nell'elaboratore in uso nel quale esso sta lavorando mentre l'ultima sezione, sulla destra, riporta i file contenuti nella cartella di lavoro definita.

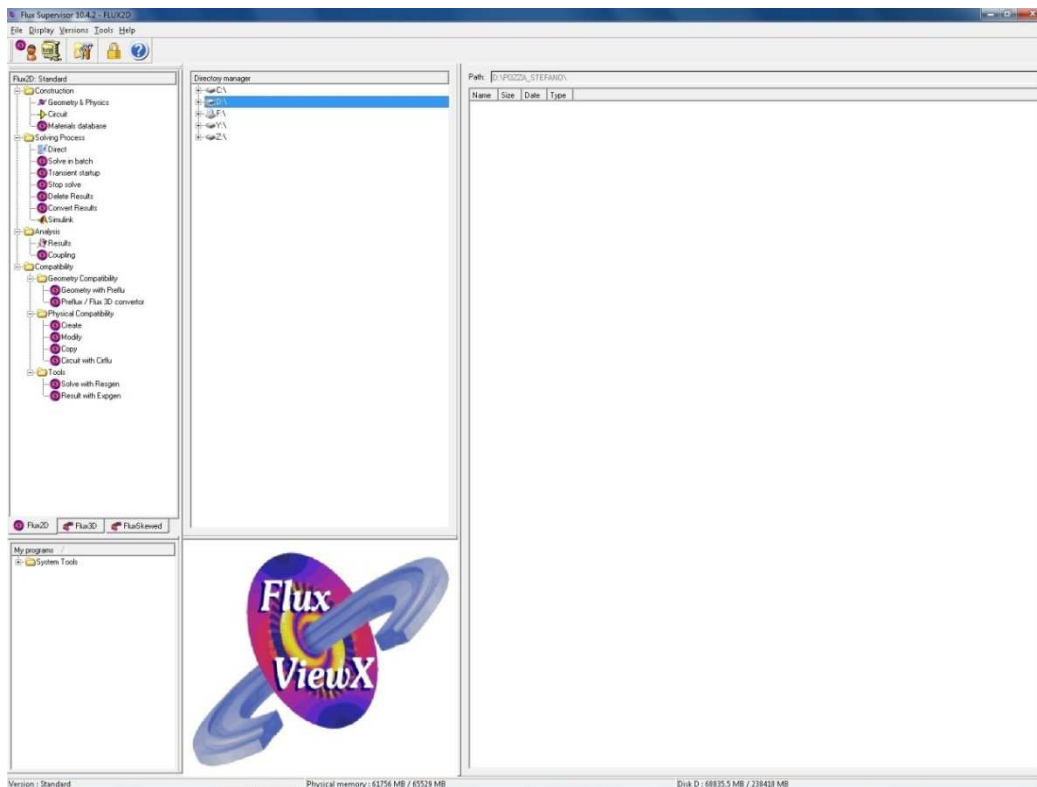


Fig. 11.1 Interfaccia utente della sezione "Flux Supervisor" di Flux

11.1 SCHEMA DI PRINCIPIO

Bisogna anzitutto dire che il processo di simulazione, composto dalle varie fasi in seguito elencate, è stato frutto di svariati tentativi, dapprima per apprendere l'uso di questo software e poi per affrontare nello specifico il caso Elettro-Termico trattato, caso abbastanza particolare nell'ambito del LEP visto che in genere vengono trattati problemi Magneto-Termici per il riscaldamento ad induzione.

Una volta appreso l'utilizzo del software si è proceduto con simulazioni via via più complesse procedendo dal caso di un singolo strato di materiale dielettrico e riscaldabile per perdite dielettriche al caso di una sezione di modulo dalle dimensioni di un'intera cella fotovoltaica ma tralasciando gli elettrodi del condensatore di lavoro per finire con una simulazione abbastanza dettagliata comprendente una porzione di modulo pari ad una cella compresi gli elettrodi applicatori di campo.

Nel caso in cui si voglia affrontare la simulazione di un intero modulo fotovoltaico basterà prendere la geometria disegnata per una singola cella e ricopiarla uguale a se stessa per un numero pari al numero di celle presenti su di un lato mentre adottando una modellizzazione 3D si possono definire dettagli prima trascurati come la forma delle celle a seconda che si tratti di silicio mono o poli cristallino e svariati altri particolari.

Il lavoro di simulazione si può riassumere essenzialmente in 6 punti:

- | | |
|---|--------------------------|
| • Definizione della geometria | “GEOMETRY” |
| • Meshing del dominio di calcolo | “MESHING” |
| • Definizione del problema | “APPLICATION” |
| • Definizione delle proprietà fisiche | “PHYSICS” |
| • Risoluzione del problema | “SOLVING PROCESS” |
| • Post-processing e valutazione dei risultati | “RESULTS” |

All'interno poi di ciascuna di queste fasi operative si possono distinguere più sottopassaggi elementari ma non essendo oggetto di questa tesi l'analisi approfondita del processo di simulazione, questi saranno omessi per dare maggiore importanza invece a valutazioni sul piano della fattibilità tecnica di un tale processo di riscaldamento.

Ciascuna di queste fasi verrà analizzata in via generale e con qualche riferimento al caso specifico riportando le scelte operative adottate ed i motivi che hanno spinto ad impiegarle.

11.1.1 DEFINIZIONE DELLA GEOMETRIA

“GEOMETRY”

La definizione della geometria consiste nel definire le forme e le dimensioni caratteristiche dell'oggetto o del dominio, in generale, che si andrà poi ad analizzare ed a risolvere nella fase di risoluzione del problema (nel caso specifico Elettro-Termico) e pertanto prevede il disegno della geometria attraverso la definizione di punti, linee e facce che si andranno in seguito a definire di quale materiale siano essi costituiti e quindi a “meshare” (ovvero definire con elementi di forma predefinita i punti sui quali verranno calcolati i campi e le temperature).

La geometria può essere disegnata direttamente nella sezione **Geometry and Physics** di Flux ovvero può essere importata mediante il disegno preventivo con uno strumento di disegno CAD (Computer-Aided Drafting ovvero Disegno Assistito al Computer) qualora la geometria fosse particolarmente complessa.

Se dal punto di vista del disegno può essere invitante l'importazione del file da uno strumento CAD, visto che essendo specificamente studiato per disegnare esso consente appunto di disegnare in maniera più agevole, dal punto di vista operativo può essere invece preferibile disegnare nell'apposita sezione di Flux poiché in essa è possibile disegnare in maniera “parametrica” .

Il disegno “parametrico” consiste di fatto nell'assegnare ai punti voluti delle coordinate che sono variabili alfa-numeriche contenute in un'apposita libreria chiamata **geometric parameter** sotto la cartella **geometry/geometric tools** il che facilita, nel caso in cui si preveda di variare le coordinate dei punti, agendo semplicemente nella definizione dei punti senza dover ridisegnare l'intera geometria.

Tale possibilità a dire il vero è possibile anche con gli strumenti di disegno CAD più recenti anche se può essere non molto semplice l'importazione della libreria dei parametri geometrici per eventuali successive modifiche e pertanto, nella fattispecie, si è deciso di disegnare la geometria direttamente dalla sezione dedicata constatato pure che la geometria in analisi era semplice mentre viceversa le dimensioni non erano, almeno all'inizio, ben note e risultava pertanto utile il disegno per parametri.

La figura sotto-riportata illustra l'interfaccia utente che permette il disegno della geometria, lo zoom illustra la libreria geometrica che viene ad aprirsi al momento della definizione della geometria.

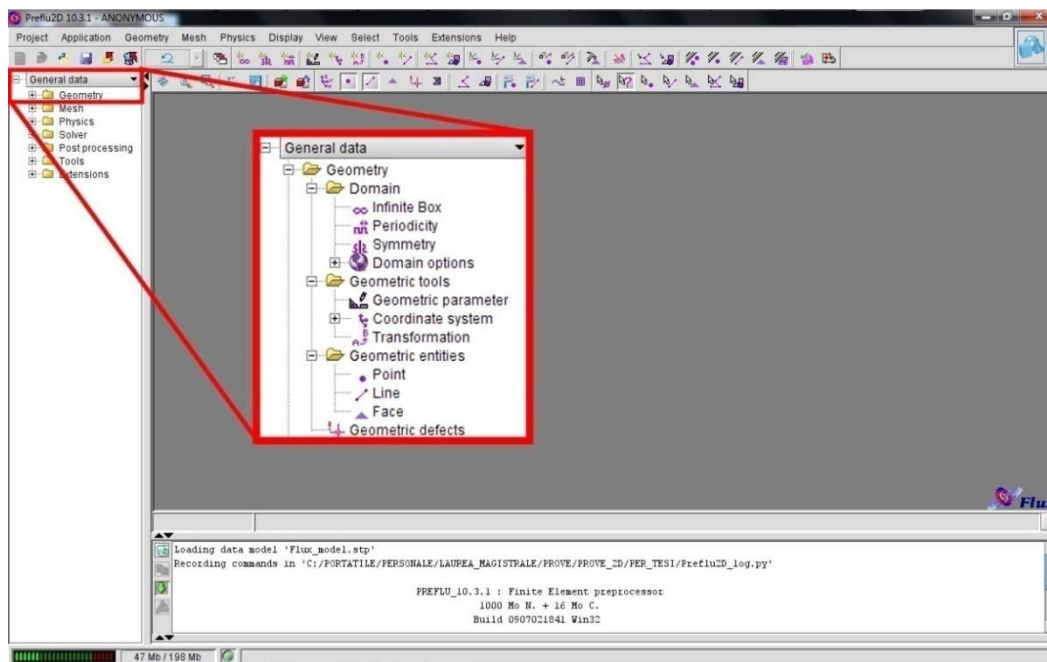


Fig. 11.2 Interfaccia utente della sezione “Geometry” per la definizione della geometria

Come detto, vista la semplicità geometrica e la preponderanza di una dimensione in luogo delle altre due si è optato per una modellizzazione 2D che oltre a consentire una più agevole procedura di disegno consente allo stesso tempo di creare una mesh meno pesante ed una risoluzione del problema in tempi minori.

Visto ciò si sono quindi disegnati i punti base della vista in sezione uniti poi da linee al fine di delineare contorni e facce dell'oggetto in esame tralasciando, almeno in questa prima fase di simulazione, quelle che possono essere lievi migliorie da introdurre eventualmente in una fase successiva scendendo nel dettaglio con una simulazione 3D.

Bisogna peraltro evidenziare che attualmente non è possibile procedere direttamente con una simulazione 3D per problemi legati alla licenza multi-fisica, in possesso del LEP per il caso elettrotermico e magneto-termico 2D, magneto-termico 3D ma non posseduta per il caso elettro-termico 3D.

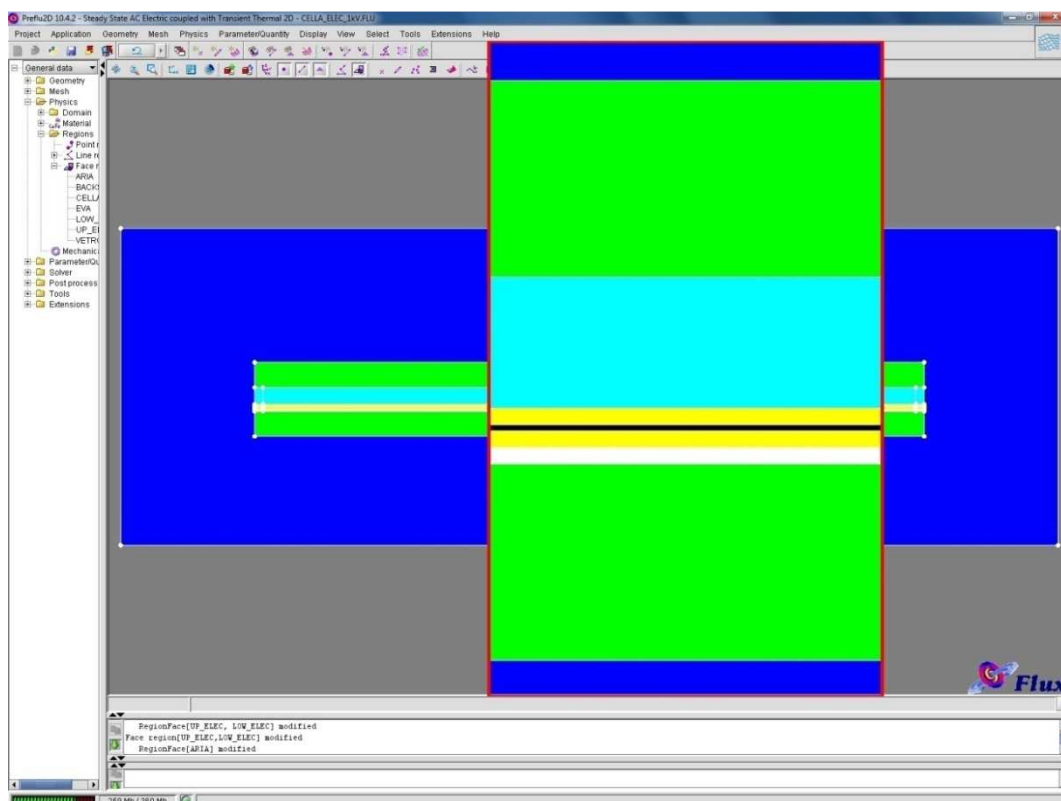


Fig. 11.3 Vista della sezione del modulo con zoom

11.1.2 MESHING DEL DOMINIO DI CALCOLO

“MESHING”

Definita la geometria si deve definire l'accuratezza ed il modo con il quale il risolutore, o “Solver” andrà in seguito a determinare i valori di campo e le temperature di interesse in accordo con i materiali presenti e le relative caratteristiche che verranno definite in seguito.

La rete di nodi interconnessi da tratti di linea costituisce la cosiddetta **mesh** ed essa individua i punti nei quali il solver andrà in seguito a determinare le grandezze volute ed allo stesso tempo definisce il tipo di interpolazione che il solver seguirà nell'eseguire il calcolo in un punto e quindi nei punti adiacenti, in generale lineare o quadratico.

Il software procede automaticamente a “meshare” la geometria con elementi del secondo ordine perché si tratta di un disegno 2D e quindi riesce in modo agevole a piazzare elementi del secondo ordine nel disegno precedentemente eseguito.

L'inserimento di elementi del secondo ordine fa sì che tra un nodo e l'altro sia inserito un terzo nodo a metà del lato che unisce questi due nodi ed è detto appunto “midside node” ovvero nodo di mezzo,

quindi le grandezze ricercate oltre che nei vertici degli elementi vengono calcolate anche nei punti di mezzo dei lati dei suddetti elementi quindi con una accuratezza elevata.

Aspetto importantissimo della mesh è riuscire ad addensare i punti di calcolo laddove interessa conoscere con maggiore precisione i valori di campo e di temperatura per poi allentare invece la maglia dei nodi nelle zone in cui la precisione richiesta è minore.

Nella fattispecie è di particolare interesse conoscere i valori del campo elettrico e le temperature nei materiali interposti tra i due elettrodi rappresentanti la configurazione di riscaldamento mentre è di scarso interesse l'andamento del campo e della temperatura al di fuori degli elettrodi visto che per quanto riguarda il campo elettrico esso sarà vincolato fisicamente da una gabbia di Faraday connessa al potenziale di terra mentre la temperatura è dipendente dalla temperatura dell'ambiente nel quale avviene la prova di riscaldamento.

Nella figura sotto riportata si evidenzia la solita interfaccia utente del modulo di definizione della geometria, della mesh e della fisica del processo con uno zoom sulla libreria della mesh che si viene ad aprire appunto al momento della definizione della mesh.

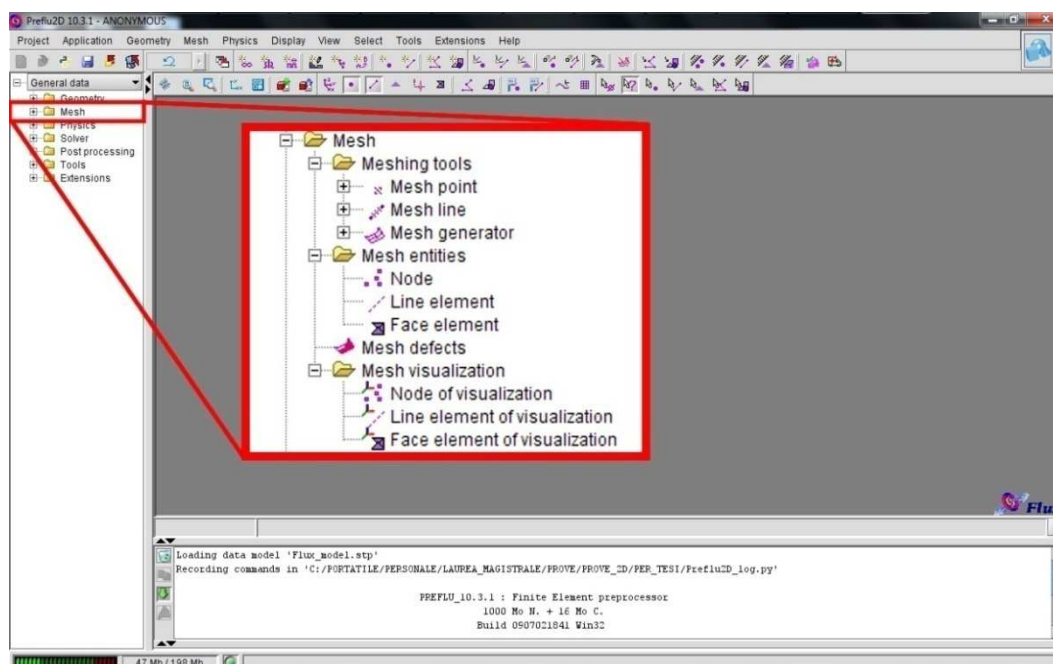


Fig. 11.4 Interfaccia utente della sezione “Mesh” per la definizione della mesh

Dati gli spessori esigui dei materiali in prova la maglia di nodi diviene davvero molto stretta all'interno dei vari strati con distanza tra nodo e nodo dell'ordine dei 10 μm al fine di avere una buona valutazione del campo elettrico e della temperatura lungo la sezione di ciascuno strato, che è dell'ordine di qualche centinaia di μm .

Viceversa all'estremità del dominio di calcolo non interessa conoscere in modo esatto gli andamenti delle medesime grandezze e così si è deciso di tenere la maglia più allentata in modo da alleggerire il processo di meshing e di risoluzione del problema stesso imponendo una distanza, tra nodo e nodo, dell'ordine di circa una decina di centimetri.

Bisogna tenere ben presente inoltre che richiedere una mesh molto fitta può portare ad avere una valutazione molto dettagliata dei campi e delle temperature in ciascun punto del dominio ma ciò oltre a non essere, molto probabilmente, necessario al fine di una valutazione preliminare del processo di riscaldamento, può appesantire di molto invece il procedimento di meshing della geometria richiedendo, anche con le workstation molto potenti presenti in laboratorio, qualche minuto per poi ripercuotersi, in maniera ancor più evidente, sul processo di risoluzione andando così ad impegnare l'elaboratore per tempi dell'ordine della decina di minuti, il che non è ammissibile per una geometria così semplice.

La figura illustra la geometria precedentemente disegnata con la relativa mesh, una volta definiti i parametri voluti sulle linee o sui punti desiderati, di modo tale da addensare o allargare la mesh a seconda dell'interesse voluto.

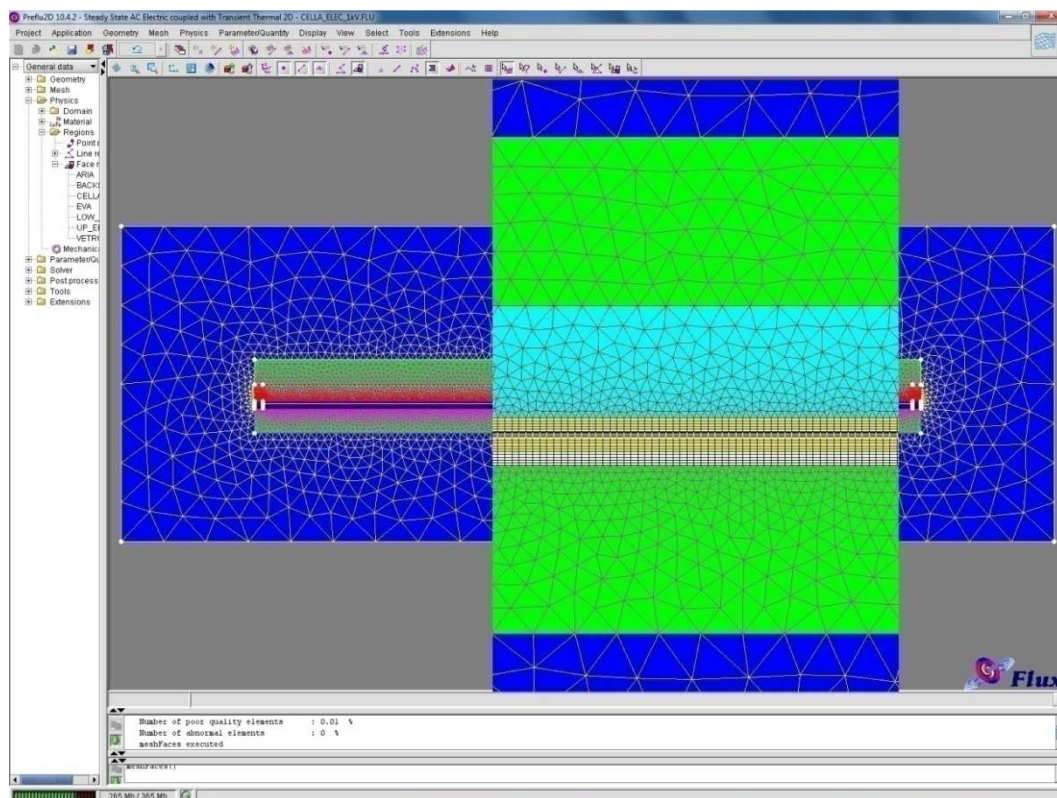


Fig. 11.5 Vista della sezione con la relativa mesh

11.1.3 DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

“APPLICATION”

La definizione del problema consiste nello stabilire e quindi nell'indicare al software che tipo di problema vogliamo risolvere sulla base della geometria disegnata, della mesh assegnata e delle proprietà fisiche ed elettriche che si andranno a definire immediatamente dopo questo passaggio.

Questo strumento di lavoro consente infatti di risolvere vari tipi di problemi, siano essi singolarmente trattati come può essere un problema magnetico, elettrico, termico, ovvero siano essi correlati tra loro come i casi di problemi cosiddetti accoppiati: magneto-termici, elettro-termici.

Se non interessano le implicazioni termiche dovute ad effetti di riscaldamento per diverse cause (effetto Joule, correnti indotte) allora conviene definire il problema secondo la fisica che lo interessa in prevalenza, sia esso magnetico se si vogliono valutare le implicazioni magnetiche derivanti dall'applicazioni di correnti ovvero sia esso elettrico, conduttivo o no, se si vogliono valutare le implicazioni elettriche derivanti dall'applicazione di un campo elettrico.

Nel caso specifico ciò che interessa è la valutazione di fenomeni di riscaldamento dovuti all'applicazione di un campo elettrico variabile con frequenza imposta dal generatore ad alta frequenza, pertanto al momento della definizione del problema si è definito il problema come un caso elettrico in regime stazionario a corrente alternata con accoppiato il transitorio termico derivante ovvero, come lo designa il software, come un caso **Steady State AC Electric Coupled with Transient Thermal 2D**.

All'interno della maschera di definizione del tipo di caso analizzato vanno specificati alcuni parametri molto importanti che sono la frequenza, avendo trattato un caso in corrente alternata ed in regime stazionario, il tipo di dominio, sia esso in piano a due dimensioni o assialsimmetrico, nel caso specifico si tratta di analizzare un caso bidimensionale senza simmetria assiale e quindi va specificata la profondità del dominio.

Altri parametri che si possono impostare sono le unità di misura della temperatura se in gradi Celsius o Fahrenheit, il tipo di risolutore che Flux andrà ad impiegare, nello specifico viene utilizzato il risolutore 2D, che tra l'altro è impostato di default ed infine il riferimento per i potenziali elettrici, se sono da considerarsi flottanti, e quindi andranno definite a parte le condizioni al contorno, ovvero imposti dallo stesso software; nel caso specifico, si sono impostati flottanti andando a definire le condizioni di bordo sul caso specifico, in un secondo momento.

La figura illustra la maschera di definizione del tipo di problema e dei parametri fondamentali che sono appunto quelli appena elencati.

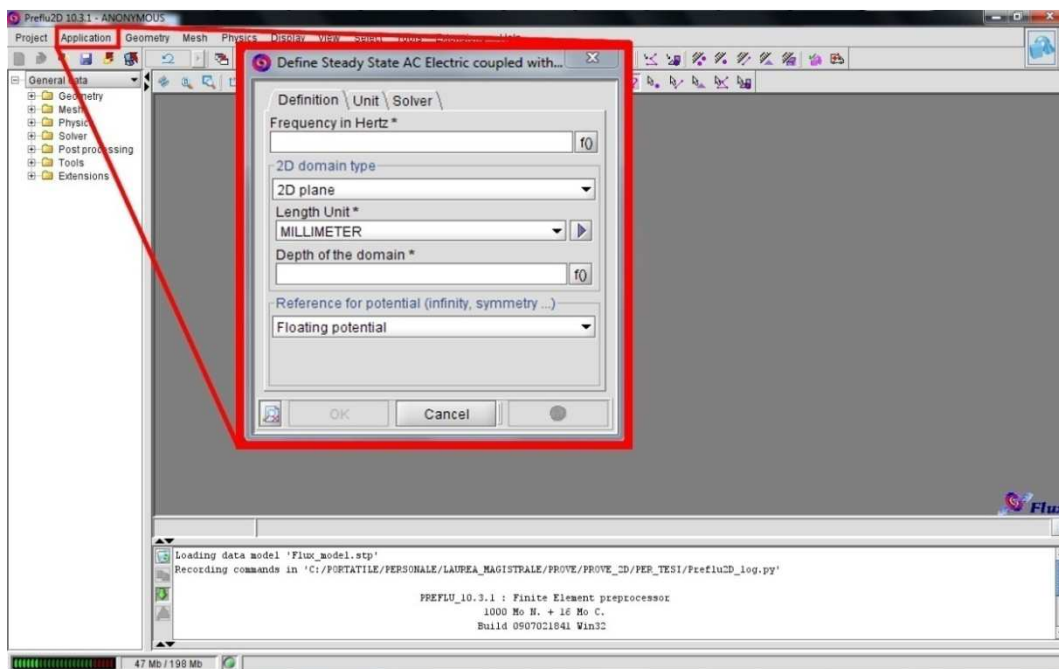


Fig. 11.6 Maschera di definizione del tipo di problema da analizzare

11.1.4 DEFINIZIONE DELLE PROPRIETÀ FISICHE “PHYSICS”

Una volta definita la geometria da analizzare e la mesh con la quale studiare il problema in esame si devono definire i materiali e quindi le proprietà fisiche (e nel caso specifico pure quelle elettriche) che caratterizzano le varie regioni all'interno della geometria costruita al passo precedente.

Tale definizione può essere effettuata mediante l'importazione da un database, compreso nel software di simulazione, dei materiali e delle relative caratteristiche ovvero mediante la definizione ad hoc di materiali e caratteristiche annesse nel caso in cui tali materiali non siano già presenti all'interno della libreria di Flux.

Nel caso specifico si sono considerati materiali un po' particolari o meglio che non si incontrano di frequente in problemi analizzati con Flux e forse anche per questo non comparivano all'interno della libreria specifica; per far fronte a ciò si sono quindi dovuti definire appositamente i materiali e le relative caratteristiche ricavate dalla letteratura e da data sheet di produttori di tali materiali.

La figura riporta la solita interfaccia utente per la definizione della geometria, della mesh e della fisica del caso in esame, lo zoom si sofferma sulla libreria “Physics” che si viene ad espandere al momento della definizione delle caratteristiche fisiche del problema in esame.

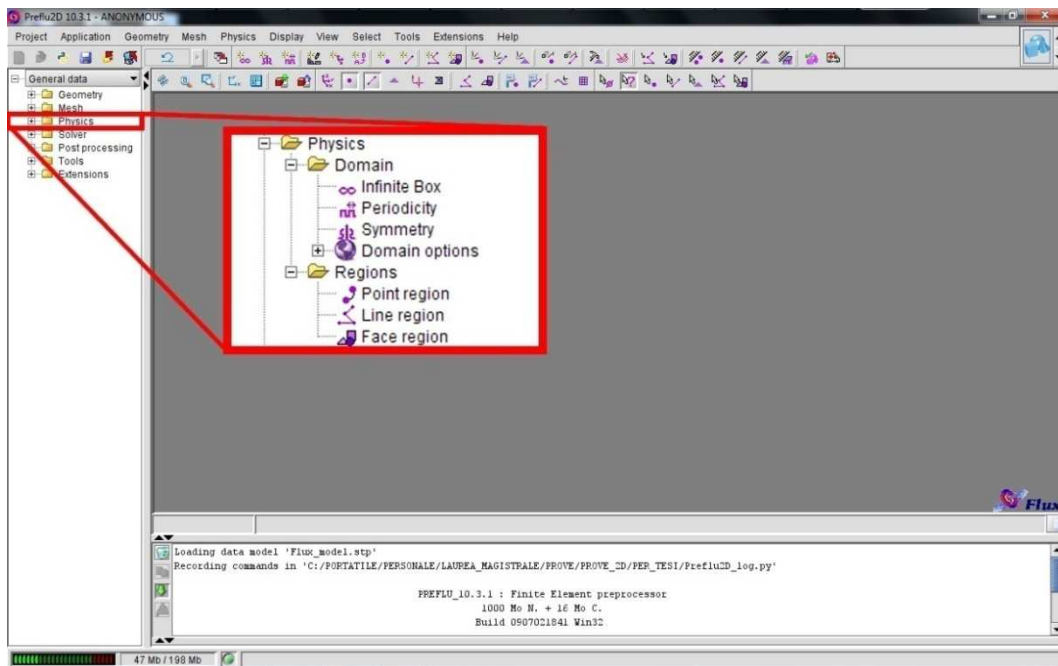


Fig. 11.7 Interfaccia utente della sezione “Physics” per la definizione delle caratteristiche fisiche

Una volta definiti quindi i materiali e le caratteristiche relative si è proceduto con l’assegnazione a ciascuna regione presente nella geometria, del relativo materiale costituente; ciò avviene molto semplicemente in pochi passaggi anche se occorre prestare un po’ di attenzione alla definizione del comportamento termico ed elettrico per evitare di trascurare fenomeni di riscaldamento dove vi possano essere e viceversa.

L’immagine riporta la maschera di definizione di un nuovo materiale con le relative caratteristiche fisiche, elettriche, magnetiche, termiche contenute in apposite sottosezioni come evidenziato dal riquadro in rosso.

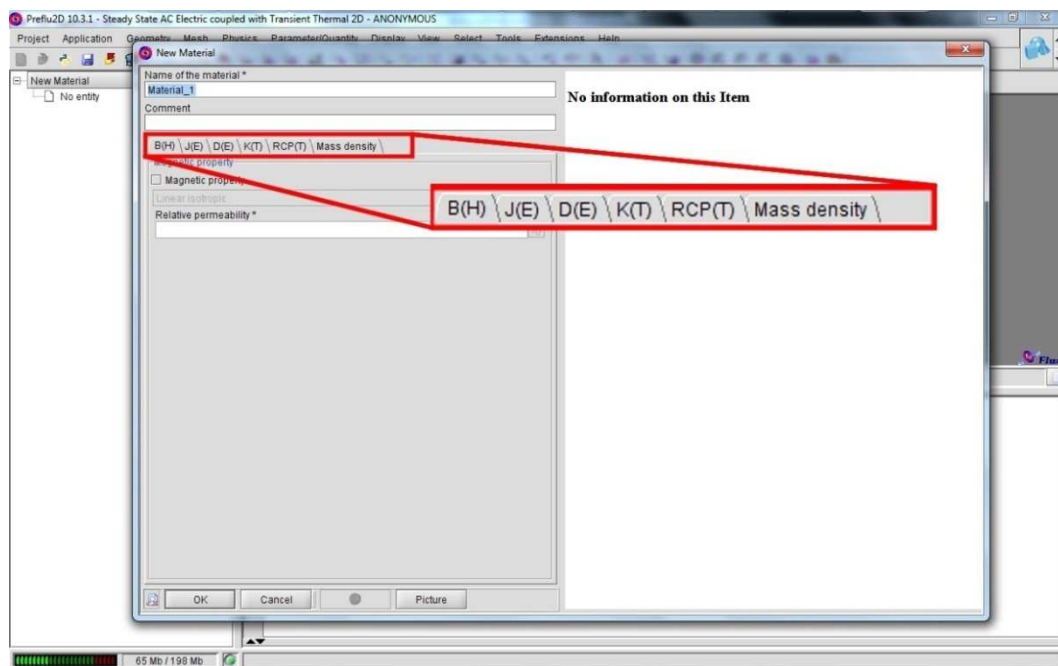


Fig. 11.8 Maschera di definizione di un nuovo materiale e delle relative caratteristiche

Molta attenzione dev'essere posta anche nella definizione delle proprietà di ciò che racchiude l'oggetto in esame, nella fattispecie aria, e nella definizione delle condizioni alle estremità del dominio per quanto riguarda una possibile condizione circa la temperatura dell'ambiente circostante, che si è ritenuta essere come avviene nelle normali applicazioni all'incirca a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ed alle condizioni del campo elettrico nella medesima condizione di bordo del dominio, nel caso specifico si è fissato un potenziale di riferimento a potenziale nullo e quindi a 0 V , considerando una gabbia di Faraday posta attorno al dispositivo e connessa a terra, il tutto per ragioni di sicurezza.

Nella definizione delle proprietà fisiche vanno anche individuate e specificate le condizioni che si vanno ad applicare con il processo di riscaldamento ovvero nel caso specifico l'applicazione di un potenziale tra le due armature del condensatore di lavoro ad una determinata frequenza che a sua volta instaura un campo elettrico variabile con la stessa legge del potenziale imposto.

In una prima fase si è ritenuto opportuno considerare come elettrodo, superiore ed inferiore, una regione di spessore nullo definendo così una "Line Region" in modo tale da considerare il campo elettrico applicato direttamente sull'oggetto all'interno del condensatore di lavoro, solamente in un secondo momento si è supposto di considerare il potenziale elettrico come applicato uniformemente sullo spessore degli elettrodi.

Attuando una semplificazione che comporta errori trascurabili nei confronti dei risultati ottenuti, si sono impiegate due "line regions" ai contorni degli elettrodi potendo considerare questi ultimi come perfetti conduttori e considerando il campo applicato direttamente al modulo.

La figura illustra in maniera evidente dove sono state applicate le due line regions rappresentanti ciascuna uno dei due potenziali applicati alle due diverse armature del condensatore di lavoro, come si può vedere le due line regions sono state adagate alle facce delle armature del condensatore e sono state ipotizzate avere uno spessore nullo.

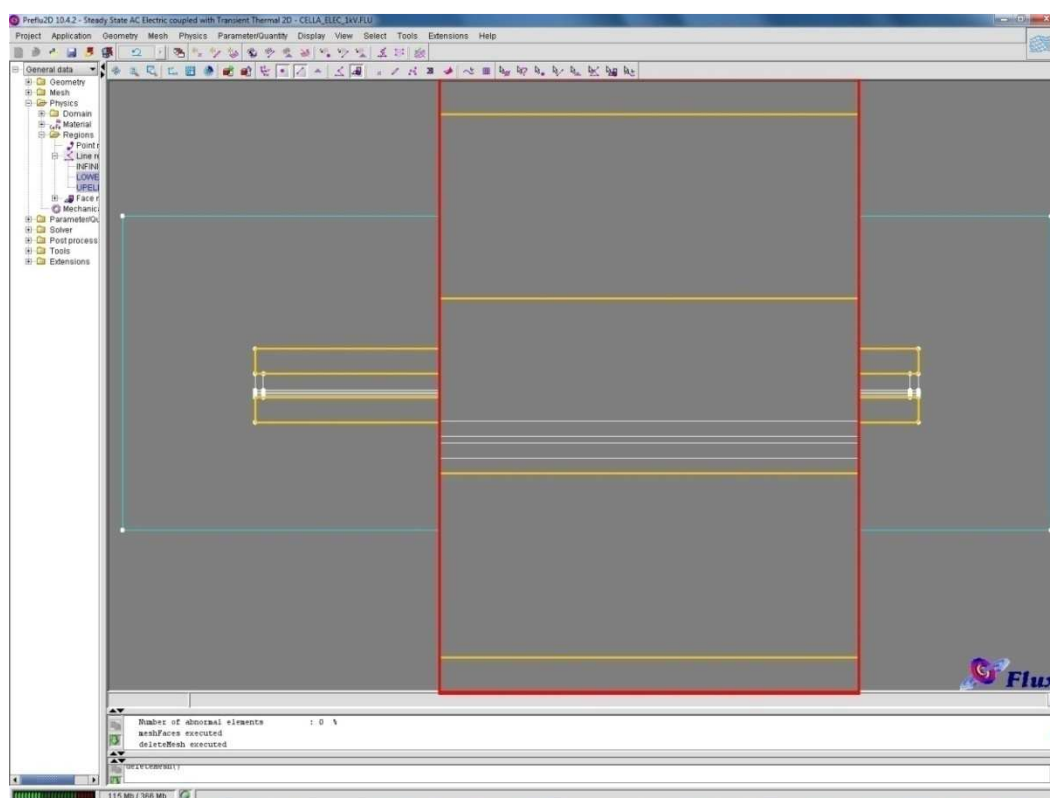


Fig. 11.9 Vista delle line regions applicate agli elettrodi

11.1.5 RISOLUZIONE DEL PROBLEMA

“SOLVING PROCESS”

Il processo di risoluzione del problema consiste nel risolvere le equazioni che descrivono la geometria e le caratteristiche dei materiali una volta che siano imposte le condizioni al contorno, siano esse

dovute alle imposizioni dettate dal campo elettrico applicato o dalle condizioni al contorno dovute alla temperatura dell'ambiente ed al potenziale imposto dalla gabbia di Faraday di sicurezza.

Trattandosi, nella fattispecie, di un problema nel dominio del tempo ovvero volendo valutare istante per istante come evolve il processo di riscaldamento, le suddette equazioni devono essere risolte anch'esse istante per istante al fine di verificare, per ciascuno di questi istanti, come sono distribuiti campi, potenze e temperature in gioco nel sistema.

La figura illustra l'interfaccia utente per la definizione dei parametri di risoluzione del problema, come si vede si tratta di un'interfaccia diversa, da richiamare dal "Flux Supervisor" una volta definite geometria, mesh e fisica del caso in analisi; la maschera evidenziata illustra i parametri impostabili.

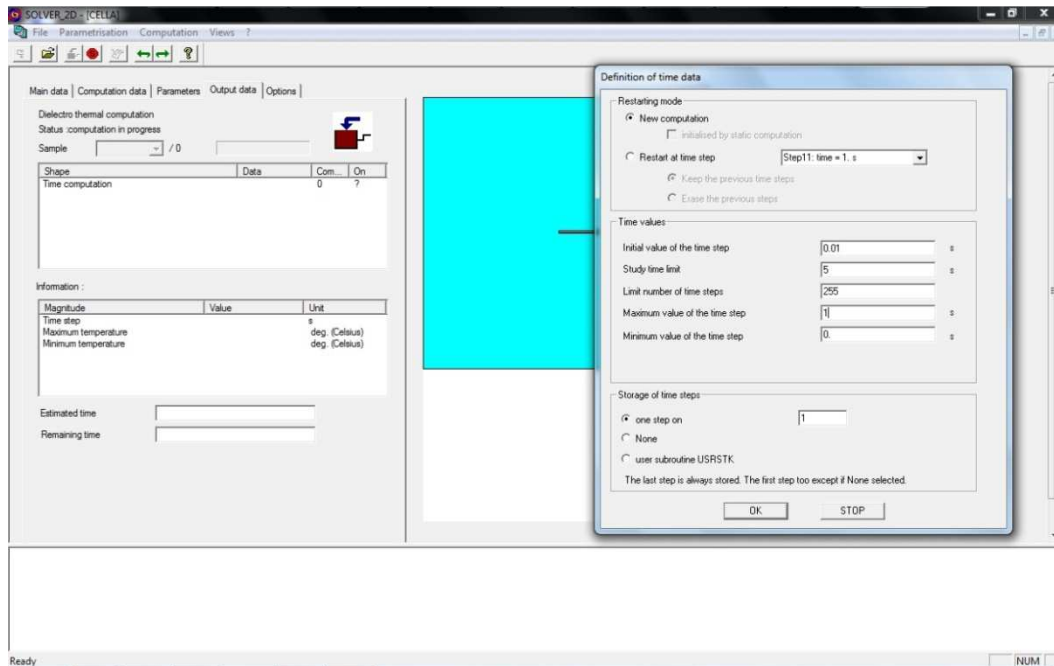


Fig. 11.10 Interfaccia utente del solver "Direct" per la risoluzione del problema in analisi

Ecco quindi che trova estrema importanza la definizione di intervalli temporali non troppo lunghi, per non correre il rischio di ricavare degli assurdi di fatto facendo divergere il processo che invece per fornire soluzione unica dovrebbe convergere, né troppo brevi per non appesantire l'elaboratore e quindi impiegare troppo tempo per la risoluzione del problema.

Un altro parametro da impostare al momento della risoluzione del sistema sta nel definire gli istanti di inizio e di fine della simulazione essendo impossibile la definizione di un istante precedente allo 0 ed essendo il tempo di risoluzione proporzionale con l'intervallo temporale di simulazione.

Un ulteriore parametro da definire al momento del lancio della simulazione è il numero massimo di iterazioni che il "Solver" (risolutore) è abilitato a compiere prima di fermarsi comunicando un messaggio di notifica per l'avvenuto raggiungimento del numero massimo di step iterativi.

Il processo impiegato di default nella risoluzione dei problemi con Flux è infatti il metodo Newton-Raphson il quale è un metodo iterativo che risulta estremamente rapido nel caso in cui esso sia convergente ma che presenta lo svantaggio di non essere un metodo assolutamente convergente; ecco allora che la definizione di un numero massimo di step iterativi fornisce una garanzia sulla ricerca della soluzione, viceversa si correrebbe il rischio di lasciare lavorare l'elaboratore per niente non essendovi mai una convergenza tale da fermare la simulazione.

Un ultimo parametro da definire al momento della simulazione sta nel definire la temperatura iniziale dell'ambiente e dell'oggetto sede dello studio; esso in genere viene posto uniforme e pari alla temperatura dell'ambiente circostante e quindi all'incirca attorno ai 20 °C ma possono essere specificate condizioni diverse a seconda che si voglia valutare ad esempio un processo di raffreddamento prendendo come temperature iniziali quelle registrate durante un precedente processo di riscaldamento, importando un apposito file contenente tali temperature.

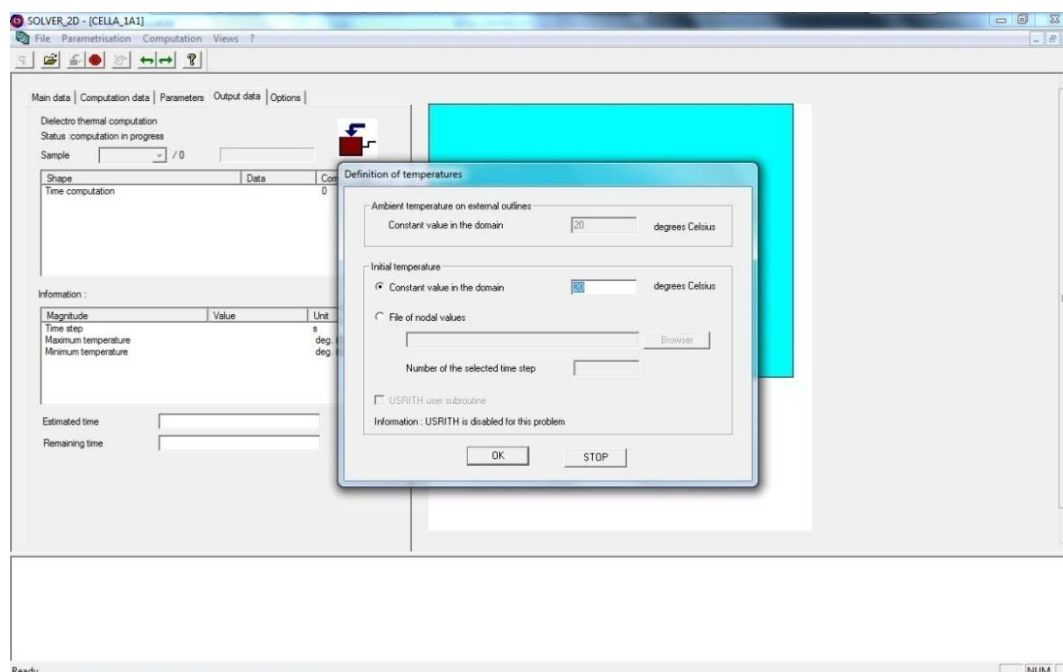


Fig. 11.11 Maschera per la definizione della temperatura all'inizio della simulazione

Le equazioni che descrivono la geometria e le condizioni al contorno non sono esplicitamente leggibili dall'operatore visto che l'interfaccia è semplificata al fine di consentire anche ai non esperti di utilizzare uno strumento così potente ma relativamente complicato.

Tale processo può impiegare, in applicazioni particolarmente complesse, tempi molto lunghi, dell'ordine di giorni, tuttavia nel caso in questione vista la semplicità geometrica e la fisica abbastanza semplice si è cercato di mantenere tale processo entro l'ordine di qualche decina di minuti, ottenendo peraltro passi temporali massimi dell'ordine del secondo.

Durante la simulazione è possibile seguire in maniera veramente semplice gli step che il solver compie al fine di determinare l'andamento temporale del processo di riscaldamento, nel caso in oggetto, si notano chiaramente gli istanti temporali che esso sta analizzando e vengono pure riassunte le temperature massima e minima riscontrate nel dominio in analisi.

11.1.6 POST-PROCESSING E VALUTAZIONE DEI RISULTATI "RESULTS"

Il post-processing, che tradotto sta ad indicare un'analisi post-processo, quindi a processo ultimato, sta ad indicare tutte le attività che possono essere compiute una volta risolto il problema mediante il "Solver" ovvero una valutazione dei campi, siano essi elettrici o magnetici, delle temperature e di tutte le grandezze che il software è in grado di determinare come ad esempio potenza attiva, reattiva, tensioni, correnti, ecc.

Raccolto in una interfaccia a sé stante, il post processing viene denominato col termine "Results", il che è molto eloquente e rende immediatamente l'idea di ciò di cui si tratta, viene aperto anch'esso dall'interfaccia Preflu ed è lo strumento più interessante al fine di una valutazione qualitativa e quantitativa dei risultati ottenuti.

Esso risulta in realtà lievemente meno semplice nell'utilizzo, per quanto riguarda la rapidità in alcuni comandi come lo zoom, la selezione, ecc rispetto all'interfaccia Geometry and Physics ma risulta però essere molto efficace dal punto di vista della valutazione dei risultati.

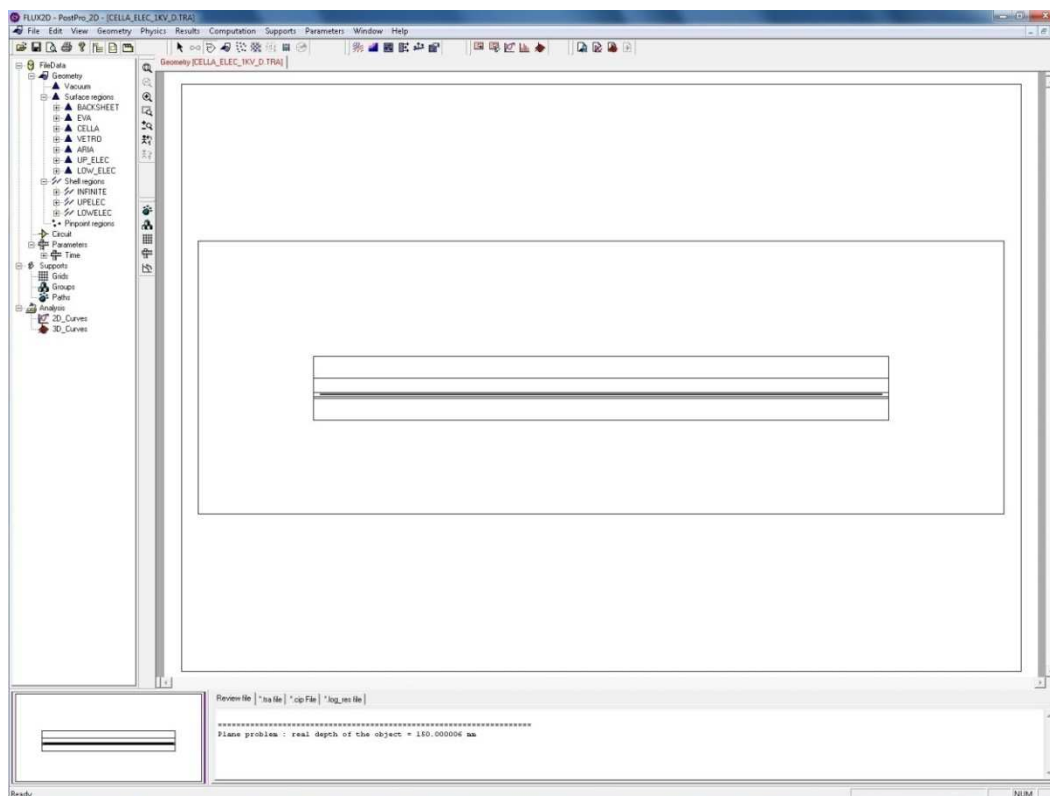


Fig. 11.12 Interfaccia della sezione Results per la valutazione dei risultati

Mediante diverse modalità grafiche si possono esprimere tramite mappe a colori, vettori, linee di campo, grafici e diagrammi le diverse grandezze di interesse, si possono inoltre determinare, una volta dato il comando di calcolarle, grandezze non direttamente leggibili come possono essere l'energia elettrostatica o magnetica immagazzinate in un oggetto ovvero tensioni e correnti circolanti o caratterizzanti aree specifiche del circuito/oggetto in esame selezionabili a piacere.

Si possono definire linee o sezioni a piacere e lungo di esse si possono determinare grandezze diverse, ad esempio il campo elettrico o altre variabili, per poi andarle a computare su diagrammi o grafici al fine di una valutazione di come queste grandezze variano lungo la linea o sezione designata in precedenza.

Uno strumento che si è dimostrato molto utile nel caso specifico è stato il modulo di animazione, nello specifico di Flux "Animation", il quale permette di valutare, una volta selezionata una grandezza di interesse, come questa vari durante l'intervallo di simulazione ad intervalli regolari e con velocità impostabile a piacere ovvero selezionando un istante a scelta valutare come sono distribuiti in quell'istante le grandezze di interesse.

Sono poi possibili molte altre opzioni di visualizzazione e di valutazione dei risultati ma per il caso in esame, di fatto abbastanza semplice per uno strumento potente come Flux, non sono state ritenute necessarie altre valutazioni specifiche in merito e comunque sia se in seguito se ne volesse anche fare ricorso non si necessita di un nuovo processo di risoluzione visto che comunque tutti i risultati sono immagazzinati e disponibili nei file di risultati già scritti in precedenza.

Per quanto riguarda il caso specifico l'interesse è stato rivolto alla valutazione di un effettivo riscaldamento dell'oggetto inserito all'interno del condensatore di lavoro ovvero della singola cella fotovoltaica ed una volta appurato che ciò avviene, all'analisi di quale zona dello spessore viene a riscaldarsi in prevalenza e come il flusso di calore si diffonde nel modulo fotovoltaico.

Come si può evidenziare dalle immagini sotto riportate il calore si viene a sviluppare dapprima all'interfaccia tra la cella in silicio e lo strato di EVA quindi diffonde verso l'esterno andando ad immagazzinarsi nel vetro che ha una bassa conducibilità termica mentre il backsheet rimane a temperatura inferiore essendo in contatto con l'elettrodo in materiale conduttore, sia dal punto di vista elettrico che da quello termico.

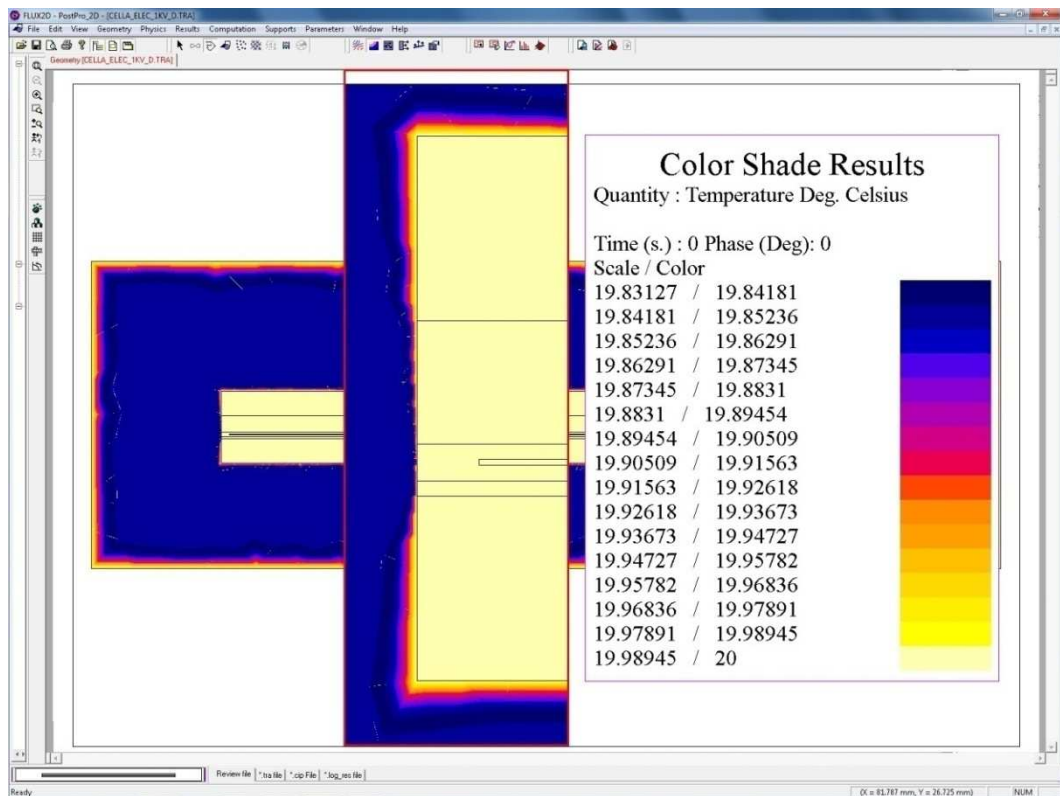


Fig. 11.13 Situazione all'istante iniziale, $t = 0$ [s]

Nell'istante iniziale sebbene la mappa a colori sia ben differenziata, in realtà la temperatura è omogeneamente distribuita in tutto il dominio, supposto alla temperatura di 20 [°C].

Le differenze evidenziate, sebbene non siano giustificate a livello fisico avendo supposto una temperatura omogenea ovunque, sono comunque comprese entro due decimi di grado e quindi di fatto sono inesistenti.

A partire da questa configurazione iniziale si avrà l'inizio del processo di riscaldamento che, come sarà evidenziato nelle immagini seguenti, andrà diffondendosi dai materiali polimerici verso l'esterno interessando dapprima il vetro e la cella in silicio quindi andando a riscaldare gli elettrodi del condensatore di lavoro.

Considerando un ambiente molto esteso rispetto al dispositivo, come avviene di fatto in una configurazione standard, l'approssimazione di considerare una temperatura uniforme nella zone circostante gli elettrodi è giustificata visto che i naturali moti convettivi che si vengono a creare fanno sì che il condensatore di lavoro sia sempre lambito da aria provenienti da zone distanti e quindi alla temperatura di 20 [°C].

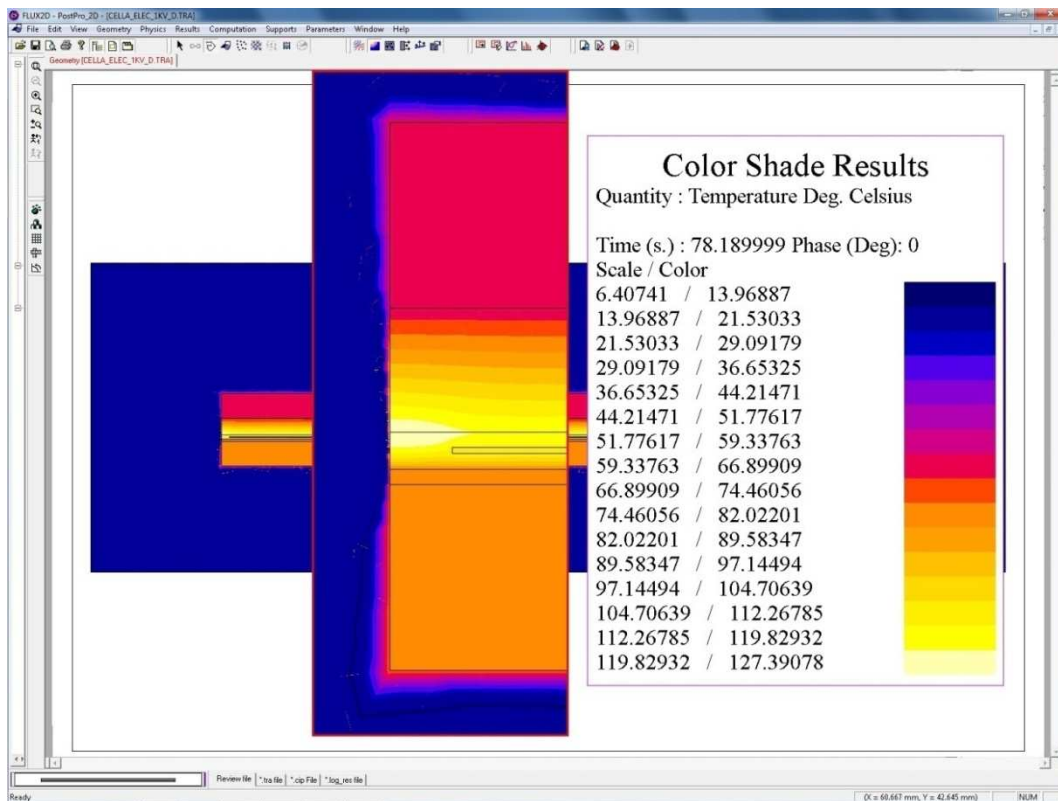


Fig. 11.14 Situazione ad un istante qualsiasi, $t = 78,19$ [s]

In questa seconda immagine, campionata all'istante temporale di 78,19 [s] dall'inizio del processo di riscaldamento si nota come il calore è localizzato all'interno della sezione del modulo fotovoltaico.

Gli elettrodi del condensatore di lavoro che mettono in gioco dal punto di vista termico la sezione del modulo con l'aria circostante, si trovano appunto ad una temperatura intermedia tra quella dell'aria, supposta inizialmente pari a 20 [°C] e quella assunta dalla sezione riscaldata, con valore massimo di 127,39 [°C], nell'istante temporale considerato.

Si nota, a dire il vero, una leggera differenza di temperatura tra l'elettrodo superiore, al quale è applicato il potenziale superiore, e l'elettrodo inferiore, al quale è applicato il potenziale di massa.

Tale configurazione termica non trova in prima analisi una giustificazione fisica visto che entrambi gli elettrodi si dovrebbero riscaldare per conduzione tramite il calore sviluppato nei materiali termoplastici sede del processo di riscaldamento per perdite dielettriche ed al limite quello superiore essendo a contatto con un materiale isolante termicamente (vetro) si dovrebbe trovare ad una temperatura inferiore rispetto all'altro elettrodo.

Bisognerà quindi investigare sperimentalmente se ciò si verifica effettivamente nella realtà ed analizzare eventualmente il fenomeno al fine di determinarne la causa, tuttavia non essendo oggetto di questa tesi l'analisi di tale aspetto, questa valutazione verrà tralasciata a favore di un'analisi più dettagliata invece della fattibilità tecnica del processo.

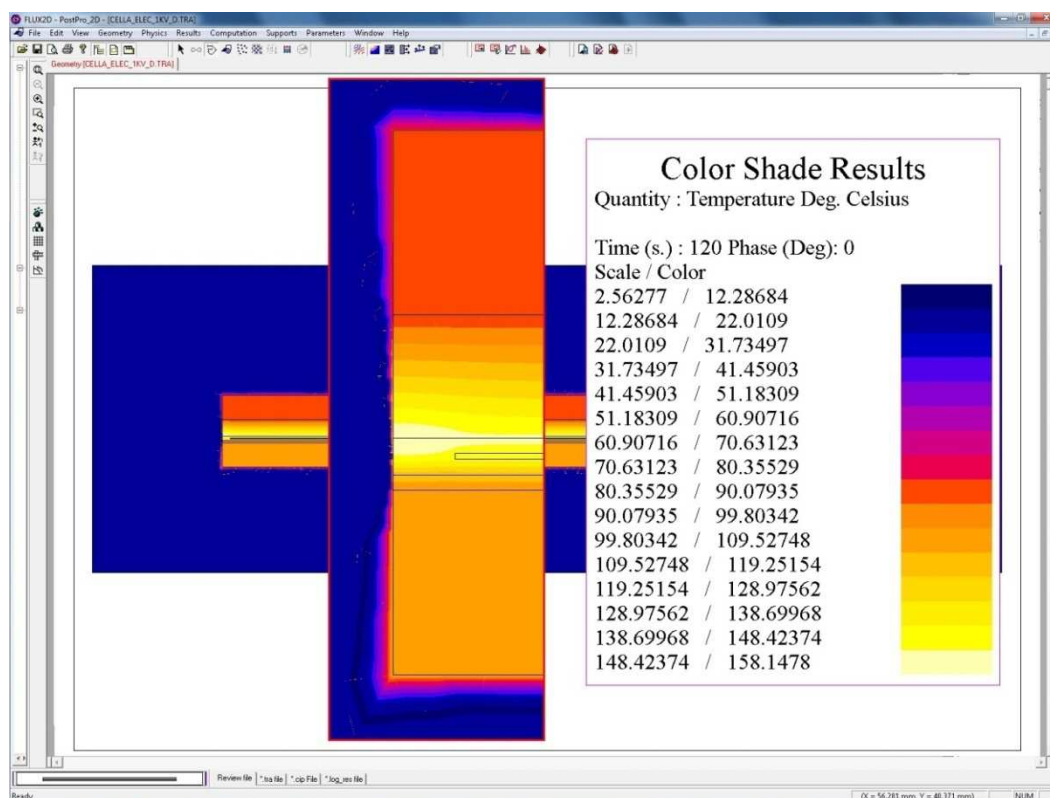


Fig. 11.15 Situazione all'istante finale, $t = 120$ [s]

In quest'ultima immagine si nota come, analogamente all'immagine precedente, anche alla fine del processo di riscaldamento, supposto per ipotesi all'istante temporale di 120 [s], si raggiunga all'interno della sezione una temperatura di tutto riguardo con appena due minuti di applicazione del campo elettrico.

Nella fattispecie viene raggiunta una temperatura massima di circa 160 [°C] e tale temperatura la si raggiunge in prossimità della superficie di interfaccia tra il vetro e lo strato di eva che lo fa aderire al resto dei componenti.

Nonostante lo strato di fondo del modulo non sia la parte a più alta temperatura, comunque il backsheet raggiunge una temperatura di circa 100 [°C], temperatura alla quale esso può essere rimosso abbastanza agevolmente.

11.2 CONSIDERAZIONI SULLE SIMULAZIONI ALL'ELABORATORE

Stando alle simulazioni ottenute con il software Flux, in generale validate dall'esperienza pratica, visto che è brevettata a livello mondiale una metodologia per la laminazione di moduli fotovoltaici tramite riscaldamento per perdite dielettriche, gli strati termoplastici contenuti nel modulo vengono a riscaldarsi e questi scaldano per conduzione tutto il pannello e quindi gli elettrodi applicatori di campo.

Il fatto che i polimeri e di conseguenza il modulo nel suo insieme si vengono a riscaldare non sono comunque indice della fattibilità tecnica del processo così come ipotizzato, numerose variabili si devono infatti considerare in maniera più approfondita come la conduzione del calore dal modulo verso l'ambiente.

Bisognerà verificare infatti se il solo riscaldamento, comunque ad una temperatura adeguata, consente una rimozione agevole e quindi una separazione dei vari materiali costituenti il modulo senza arrivare alla necessaria fusione o incenerimento così come avviene già peraltro con le metodologie brevettate.

Se si riescono a separare i materiali costituenti il modulo senza giungere a temperature troppo elevate infatti si evitano emissioni gassose da tenere sotto controllo vista la loro potenziale nocività se non adeguatamente rimosse e trattate.

In generale si può prospettare un lavoro di prove sperimentali al fine di validare una tale procedura anche piuttosto complessa e non trascurabile in termini di tempo, volendo contemporaneamente cercare di ottenere risultati nel più breve tempo possibile vista l'ormai imminente iscrizione dei moduli fotovoltaici all'interno della lista dei rifiuti cosiddetti RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche).

12 PROVE SPERIMENTALI

Una volta effettuate le simulazioni all'elaboratore necessarie a fugare eventuali dubbi circa la possibilità di un riscaldamento per perdite dielettriche dei moduli fotovoltaici, è risultato naturale procedere con la verifica sperimentale di ciò che l'elaboratore ha in una prima fase confermato.

Sebbene dal punto di vista teorico ciò risulti logico ed in un primo momento può essere considerato pure semplice, dal punto di vista pratico così stato visti diversi problemi con i quali si è dovuto fare i conti.

La prova sperimentale è innanzitutto rientrata in un ambito particolare, non affrontato quotidianamente all'interno del LEP, diversamente dai processi di riscaldamento ad induzione per i quali il Laboratorio risulta essere ben attrezzato e le competenze molto valide.

L'attrezzatura stessa impiegata è di fatto risultata essere stata utilizzata molto poco in passato e pertanto si è dovuto prestare particolare attenzione ed una lettura accurata dei manuali di istruzioni (esclusivamente in lingua inglese con qualche schema elettrico pure in tedesco) al fine di riuscire ad usarla ed al contempo non provocare danni a persone o cose.

Gli elettrodi applicatori di campo inoltre si sono dovuti disegnare e progettare ad hoc non esistendo di fatto una configurazione standard che permetta di impiegare il generatore e la relativa matchbox così come stanno.

Questi motivi hanno quindi leggermente rallentato un processo di verifica delle simulazioni al pc, vero cuore insieme allo studio dello stato dell'arte in materia, della tesi di laurea.

La parte sperimentale della tesi ha affrontato i seguenti punti chiave, in seguito espressi in maniera esaustiva singolarmente:

- STUDIO DEL GENERATORE E DELLA MATCHBOX AD ALTA FREQUENZA
- DISEGNO PRELIMINARE DEL CONDENSATORE DI LAVORO
- PROVE SPERIMENTALI IN DIVERSE CONFIGURAZIONI OPERATIVE

12.1 STUDIO DEL GENERATORE AD ALTA FREQUENZA

Sebbene sia considerato come un unico dispositivo, in realtà il generatore ad alta frequenza è fisicamente costituito da due dispositivi atti a realizzare il generatore ed il circuito di alimentazione del condensatore di lavoro.

Ovviamente le due apparecchiature, per ottenere un adattamento ed un'interconnessione ottimale sono realizzati dal medesimo costruttore, nella fattispecie trattasi di apparecchiatura *TRUMPF*[®] del gruppo tedesco *HÜTTINGER ELEKTRONIK GMBH+CO*.

Questi due elementi sono:

- | | |
|---|---------------------|
| – Generatore ad alta frequenza | <i>QINTO 3013 M</i> |
| – Cavo coassiale di interconnessione RG 214 | |
| – Doppio cavo in fibra ottica | |
| – Adattatore di carico | <i>PFM 3000 A</i> |

Questi due dispositivi formano un tutt'uno dal punto di vista funzionale poiché mentre il generatore, come dice il termine stesso, genera la tensione ad alta frequenza, l'adattatore di carico (detto anche *MATCHBOX*) consente il collegamento tra generatore e condensatore di lavoro creando all'uscita del generatore ad alta frequenza una configurazione tale che il generatore veda un'impedenza costante pari a $50 [\Omega]$.

La matchbox è indispensabile poiché per far sì che il generatore venga ad erogare potenza attiva, assorbita da rete e convertita ad alta frequenza, deve vedere alla propria porta di uscita un carico quanto più resistivo possibile per evitare di assorbire o erogare potenza reattiva.

D'altra parte l'applicatore di campo è di fatto un condensatore e come tale verrebbe ad erogare potenza reattiva di tipo capacitivo che il generatore gli dovrebbe fornire; per far sì che ciò non avvenga si deve necessariamente introdurre, alla medesima porta dalla quale viene alimentato il

condensatore di lavoro, un carico atto ad assorbire/erogare la medesima potenza reattiva, ma di segno opposto, assorbita dal condensatore.

Questa potenza reattiva può essere messa in gioco da un carico reattivo di tipo induttivo (di fatto un'induttanza di adeguato valore) o meglio da un carico in grado di fornire di volta in volta la potenza reattiva richiesta dall'applicatore di campo.

Un siffatto carico è realizzato mediante un induttore di valore fisso (raffreddato ad acqua) e due condensatori di valore variabile comandati da due servomotori atti a seguire l'applicatore di campo in modo da avere un'impedenza di uscita sempre pari a $50 [\Omega]$.

Il cavo coassiale in ultima analisi, ma non per una minore importanza, consente l'interconnessione tra le due apparecchiature di fatto non realizzabile mediante conduttori classici vista l'elevata frequenza della tensione in gioco.

Viceversa il cavo coassiale fornito, che presenta un'impedenza caratteristica di $50 [\Omega]$ è in grado di trasferire segnali in tensione ad una tale frequenza ($13,56 [\text{MHz}]$) senza apportare apprezzabili attenuazioni del segnale stesso.

Un'osservazione a parte bisogna riservare al sistema di raffreddamento essendo realizzato mediante un circuito idraulico che interessa sia il generatore ad alta frequenza che la matchbox, esso deve infatti asportare le perdite insite nel sistema che vengono convertite in calore, calore che potrebbe surriscaldare e quindi danneggiare le apparecchiature stesse.

12.1.1 GENERATORE AD ALTA FREQUENZA

QINTO 3013M

Cuore del processo di riscaldamento ad alta frequenza è certamente il generatore ad alta frequenza ovvero trattasi di un dispositivo in grado di convertire la tensione ai suoi morsetti di alimentazione a frequenza industriale, $50 [\text{Hz}]$, in una tensione ad un valore diverso, superiore e/o inferiore ed a frequenza nettamente superiore, nella fattispecie a $13,56 [\text{MHz}]$.

Il generatore integra due circuiti elettrici, uno idraulico e varie interfacce per l'utilizzatore: i circuiti elettrici sono quelli di alimentazione a bassa frequenza e quello di uscita ad alta frequenza, il circuito idraulico è quello che provvede al raffreddamento del dispositivo stesso mentre le interfacce di comunicazione per l'utente sono rappresentate da diverse porte digitali che attraverso vari protocolli di comunicazione consentono il collegamento diretto con un elaboratore.

La figura di seguito riportata mostra il generatore ad alta frequenza, come si può ben vedere non vi è la possibilità di interagire direttamente con il generatore come avviene invece con un altro modello (QINTO 3013) dotato di display e pulsanti di navigazione, il solo modo per accedere alle impostazioni dello strumento è quello di utilizzare un personal computer appositamente configurato.



Fig. 12.1 Generatore ad alta frequenza QINTO 3013 M

Alle estremità di esso, il generatore presenta due pannelli nei quali sono collocati tutti i possibili sistemi che il generatore ha per comunicare con l'utente, per essere alimentato da rete, per essere connesso al circuito di raffreddamento, per comunicare con il personal computer dedicato e per alimentare la matchbox in alta frequenza.

Nel pannello anteriore si possono notare i seguenti dispositivi:

- Morsetti di alimentazione
- Interruttore generale
- Ingresso ed uscita del circuito acqua di raffreddamento
- Connettore di massa
- Connettore coassiale di uscita in alta frequenza

Viceversa nel pannello posteriore si possono notare altri dispositivi che sono:

- Porte di comunicazione analogico/digitali
- Connettori per cavo in fibra ottica
- Connettori per comunicazione con un oscillatore eventuale
- Led di segnalazione di vari stati del generatore
- Interruttori rotanti di regolazione per impostazioni di comunicazione

Al di là di ciò che risulta visibile agli occhi e quindi essenzialmente ciò che è collocato ai pannelli frontale e posteriore, risulta interessante indagare sulle caratteristiche tecniche del generatore suddetto.

Così come riportato nelle specifiche tecniche [30] si possono recuperare le seguenti informazioni, facendo riferimento solamente al modello in nostro possesso e non all'intera gamma di generatori Hüttinger:

ALIMENTAZIONE

Tensione di alimentazione	[V]	3 x 400 ± 10 %
Frequenza di alimentazione	[Hz]	50/60
Potenza assorbita massima	[VA]	4800
Fusibile di protezione	[A]	16

L'alimentazione avviene mediante connessione alla morsettiera trifase

USCITA

Potenza Nominale (all'uscita)	[W]	3000
Frequenza di lavoro	[MHz]	13,56 ± 0.005 %
Impedenza di carico nominale	[Ω]	50
Range di regolazione della potenza	[W]	25 - 3000

CAVO DI INTERCONNESSIONE

Tipo		RG 214
Impedenza caratteristica	[Ω]	50
Connettore		7/16

Tabella 12.1 Specifiche tecniche generatore QINTO 3013 M

DESCRIZIONE DEL PANNELLO ANTERIORE

Il pannello anteriore gestisce di fatto i circuiti di potenza e di raffreddamento, creando tra l'altro una situazione di convivenza poco desiderabile vista la vicinanza fisica tra la connessione elettrica e quella idraulica.

L'alimentazione del generatore avviene mediante la connessione alla morsettiera trifase posta sul pannello frontale dello stesso, a dire il vero in maniera abbastanza spartana non essendo prevista di fatto una valida protezione contro i contatti diretti avendo infatti un grado di protezione, così come riportato tra i dati tecnici [30], IP 21.

Da quanto si può apprendere dallo schema elettrico del generatore e dalle specifiche tecniche, l'interruttore principale, che si trova in posizione pressoché centrale nel pannello frontale, ha la sola funzione di interrompere l'alimentazione ma non provvede ad alcuna funzione di protezione contro guasti o sovraccarichi che possono avvenire a valle dello stesso.

Le boccole di collegamento del circuito idraulico di raffreddamento si trovano a dire il vero in una posizione non proprio auspicabile poiché essendo di fatto sopra e molto vicine all'interruttore generale, in caso di perdita di acqua dal circuito di raffreddamento vi può essere un'eventuale infiltrazione verso i contatti dello stesso.

In basso a destra è presente un connettore a bullone e dado per il collegamento del generatore, come deve avvenire per altro anche per la matchbox, all'impianto di terra dell'impianto elettrico dal quale viene alimentato; inoltre il collegamento di terra avviene mediante la morsettiera trifase di alimentazione essendo previsto un contatto ad hoc a tal fine.

Infine il connettore coassiale di uscita per l'interconnessione con la matchbox si presenta sull'angolo in alto a sinistra del pannello frontale e prevede una connessione solida in quanto è presente una ghiera sulla quale dev'essere avvitato il connettore del cavo collegamento con la rete di interfaccia.

La foto seguente illustra, evidenziando in maniera chiara, quanto appena descritto.

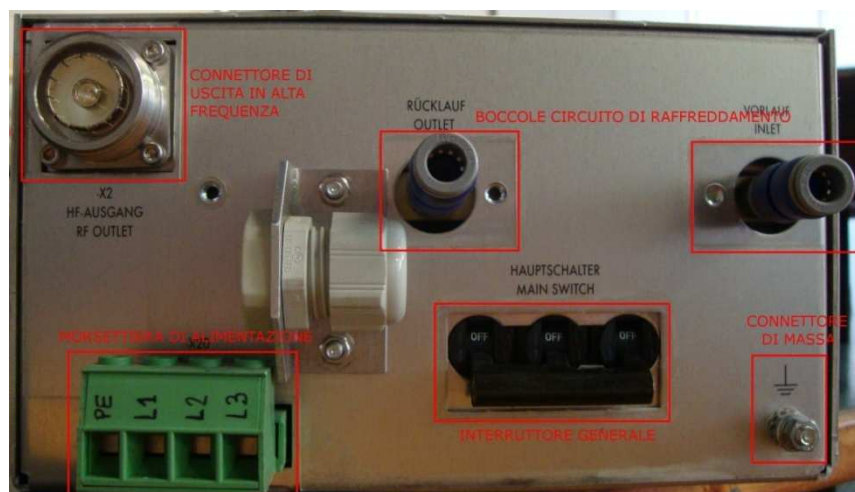


Fig. 12.2 Pannello frontale generatore ad alta frequenza

Come si può vedere chiaramente il generatore non presenta la possibilità di essere pilotato ed impostato vista l'assenza di un'interfaccia di comando ma bisogna per forza di cosa accedervi mediante una connessione stabilita a mezzo di un personal computer.

DESCRIZIONE DEL PANNELLO POSTERIORE

Il pannello posteriore è essenzialmente riservato alla comunicazione dati e segnali tra il generatore, la matchbox ed il computer per mezzo del quale il generatore stesso viene pilotato e gestito.

Sulla parte sinistra del pannello posteriore si individuano chiaramente quelle che sono le porte analogico/digitali di comunicazione con l'elaboratore dedicato, queste seguono i protocolli: RS 232, RS485, PROFIBUS, CANBUS, DEVICENET.

Ciascuno di questi protocolli fanno ricorso a porte di comunicazione diverse ma non essendo oggetto di questa tesi l'analisi dei protocolli di comunicazione tra elaboratore e generatore, questo aspetto non verrà approfondito ulteriormente.

Adiacente all'area occupata dalle porte di comunicazione con il computer sono presenti due connettori per cavo in fibra ottica; questi due cavi sono previsti per la comunicazione tra il generatore e la matchbox in modo tale da poter impostare e visualizzare parametri e grandezze della matchbox accedendo direttamente dal generatore.

La connessione in fibra ottica è necessaria visti gli elevati campi elettromagnetici presenti e gli eventuali disturbi che possono nascere nella comunicazione tra generatore e matchbox e per consentire inoltre una comunicazione dei dati molto rapida.

Nella parte superiore del pannello sono presenti due connettori per la possibile connessione, in ingresso ed in uscita, di un segnale di riferimento altrimenti detto di Clock, per la sincronizzazione con eventuali altri generatori connessi allo stesso sistema.

Il connettore di ingresso (IN) permette l'ingresso del segnale di riferimento, a 13,56 [MHz], proveniente da un oscillatore pilota ed in questo caso il generatore lavorerà come subordinato ovvero Slave.

Il connettore di uscita invece (OUT) permette di fornire il segnale di clock ad eventuali altri generatori che funzionano asservendo a questo primo, detto in questo caso principale o Master.

I sei led presenti sul pannello consentono di verificare lo stato della comunicazione dati (led Network e Module), lo stato di non funzionamento (led RES), lo stato di uscita attiva (led RF ON), la presenza di messaggi di guasti (ERROR) ed infine la presenza di tensione di rete (led MAINS).

Al di là della funzione specifica che questi led assumono, risultano di fatto essere un valido sistema di verifica, almeno in prima istanza, dello stato del generatore, utile per escludere grossi dubbi come può essere ad esempio la presenza della tensione di rete o l'alimentazione del circuito di uscita e pertanto della matchbox e del carico.

Nella parte destra del pannello sono presenti degli interruttori rotanti agendo sui quali è possibile agire solamente con l'ausilio di un cacciavite, questi interruttori rotanti consentono di settare vari parametri per la comunicazione con protocollo DeviceNet tra il generatore ed il computer.

Anche in questo caso la figura che segue illustra, evidenziando in maniera chiara, i vari particolari appena descritti.

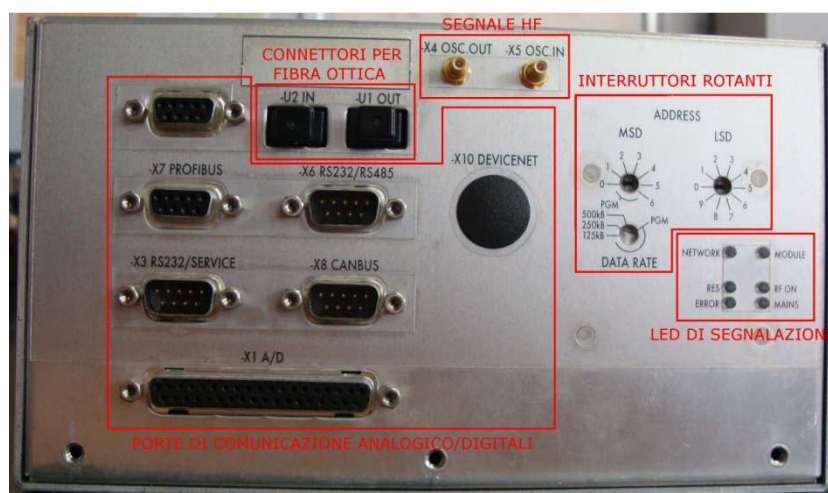


Fig. 12.3 Pannello posteriore generatore ad alta frequenza

Come si può vedere non vi sono dispositivi sui quali è possibile agire in maniera agevole e senza l'ausilio di utensili, ciò deve ricordare il fatto che prima di intervenire ruotando gli interruttori rotanti o attaccando e staccando cavi dalle porte di comunicazione si debba porre particolare attenzione seguendo le indicazioni riportate nel manuale di istruzioni.

12.1.2 CAVO COASSIALE DI INTERCONNESSIONE RG 214

Al fine di poter interconnettere il generatore e la matchbox è d'obbligo l'utilizzo di un cavo coassiale al fine di poter trasmettere il segnale ad elevata frequenza, gli ormai noti 13,56 [MHz], senza avere eccessive attenuazioni dello stesso tra partenza, coincidente con il generatore, e l'arrivo, ovvero la matchbox.

Il cavo, fornito unitamente al generatore ed alla rete di adattamento, è un classico cavo di tipo coassiale che si riconosce però per il diametro maggiore rispetto a quelli normalmente impiegati in campo di misure elettriche, ad esempio con gli oscilloscopi, in campo televisivo.

Un'altra particolarità consiste nei connettori di collegamento con il generatore e la matchbox, questi sono forniti infatti di una ghiera apposita in modo da poter essere saldamente avvitati ai supporti presenti sulle macchine precedentemente menzionate al fine di evitare accidentali disconnessioni degli stessi.

Il cavo in questione presenta buone caratteristiche dal punto di vista tecnico poiché, stando ai dati tecnici forniti [31] questo cavo presenta la possibilità di trasmissione di segnali fino a 6 [GHz], ben al di sopra quindi della frequenza di lavoro.

Unitamente al cavo pure il connettore stesso, del tipo 7/16, presenta ottime qualità visto che permette la trasmissione di segnali fino a 7 [GHz] e quindi risulta limitante la frequenza massima del cavo anziché del connettore.



Fig. 12.4 Cavo coassiale di potenza per l'interconnessione generatore-matchbox

12.1.3 DOPPIO CAVO IN FIBRA OTTICA

Al fine di garantire una comunicazione costante e sicura tra generatore e matchbox è d'obbligo l'impiego di un protocollo di comunicazione tra i due dispositivi che non risenta di eventuali interferenze che possono insorgere dalla presenza di elevati campi elettromagnetici e pure ad alta frequenza.

La connessione in fibra ottica, nel caso specifico, permette di interconnettere il generatore ad alta frequenza con la matchbox in modo tale che questo funzioni da pilota nei confronti di quest'ultima e riesca allo stesso tempo a ricevere dati da questa circa i valori assunti, istante per istante, dai condensatori di capacità variabile, la tensione al carico e così via.

La trasmissione ottica presenta due grossi vantaggi, il primo è un'elevata velocità di trasferimento dei segnali e quindi la possibilità di trasmettere maggiori quantità di dati rispetto ad altri standard di trasmissione a parità di tempo, l'altro grosso vantaggio è quello di essere immune da eventuali campi elettromagnetici che si vengono a sviluppare nell'area interessata dal transito degli stessi cavi.

Infatti il segnale che veicola la fibra ottica è un segnale luminoso, consente quindi peraltro una separazione galvanica tra i dispositivi da essa interconnessi visto che non è necessario impiegare materiali conduttori elettricamente ma solamente otticamente.

Per la connessione ottica dei due dispositivi si devono quindi impiegare i due cavetti forniti con la matchbox, bisogna altresì dire che in un sistema di trasmissione dati in fibra ottica tutti i dispositivi impiegati devono essere specificatamente per la medesima lunghezza.

La lunghezza standard dei cavi in fibra ottica varia tra 0,5 e 15 [m] anche se esistono pure altri range che possono essere tra 15 e 30 [m] o ancora tra 30 e 50 [m], comunque la lunghezza dei cavi è specificatamente indicata alla base dei connettori terminali e deve quindi essere verificata al momento della connessione pena il non funzionamento dello stesso sistema.

Inoltre i cavi in fibra ottica essendo meccanicamente molto delicati devono essere protetti contro danneggiamenti accidentali che possono portare all'interruzione degli stessi, per questo motivo essi vengono forniti già infilati in un tubo flessibile in materiale plastico corrugato simile alle tubazioni impiegate nei normali impianti elettrici al fine di garantire loro maggiore protezione.

La foto seguente mostra i cavi in fibra ottica impiegati ed i connettori che li terminano.



Fig. 12.5 Cavi in fibra ottica per l'interconnessione tra generatore e matchbox

Teoricamente con tale sistema di trasmissione dati sarebbe possibile anche interconnettere più matchbox, fino ad un massimo di dieci unità, con un sistema entra ed esci per controllarle poi da un unico dispositivo di supervisione sebbene nel nostro caso ciò non venga realizzato di fatto.

Per ognuna poi delle matchbox interconnesse se ne possono visualizzare in remoto tutti i parametri caratteristici e se ne possono immettere tutte le impostazioni volute.

12.1.4 ADATTATORE DI CARICO

PFM 3000 A

Affinché si possa impiegare il generatore ad alta frequenza su di un carico che presenta un'impedenza che può non rimanere costante nel tempo, potendo di fatto variare per molteplici cause, si deve impiegare un dispositivo apposito atto a far sì che il generatore veda alla sua uscita un carico con impedenza costante, nel caso specifico pari a 50 [Ω].

Per fare ciò questo dispositivo dev'essere prima di tutto in grado di fornire al generatore potenza reattiva di entrambi i tipi, induttiva o capacitiva, al fine di poter far fronte a variazioni di qualsivoglia segno e poi dev'essere posizionata il più vicino possibile al carico in modo tale che la compensazione della potenza reattiva avvenga entro una distanza molto piccola per evitare spiacevoli inconvenienti quali cadute di tensione eccessive e surriscaldamento dei conduttori.

Questo dispositivo realizza niente di meno che una rete di adattamento quindi tra il generatore ed il carico da alimentare e proprio in ragione di ciò questa rete di accoppiamento viene interposta tra i due attori principali del processo in esecuzione ovvero il generatore ed il condensatore di lavoro.

Analogamente al generatore descritto poco fa anche la rete di adattamento che chiameremo pure Matchbox, com'è già avvenuto peraltro in precedenza, non presenta grosse possibilità di interazione diretta con essa, essendo destinata ad essere installata presso il carico e quindi lontano da eventuali operatori.

Nella figura seguente si può vedere la rete di accoppiamento o matchbox con un'apertura evidente, attraverso di essa è possibile regolare l'induttanza della stessa così che i condensatori autoregolanti possano funzionare ottimamente per diversi campi di impiego.

Se infatti, dopo un'interrogazione a mezzo computer e generatore, si riscontrasse che i condensatori presentano una capacità di lavoro prossima al valore minimo o massimo del campo di lavoro, è opportuno agire sull'induttanza di accordo al fine di permettere alla matchbox di seguire il carico in qualsiasi sua variazione.



Fig. 12.6 Rete di adattamento o Matchbox

La rete di adattamento a differenza del generatore presenta solamente un pannello atto ad alimentare ed a comunicare con l'operatore o meglio con il generatore.

Nel pannello quindi si possono evidenziare i seguenti dispositivi, segnalati chiaramente:

- Connettore di alimentazione da rete per il micro controllore dell'adattamento di rete
- Connettore di massa
- Fusibile di protezione
- Ingresso ed uscita del circuito acqua di raffreddamento
- Connettori per cavo in fibra ottica
- Porta di comunicazione con il generatore
- Connettore coassiale di ingresso ad alta frequenza

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche, dal manuale di istruzioni dedicato si possono ricavare le seguenti specifiche tecniche [32]:

CIRCUITO AD ALTA FREQUENZA

Potenza nominale in funzionamento continuo	[kW]	2,5
Frequenza di lavoro	[MHz]	13,56
Corrente di carico massima	[A]	30
Tensione di carico massima	[kV]	3
Impedenza d'ingresso	[Ω]	50

CIRCUITO DI CONTROLLO

Tensione di alimentazione	[V]	230 + 10 % - 15 %
Frequenza di alimentazione	[Hz]	50/60
Potenza assorbita	[VA]	30
Fusibile di protezione	[A]	0,2

Tabella 12.2 Specifiche tecniche matchbox PFM 3000 A

DESCRIZIONE DEL PANNELLO

Come già accennato nella matchbox vi è solamente un pannello che può essere definito attivo in quanto quello all'altro capo della stessa risulta cieco.

In questo pannello deve quindi avvenire la connessione di tutti i circuiti che interessano la matchbox ovvero il circuito di alimentazione, di trasmissione dati e di raffreddamento essendo anch'essa raffreddata ad acqua per via della notevole quantità di calore che in essa si sviluppa e che dev'essere asportata per evitare riscaldamenti eccessivi.

In alto, in posizione centrale, è posto un connettore per l'alimentazione del micro controllore e della logica elettronica che verifica lo stato della rete e decide le operazioni da effettuare sui condensatori in vuoto al fine di mantenere un'impedenza stabile di 50 [Ω].

Subito a sinistra del connettore di alimentazione è posto un morsetto (a bullone e dado) per la connessione della carcassa della matchbox e dell'eventuale involucro o gabbia di Faraday di protezione all'impianto di terra per fini di sicurezza dell'operatore.

In prossimità di questo, subito sotto per la precisione, è alloggiato un fusibile di protezione del circuito logico della matchbox, la portata è limitata (0,2 [A]) essendo questo circuito poco energivoro mentre non è previsto alcun dispositivo di protezione del circuito di potenza ad alta frequenza, funzione eseguita dal generatore stesso mediante controllo costante dei parametri del circuito.

Nella parte sinistra del pannello si trovano due boccole per il collegamento del circuito di raffreddamento, in questo caso si evidenzia una posizione più idonea rispetto al generatore in quanto si trovano lontano dal connettore di alimentazione, comunque protetto, e sulla verticale di queste non si presentano possibili interferenze con circuiti elettrici.

In posizione centrale, lievemente spostati a destra, si trovano due connettori per cavo in fibra ottica atti a far comunicare il generatore e la matchbox che si trova in una zona sottoposta ad elevati campi elettromagnetici e quindi per far fronte ad eventuali disturbi derivanti da tali campi bisogna adottare un protocollo di connessione in fibra ottica che ne risulta immune.

Appena sotto i due connettori per il cavo in fibra ottica si trova una porta di tipo seriale per la comunicazione tra matchbox e generatore ad alta frequenza, bisogna notare come la rete di accoppiamento monti una porta a 25 pin mentre l'analogica porta sul generatore, designata in entrambi i dispositivi con la sigla X3, sia una porta a 9 pin.

Infine in posizione centrale assoluta si trova il connettore coassiale per l'ingresso del segnale ad alta frequenza e verosimilmente ad alta tensione visto che il generatore è in grado di fornire una tensione di uscita fino a 2 [kV].

La figura seguente evidenzia quanto appena descritto, come per il generatore anche per la matchbox si riscontra un pannello molto spartano, essendo peraltro quest'ultima destinata ad essere installata presso il condensatore di lavoro e quindi non presenta la necessità di dover fornire alcuna informazione all'operatore che la utilizza.



Fig. 12.7 Pannello matchbox PFM 3000 A

Come prescritto nel manuale operativo la matchbox dev'essere installata il più vicino possibile al condensatore applicatore di campo, a tal fine per impieghi particolari è previsto che un'eventuale camera schermata entro la quale avviene il processo desiderato sia solidamente connessa alla matchbox.

Nel caso specifico ciò che si vuole realizzare è riuscire ad applicare la tensione in uscita dal generatore e passante attraverso la matchbox alle due facce del condensatore di lavoro che andremo a definire in seguito.

In ogni caso pensando allo sviluppo futuro del processo bisognerà tenere conto che alla fine delle verifiche preliminari si dovrà procedere al riscaldamento di un intero modulo fotovoltaico di dimensioni per lo meno standard e cioè di circa (1 x 2) [m].

La camera schermata quindi, per il nostro processo, sarà costituita da una gabbia di Faraday con maglie non troppo larghe in modo tale che questa riesca a schermare la zona circostante dai campi elettromagnetici generati a frequenza di 13,56 [MHz].

12.2 DISEGNO PRELIMINARE DEL CONDENSATORE DI LAVORO

Per poter applicare il campo elettrico ad alta frequenza all'oggetto che si voglia riscaldare per perdite dielettriche è opportuno progettare in maniera adeguata l'applicatore di campo anche detto condensatore di lavoro, facendo riferimento alla più semplice configurazione immaginabile per un tale processo ovvero un condensatore a facce piane parallele.

Ovviamente dal punto di vista industriale l'applicatore di campo dovrà essere sviluppato e migliorato ma per una verifica preliminare del processo di riscaldamento per perdite dielettriche è stata considerata proprio tale semplice geometria.

La forma degli elettrodi, al fine di evitare la formazione di punte nelle quali il campo elettrico si può addensare in modo pericoloso, è stata disegnata circolare, in questo modo appunto si evita o quantomeno si limita il rischio di scariche parziali in aria a seguito del superamento della rigidità dielettrica della stessa.

L'immagine seguente mostra gli elettrodi di forma circolare con i relativi terminali ai quali viene applicato il campo elettrico mediante adeguata interconnessione con la matchbox che si trova proprio a ridosso di questo.

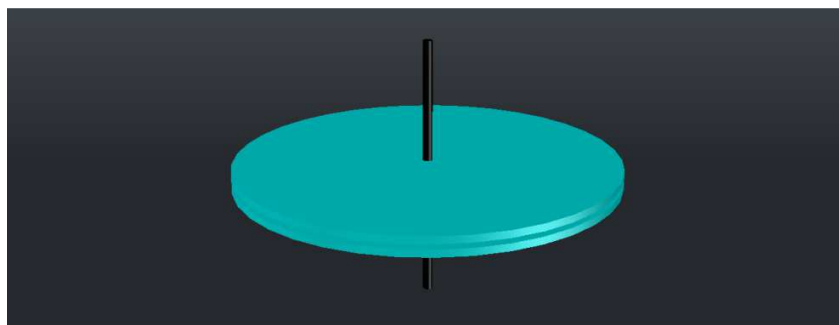


Fig. 12.8 Configurazione di base del condensatore di lavoro

In realtà poi, in sede operativa, si è deciso di optare per un solo elettrodo di forma circolare, quello superiore, mentre l'altro che si trova al potenziale di massa è risultato costituito da una piastra di rame dalle dimensioni superiori al singolo foglio o porzione di modulo impiegato nel processo.

Per quanto riguarda la sicurezza degli operatori e la diffusione del campo elettrico generato dal condensatore di lavoro si è impiegata una gabbia di Faraday atta a schermare il campo e mantenerlo entro di essa.

Nella fattispecie si è fatto ricorso ad una gabbia già presente in laboratorio, essa risulta essere a forma di parallelepipedo, realizzata in lamiera d'acciaio forata con fori del diametro di circa 5 [mm], presenta ovviamente un'apertura per l'applicazione della matchbox la quale va ad imporre pure il potenziale di terra all'intera struttura mediante un saldo collegamento elettrico.

I fori praticati nella gabbia di Faraday risultano essere di dimensione accettabile visto che risultano essere circa tre ordini di grandezza inferiori rispetto alla lunghezza d'onda nel vuoto del campo elettrico alla frequenza di lavoro.

In prima approssimazione si può quindi dire che la gabbia consente una buona schermatura del campo elettromagnetico emesso dal condensatore di lavoro, il quale si può richiudere o attraverso le due armature del condensatore o al più attraverso un'armatura e la gabbia di Faraday.

Anche in questo caso è utile far riferimento all'immagine seguente per comprendere meglio ciò di cui si sta parlando, la gabbia di Faraday andrà connessa a terra ma essendo pure il generatore e la stessa matchbox connessi a terra si avrà un ritorno delle correnti verso il generatore stesso per le note leggi di Kirchhoff.

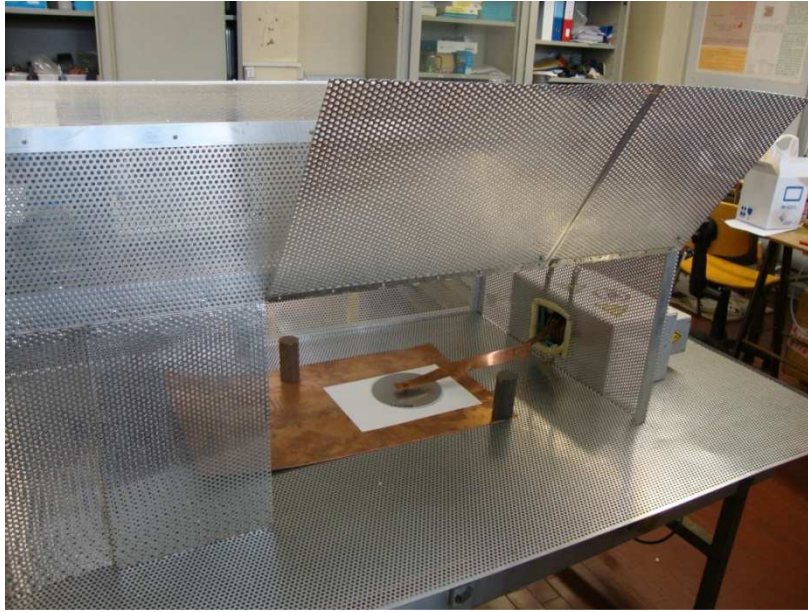


Fig. 12.9 Gabbia di Faraday impiegata nelle prove sperimentali

Le prove sperimentali, effettuate ed ancora da effettuare, si prefiggono di verificare l'effettivo riscaldamento del mezzo interposto tra gli elettrodi del condensatore di lavoro in diverse modalità operative quali:

- Riscaldamento di un solo foglio di backsheet;
- Riscaldamento di un solo foglio di incapsulante, "EVA";
- Riscaldamento di una porzione di modulo coincidente con le dimensioni di una cella fotovoltaica;
- Riscaldamento di una porzione di modulo coincidente con le dimensioni di quattro celle;
- Riscaldamento di un intero modulo fotovoltaico.

Per quanto riguarda le prime tre prove sperimentali si è deciso di optare per un'unica dimensione del condensatore di lavoro e pertanto si sono disegnati due elettrodi circolari del diametro approssimativo di una cella fotovoltaica ovvero di circa 16 [cm].

Per quanto riguarda lo spessore di questi due elettrodi si è optato per una dimensione che permettesse una buona resistenza meccanica tenendo conto del fatto che questi dovranno essere impiegati unitamente all'applicazione di una certa pressione in modo tale da evitare che rimanga aria tra gli elettrodi e l'oggetto in riscaldamento.

Considerato quindi che il modulo, una volta eliminata la cornice di alluminio presenta uno spessore vicino al centimetro ed ipotizzato che comunque la pressione venga applicata in maniera abbastanza uniforme, si è optato per uno spessore di qualche millimetro, nella fattispecie di 2 [mm].

Per quanto riguarda la forma degli elettrodi si è scelta la semplice forma circolare in modo tale da evitare addensamenti del campo elettrico nelle punte che possono portare, vista l'elevata tensione alla quale vengono sottoposti, a fenomeni di scarica parziale in aria o peggio ancora attraverso il mezzo in riscaldamento.

Il materiale con il quale vengono realizzati gli elettrodi del condensatore di lavoro deve presentare la caratteristica peculiare di non evidenziare perdite, o almeno avere un valore molto basso, alla frequenza di lavoro di 13,56 [MHz].

I materiali conduttori in genere presentano tutti o quasi valori trascurabili di perdite per tale meccanismo vista l'elevata mobilità elettronica e volendo unire a tale caratteristica pure basse perdite per effetto Joule e costi non proibitivi, la scelta è caduta spontaneamente sull'alluminio, che presenta inoltre un'elevata facilità di lavorazione meccanica.

13 PROVE SPERIMENTALI IN DIVERSE CONFIGURAZIONI OPERATIVE

Le prove sperimentali, come precedentemente esposto, sono state eseguite in modo differenziato in modo tale da poter riscontrare l'effettivo riscaldamento per perdite dielettriche e per appurare la fattibilità del processo su di un modulo fotovoltaico nel suo insieme.

Le prove eseguite ed in progetto per il prossimo futuro vengono descritte singolarmente analizzando gli elementi fondamentali di ciascuna di esse mentre non vengono ovviamente riportate osservazioni specifiche sulle prove sperimentali ancora da eseguire vista l'impossibilità di poter fare ciò.

Come già indicato le prime tre verifiche sperimentali si avvalgono di un'unica tipologia di elettrodi ovvero considerata la forma circolare di questi, le dimensioni (diametro e spessore) sono rimaste sempre le stesse per questioni di semplicità.

In particolare al momento della verifica del riscaldamento dei singoli materiali termoplastici impiegati, backsheet multistrato ed EVA, si è ottenuta una configurazione abbastanza singolare con gli elettrodi affacciati l'uno all'altro, il foglio in materiale termoplastico interposto tra di essi ed i bordi di questo foglio che si protraggono ben oltre le dimensioni dell'elettrodo superiore.

L'elettrodo inferiore infatti, come detto poco sopra, è stato realizzato al momento delle verifiche sperimentali con una semplice piastra di rame dalle dimensioni di circa (50 x 70) [cm] e quindi ben più grande del singolo foglio o della sezione di modulo pari ad una cella, in modo da poter ottenere un piano equipotenziale, di fatto al potenziale di massa.

L'immagine seguente illustra la differenza tra le dimensioni dell'elettrodo superiore e le dimensioni del foglio oggetto del riscaldamento.

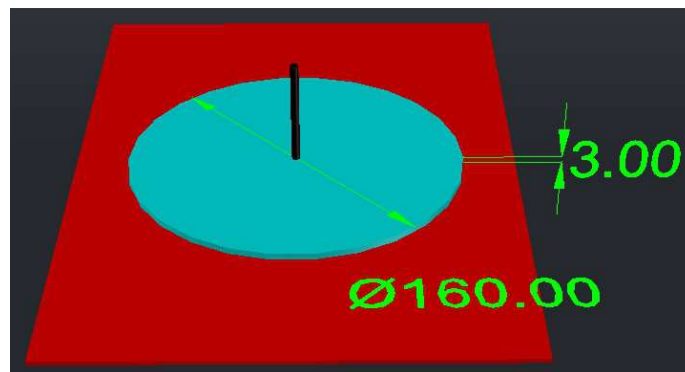


Fig. 13.1 Configurazione di riscaldamento di un solo foglio di backsheet

Per quanto riguarda invece il riscaldamento di una porzione di modulo fotovoltaico, la situazione risulta essere leggermente differente in quanto la parte di modulo che si sporge oltre le dimensioni dell'elettrodo circolare si riduce drasticamente, al limite annullandosi nel caso in cui la sezione abbia una dimensione di 16 [cm] ovvero non sia centrata con questo.

Si deve al limite tenere presente il rischio che ci si venga a trovare con gli elettrodi separati unicamente da aria, almeno in alcune porzioni di superficie nelle quali viene a mancare la porzione di modulo.

Il rischio, come già descritto in precedenza, consiste nel fatto che se il campo elettrico dovuto al condensatore di lavoro viene a superare la rigidità dielettrica, si possono verificare scariche elettriche in aria che portano al cortocircuito degli elettrodi oltre all'eventuale danneggiamento di questi e del mezzo in riscaldamento.

Un altro rischio da non sottovalutare è quello legato al fatto che il mezzo inserito tra gli elettrodi può contenere impurità o umidità che possono costituire delle vie preferenziali per il campo elettrico e quindi realizzare dei percorsi agevolati per eventuali scariche guidate sulla superficie del mezzo interposto.

La figura che segue mostra come a differenza della precedente configurazione in questo caso le dimensioni del mezzo in riscaldamento vengono praticamente a coincidere con quelle degli elettrodi riducendo i margini di sicurezza circa il pericolo di scariche in aria.

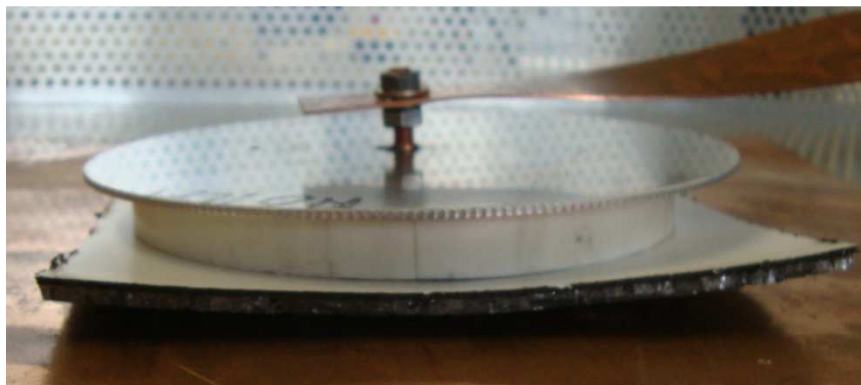


Fig. 13.2 Configurazione con elettrodo e sezione di modulo pari ad una cella fotovoltaica

Per tutelare quindi il generatore, gli elettrodi, il mezzo in riscaldamento e quindi in generale il processo in fase di test è necessario adottare degli accorgimenti specifici oltre a valutazioni preventive di tipo teorico.

In prima battuta bisogna considerare il campo elettrico che viene a manifestarsi eventualmente tra le due armature senza null'altro tra di esse se non l'aria dell'ambiente, e quindi prendere i provvedimenti necessari affinché il campo non superi mai la rigidità dielettrica di questa.

Primo provvedimento da prendere è quello di alimentare le armature del condensatore con una tensione che non porti il campo elettrico ad avvicinarsi al valore della rigidità dielettrica dell'aria; un secondo provvedimento da prendere è quello di limitare, per quanto sia possibile, la formazione di punte che comportano un addensamento del campo elettrico.

Il modulo fotovoltaico e le porzioni da esso derivate presentano uno spessore dell'ordine del centimetro, in ragione di ciò, tenendo conto del massimo campo elettrico ipotizzato in prima battuta inferiore o uguale a 3 [kV/cm] , ciò permette di impiegare il generatore e la relativa matchbox in tutto il range di funzionamento.

Il generatore e la matchbox infatti presentano una tensione massima di lavoro pari a 3 [kV] e quindi se questa tensione viene applicata a due armature distanti 1 [cm] , andranno a creare un campo elettrico pari proprio al limite stabilito di 3 [kV/cm] .

Una cosa da tener presente però è che non vi siano interstizi d'aria tra armatura e mezzo in riscaldamento poiché il campo elettrico, addensandosi in ragione inversamente proporzionale alla permittività dielettrica relativa, andrà a concentrarsi proprio negli strati d'aria che presentano inoltre rigidità dielettrica inferiore portando ad eventuali fenomeni di scarica tra le armature ed il mezzo interposto.

13.1.1 RISCALDAMENTO DI UN SOLO FOGLIO DI BACKSHEET

Avendo recepito svariati campioni del materiale impiegato come backsheet nei moduli fotovoltaici presso un rivenditore locale e direttamente presso un produttore, si è scelto di partire dalla verifica del possibile riscaldamento di questo componente per addentrarsi solamente in un secondo momento nel riscaldamento di altri materiali e quindi dell'intero modulo o porzione di esso.

I campioni di backsheet a disposizione differiscono a dire il vero per il diverso produttore, l'uno del circondario mentre l'altro non è noto e per diversi colori, bianco (impiegato nella maggioranza dei casi), nero e trasparente.

I campioni in possesso inoltre sono caratterizzati da dimensioni pressoché pari ad un foglio in formato A4 ovvero $210 \times 297 \text{ [mm]}$; alla luce delle dimensioni di una cella fotovoltaica standard, di diametro circa pari a 160 [mm] , si è deciso di impiegare direttamente questi campioni senza procedere a ridimensionamenti.

Inoltre le maggiori dimensioni del materiale inserito nel condensatore di lavoro nei confronti dell'elettrodo circolare consentono di evitare eventuali fenomeni di scarica tra gli elettrodi presentando di fatto una rigidità dielettrica ben superiore a quella dell'aria.

Se infatti le dimensioni del foglio di backsheet fossero le medesime delle armature del condensatore di lavoro, bisognerebbe tenere conto della rigidità dielettrica dell'aria come limite massimo per il campo elettrico applicabile poiché proprio attraverso l'aria si potrebbero avere delle scariche tra le armature. Impiegando invece fogli di backsheet dalle dimensioni maggiori delle armature dell'applicatore di campo si può far riferimento ad un valore massimo di campo elettrico applicabile pari alla rigidità dielettrica del materiale stesso unitamente ad un certo fattore di sicurezza per scongiurare eventuali scariche lungo la superficie del foglio stesso incentivate dall'eventuale presenza di umidità o sporcizia.

Di fatto, come è già stato precisato, si è cercato di tenere un valore massimo di campo elettrico non superiore ad un decimo della rigidità dielettrica dell'aria ovvero sempre inferiore a 3 [kV/cm] per tenersi comunque lontani da qualsiasi circostanza non considerata.

La tensione con la quale si è provveduto ad alimentare gli elettrodi applicatori di campo è stata decisa sulla base delle simulazioni effettuate all'elaboratore sfruttando il software Flux 10.4 e sulla base di queste si è deciso per una tensione di 750 [V].

In realtà la tensione applicata al condensatore di lavoro non ha mai superato i 600 [V] vista l'impossibilità di accordare in maniera adeguata la matchbox con il carico di tipo capacitivo e di fatto l'assenza di questa condizione ottimale di funzionamento fa sì che il generatore limiti tutti i suoi parametri in funzione di non creare danni a se stesso.

Come per la tensione anche i tempi impiegati per il riscaldamento sono stati dedotti dalle simulazioni predette, nella fattispecie l'applicazione di tale tensione per un tempo pari a 4 minuti, secondo le simulazioni, avrebbe dovuto portare il foglio di backsheet a raggiungere una temperatura media finale pari a 130 [°C].

La seguente tabella raccoglie e riassume le condizioni di test e ne riporta un semplice confronto con la temperatura media stimata mediante le simulazioni all'elaboratore.

VERIFICA RISCALDAMENTO FOGLIO DI BACKSHEET		
GRANDEZZA	U.M.	VALORE
Tensione di alimentazione del condensatore	[V]	750
Tempo di processo	[min]	4
Temperatura media finale stimata	[°C]	130
Temperatura media finale effettiva	[°C]	T Ambiente

Tab. 13.1 Condizioni di test e temperatura media finale del foglio di backsheet

Sperimentalmente non si è potuto verificare un riscaldamento apprezzabile del foglio stesso per vari motivi, questi verranno trattati complessivamente nelle conclusioni finali.

La presenza di molteplici circostanze non ha infatti permesso di giungere ad un'ottimale configurazione di lavoro stabilendo un buon accordo tra la matchbox ed il carico, questo insieme ad altri aspetti hanno limitato la potenza convertita in calore nel foglio stesso non permettendone il relativo riscaldamento.

13.1.2 RISCALDAMENTO DI UN SOLO FOGLIO DI INCAPSULANTE, "EVA"

Una volta verificato considerato il processo di possibile riscaldamento di un foglio di backsheet, materiale del quale se ne dispone in notevole quantità, è cosa saggia provvedere alla verifica del

riscaldamento del materiale incapsulante ovvero "EVA" (Etilen Vinil Acetato) al fine di confrontare differenti comportamenti rispetto al backsheet.

Al momento tale verifica sperimentale non è ancora stata effettuata ma non ci si aspetta di ottenere risultati estremamente diversi dal caso del singolo foglio di backsheet viste le criticità già evidenziate come l'accordatura della matchbox con il carico.

Bisogna dire anzitutto che questo materiale differisce abbastanza, dal punto di vista fisico, dal precedente in quanto risulta essere al tatto molto più duttile, quasi gommoso, e forse per tale sensazione si può essere portati a pensare che questo si riscaldi più rapidamente.

La teoria dice che la potenza trasferita dall'applicatore di campo si addenserà in funzione della permittività dielettrica relativa e si avrà maggior riscaldamento nei materiali che presentano fattore di perdita più elevato alla frequenza di lavoro in atto.

In ragione di ciò risulta comunque difficile stabilire se sia il materiale di backsheet o quello incapsulante a riscaldarsi di più e/o prima e pure nelle simulazioni al computer sono stati utilizzati dei valori, per tali parametri, abbastanza grossolani non essendoci una ricca letteratura in materia.

Comunque sia le simulazioni eseguite dimostrano che la zona che si viene a riscaldare di più, presumibilmente più per ragioni costruttive del modulo che fisiche dei vari materiali costituenti, è l'interfaccia tra il vetro superiore e lo strato di EVA presente subito sotto di esso.

Il vetro di protezione superiore infatti presenta una capacità termica notevole, rispetto agli altri materiali impiegati quindi il calore che viene sviluppato o trasmesso al vetro vi si può accumulare in maniera consistente e portarsi e quindi mantenersi a temperature elevate per periodi relativamente lunghi.

Come già detto nelle simulazioni si sono utilizzati valori approssimativi per le caratteristiche dei materiali citati, non essendovi grosse quantità di dati a disposizione, e nello specifico si può dire che è stato impiegato il medesimo valore per il fattore di perdita, pari a 0,15, mentre ciò che è abbastanza diverso tra questi due è la permittività dielettrica relativa.

Per il backsheet è stato impiegato il valore mediato di 8,5 mentre per l'EVA è stato impiegato un valore pari a 4,5; ciò significa che nel momento in cui questi due materiali vengano immessi insieme nel condensatore di lavoro, il campo tenderà ad addensarsi nel backsheet, che presenta appunto un valore più elevato.

In ragione di ciò si avrà un riscaldamento più elevato sempre nel foglio di backsheet visto che a parità di valore di fattore di perdita questo materiale viene sottoposto ad una densità di potenza superiore rispetto all'EVA.

Nel momento in cui però questi materiali venissero sottoposti al campo elettrico singolarmente si può certamente dire che a parità di fattore di perdita il backsheet subisce una densità di potenza maggiore rispetto all'EVA ma per quanto riguarda la temperatura raggiunta alla fine del trattamento bisognerà considerare altri aspetti fisici e non strettamente elettrici.

La capacità termica globale e la diffusività termica di ciascuno di essi, a parità di tutte le altre condizioni ipotizzabili come la temperatura degli elettrodi, la temperatura ambiente e svariate altre, determinano la temperatura di questi alla fine del trattamento termico applicato.

Anche in questo caso si procederà alla verifica del possibile riscaldamento con campioni di materiale dalle dimensioni paragonabili a quelle di un foglio A4 (210 x 297 [mm]) per gli stessi motivi precedentemente indicati.

Le condizioni di prova in questo caso saranno da definire a seguito di simulazioni ad hoc sul caso del singolo foglio di EVA, caso non ancora trattato nello specifico, e sarà importante valutare eventuali differenze operative rispetto al caso del foglio di backsheet.

Sarà però importante provvedere a verifiche sperimentali del possibile riscaldamento di fogli di EVA al fine di entrare più nello specifico della tecnologia già impiegata per laminare i moduli fotovoltaici e magari cercare di evidenziare se non eliminare alcuni punti deboli del processo.

13.1.3 RISCALDAMENTO DI UNA PORZIONE DI MODULO COINCIDENTE CON LE DIMENSIONI DI UNA CELLA FOTOVOLTAICA

La prima reale verifica sperimentale della fattibilità del processo di riscaldamento si realizza solamente una volta sottoposta almeno una porzione di modulo fotovoltaico al procedimento precedentemente impiegato ai singoli materiali termoplastici citati.

Prendendo un modulo fotovoltaico in silicio policristallino si è quindi provveduto a sezionarlo in porzioni dalle dimensioni circa pari ad una singola cella fotovoltaica, ovviamente facendo in modo che in ogni porzione vi fosse la propria cella.

Utilizzando i medesimi elettrodi impiegati nelle altre prove sperimentali si è in questo caso inserito all'interno del condensatore una singola porzione di modulo, questa volta ponendo maggiore attenzione ad eventuali possibilità di scariche in aria avendo la cella delle dimensioni minori dei fogli termoplastici impiegati in precedenza.

La foto che segue illustra la configurazione di lavoro, si può notare un aspetto critico dato dalla forma convessa assunta dalla porzione di modulo una volta che questo è stato sezionato.

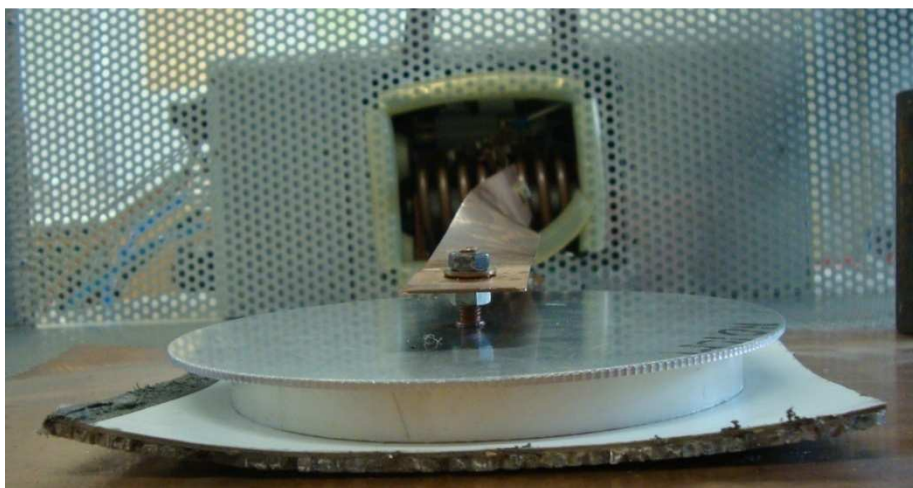


Fig. 13.3 Configurazione di lavoro con una porzione di modulo

Viste le condizioni fisiche della porzione di modulo a disposizione si è deciso di adottare un ulteriore mezzo cautelativo nei confronti di eventuali scariche tra gli elettrodi che potessero interessare il modulo.

Il modulo, a seguito del relativo sezionamento in porzioni dalle dimensioni di una cella fotovoltaica (circa 16 [cm]) è stato oggetto della frammentazione del vetro di copertura che peraltro è rimasto incollato alla cella a riprova delle ottime qualità del materiale incapsulante.

A seguito di tale inconveniente però si sono create delle fessurazioni tali da poter indurre percorsi preferenziali per eventuali canali di scarica a seguito dell'applicazione della tensione di lavoro ed in ragione di ciò si è deciso di interporre un materiale che ne facesse da garanzia.

Infatti considerando che il Teflon[®] risulta essere trasparente alla frequenza di lavoro di 13,56 [MHz], si è interposto un disco in relativo materiale dello spessore di circa un centimetro a tutela di eventuali scariche.

Tutta una serie di elementi che verranno pure ripresi nelle conclusioni hanno quindi fatto sì che nemmeno per la porzione di modulo fotovoltaico si riuscissero ad ottenere i risultati sperati ed attesi mediante le simulazioni al computer.

Di fatto il non perfetto adattamento tra matchbox e carico applicato risulta essere ancora una volta la causa principale del mancato riscaldamento del mezzo interposto visto che, come già detto, il generatore interviene a garanzia dei propri circuiti limitando la potenza erogabile.

13.1.4 RISCALDAMENTO DI UNA PORZIONE DI MODULO COINCIDENTE CON LE DIMENSIONI DI QUATTRO CELLE

Come per il caso precedente il riscaldamento di una porzione di modulo coincidente con le dimensioni di un quadrato contenente quattro celle fotovoltaiche (due per lato) deve tener conto dei medesimi accorgimenti adottati per la singola cella.

Anche questa verifica sperimentale potrà essere utile alla definizione di accorgimenti e tecniche che rendano il processo fattibile dal punto di vista tecnico e soprattutto industriale, non avendo senso che un tale processo non venga realizzato su ampia scala.

In questo caso ovviamente gli elettrodi applicatori di campo devono essere ridisegnati e ridimensionati essendo geometricamente non impiegabili per riscaldare un'area grande quantomeno quattro volte le precedenti.

La forma stessa degli elettrodi non potrà più essere mantenuta circolare in quanto per coprire un quadrato di 2 celle per lato occorrerebbe sempre un diametro maggiore del lato in ragione della radice quadrata di due ovvero poco meno di una volta e mezza.

Inoltre dal punto di vista applicativo ci si troverà comunque a dover fare i conti con moduli fotovoltaici di forma quantomeno rettangolare quindi conviene iniziare ad affrontare gli eventuali problemi tecnici che si incontreranno con un intero modulo.

La forma rettangolare della sezione e quindi degli elettrodi ci pone di fronte al problema della formazione di punte, se non altro con angolo di $90 [^\circ]$, derivante dagli angoli della sezione considerata e quindi tale problema dovrà in questo caso essere affrontato a dovere.

La formazione di eventuali punte, come già ampiamente trattato porta all'addensamento del campo elettrico in prossimità di tali configurazioni geometriche con l'eventuale possibilità di scariche totali o parziali in aria.

Se tale fenomeno si verifica integralmente esso può portare al cortocircuito, se non altro momentaneo, degli elettrodi con le relative conseguenze ovvero possibili danni alle apparecchiature connesse a monte quali il generatore ad alta frequenza e la rete di accoppiamento.

Se non si dovesse verificare integralmente ma solamente in modo parziale si avrebbero delle scariche in aria tra l'armatura ad alta tensione e l'aria per il superamento della rigidità dielettrica con le relative conseguenze ovvero effetto luminescente, radiodisturbi e rumore.

In entrambi i casi vi sarebbe una diminuzione dell'efficienza, nel primo caso ovviamente l'efficienza sarebbe nulla visto che il processo andrebbe immediatamente interrotto per salvaguardare le apparecchiature impiegate mentre nel secondo caso si avrebbero da mettere in conto le perdite correlate alle scariche parziali.

13.1.5 RISCALDAMENTO DI UN INTERO MODULO FOTOVOLTAICO

Punto finale di un lavoro completo sulla verifica sperimentale della possibilità di riscaldamento di moduli fotovoltaici da riciclare sta ovviamente nella verifica da effettuare su di un intero modulo in silicio cristallino dalle dimensioni pressoché standard ovvero di circa (1×2) [m].

Tale prova sperimentale potrà fare da cappello a tutto il lavoro svolto di ricerca, simulazione e verifiche varie su diversi campioni nella speranza che tale processo risulti pure economicamente valido.

14 CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi si prefiggeva lo scopo di analizzare un aspetto importante di una tecnologia emergente com'è il fotovoltaico, una prima analisi dello stato dell'arte in merito alle tipologie di moduli impiegati ha permesso di prendere confidenza con l'oggetto principe dello studio.

L'analisi dei materiali impiegati e delle dimensioni caratteristiche ha quindi concesso di addentrarsi in una materia molto specifica ma allo stesso tempo variegata cercando di prendere confidenza con le varie metodologie produttive oggi adottate.

La ricerca bibliografica sulla materia trattata ha fornito i mezzi e gli strumenti necessari per comprendere tutti i vari passaggi che consentono di ottenere un modulo fotovoltaico a partire dal silicio e da pochi altri materiali benché tecnologicamente all'avanguardia.

Analizzare i brevetti industriali esistenti in merito a metodi di produzione ma anche di riciclo dei moduli fotovoltaici ha stimolato un interesse verso quanto non vi è ancora di brevettato e benché la materia sia ampiamente trattata in tutto il mondo, alcuni spazi nei quali agire vi sono tuttora.

L'impiego di software applicativo di simulazioni elettro-termiche ha consentito di prendere dimestichezza con strumenti di calcolo oggi giorno indispensabili nel mondo professionale ed ancor di più in quello accademico.

Le prove sperimentali hanno quindi fatto da cappello al lavoro di ricerca e simulazione eseguito a monte, consentendo di prendere un po' di confidenza con strumentazione da laboratorio, andando ad utilizzare strumenti e tecnologie difficilmente reperibili nel mondo del lavoro.

Per entrare nel merito dei risultati ottenuti si possono fare le seguenti brevi osservazioni:

- La teoria, confermata in sede applicativa da brevetti industriali, afferma che di fatto il riscaldamento per perdite dielettriche dei materiali contenuti nei moduli fotovoltaici in silicio cristallino è possibile e viene pure già impiegata.
- Le simulazioni hanno indicato, seppur con qualche limite dettato dalla scarsa conoscenza dei materiali impiegati, l'ordine di grandezza della tensione applicata, della potenza sviluppata nel processo e delle temperature raggiunte nei vari materiali costituenti.
- Le prove sperimentali hanno permesso di realizzare in scala ridotta la possibile configurazione fisica da adottare per realizzare un sistema di riscaldamento per perdite dielettriche e quindi rendersi conto di problematiche reali.

Il lavoro di tesi ha permesso di riscontrare alcune criticità che al momento non hanno permesso di verificare sperimentalmente un riscaldamento dei mezzi interposti nel condensatore di lavoro, essi si possono essenzialmente riassumere in:

- Scarsa conoscenza delle caratteristiche elettriche dei materiali sede del riscaldamento;
- Mancata accordatura della matchbox con il carico applicato;
- Conduzione termica che provoca dispersione del calore sviluppato;
- Forma convessa assunta dalla cella dopo il sezionamento;
- Crepe sul vetro di copertura.

La scarsa conoscenza delle caratteristiche elettriche dei materiali impiegati non permette di ottenere simulazioni al computer che si possano ritenere abbastanza attendibili, come valori numerici sono stati impiegati infatti dati ricavati da data sheet, peraltro non riferiti alla frequenza di lavoro.

La mancata accordatura della matchbox con il carico applicato non consente di ottenere una configurazione ottimale per quanto riguarda l'impedenza vista dal generatore ad alta frequenza, in ragione di ciò la potenza applicata al carico viene automaticamente limitata dal generatore stesso.

La conduzione termica non nulla da parte degli elettrodi e del modulo stesso fa sì che il calore sviluppato nei materiali dielettrici si diffonda, di fatto limitando la temperatura massima raggiungibile dai materiali dielettrici stessi.

La forma convessa che assume la porzione di modulo fotovoltaico una volta sezionato fa sì che non vi sia un perfetto contatto tra gli elettrodi ed il pezzo da riscaldare, il ragione di ciò si ha pure una distribuzione del campo elettrico che non risulta essere uniforme, andando a sollecitare di più alcuni punti e meno altri.

Infine le crepe presenti sul vetro di copertura del modulo fotovoltaico comportano una serie di accorgimenti contro la possibilità di scariche tali da imporre una tensione massima applicabile inferiore a quella stimata, di fatto limitando la potenza convertita in calore ovvero allungando i tempi di processo.

In futuro si potrà agire sulle criticità appena elencate riuscendo a superare i limiti oggi imposti per ragioni di sicurezza, potendo eventualmente analizzare dal punto di vista tecnico-economico il processo descritto in questo lavoro di tesi.

Non si escludono ed anzi saranno da determinare le condizioni e le tecnologie più opportune per ottenere un processo efficiente, nel tentativo di perseguire l'obiettivo di riscaldare il modulo per il successivo riciclo limitando la produzione di gas tossico-nocivi.

15 BIBLIOGRAFIA

- [1] United Nations, "Kyoto Protocol," United Nations, Kyoto, United Nations Framework Convention on Climate Change 1997.
- [2] Accettabilità sociale. (2012, Febbraio) accettabilitacociale.com.
- [3] MR Solutions. (2012, Febbraio) <http://www.marcorossato.com>.
- [4] Pianeta Energia. (2012, Febbraio) pianetaenergia.com.
- [5] Climatrix blog. (2012, Febbraio) climatrix.org.
- [6] Eniscuola. (2012, Febbraio) eniscuola.net.
- [7] GSE Gestore dei Servizi Energetici, "Rapporto statistico 2010 Impianti a fonti rinnovabili," GSE, 2010.
- [8] Eurostat. (2012, Febbraio) epp.eurostat.ec.europa.eu.
- [9] Silvia Morelli / GSE, "La situazione delle fonti rinnovabili in Italia ed in Europa," , 2011.
- [10] REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, "Renewable 2010 Global Status Report," REN21, Global Report 2010.
- [11] EPIA, "Solar Generation 6 Full Report Final," 2011.
- [12] European Parliament and Council, "RoHS, directive 2002/95/ec of the European Parliament and of the Council," Direttiva Comunitaria 2002.
- [13] European Parliament and Council, "WEEE, directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council," Direttiva Comunitaria 2002.
- [14] European Parliament. (2012, Gennaio) <http://www.europarl.europa.eu>.
- [15] Ministero dello Sviluppo Economico, "Decreto Interministeriale "Quarto Conto Energia"," Decreto Interministeriale 2011.
- [16] COBAT. (2012, Febbraio) www.cobat.it.
- [17] PV CYCLE. (2012, Febbraio) www.pvcycle.org.
- [18] Igor Ivanovich Anisimov John Raphael Bohland, "Recycling Silicon Photovoltaic Modules ," 6063995, Maggio 16, 2000.
- [19] Vincenzo Augugliaro, Rosaria Ciriminna, Vittorio Loddo, Mario Pagliaro Polo fotovoltaico della Sicilia Giovanni Palmisano, "Telloruro di Cadmio: Eldorado del fotovoltaico o insidia ambientale?," *Il sole a trecentosessanta gradi*, no. 7, luglio/agosto 2009.
- [20] Deutsche Solar AG, "Recycling of solar cells and modules - recent improvements,".
- [21] First Solar. (2012, Febbraio) www.firstsolar.com/recycling.
- [22] Mastrolia Annalisa, "Celle Fotovoltaiche," Università degli Studi di Lecce, 2002/2003.
- [23] Centre for remanufacturing and reuse, "The potential for remanufacturing of photovoltaic solar cells," Product Group Study 2008.
- [24] Bio Intelligence Service, "Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the weee directive ," European Commission , Final Report 14 April 2011 2011.
- [25] Sergio Lupi, *Appunti di Elettrotecnica*. Padova, 2005 - 2006.
- [26] Allan Shawn Michael Fall Morgana Lynn, "Method of lamination using radio frequency heating and pressure," WO 2007/143480 A2, Dicembre 13, 2007.
- [27] Fimcutter s.r.l., "Filmback PVS 190," Scheda tecnica 2011.
- [28] Andrea Stella Massimo Guarnieri, *Principi ed applicazioni di Elettrotecnica*. Padova: Edizioni Libreria Progetto Padova, 2004.
- [29] Lupi Sergio, *Lezioni di Elettrotecnica*., 2005-2006.
- [30] Hüttinger, "Qinto 3013M," 2007.
- [31] Bedea kabel, "Specifiche tecniche RG214,".
- [32] Hüttinger, "PFM 3000 A," 2007.

[33] EPIA, "Solar photovoltaic electricityempowering the world," EPIA, 2011.

16 RINGRAZIAMENTI

Voglio innanzitutto ringraziare il Professor Dughiero Fabrizio per il supporto fornitomi, l'attenzione dedicatami e le sue idee così innovative e così travolgenti, senza rendermene conto mi ha travolto con questa idea e mi ha trascinato nel suo team di lavoro facendomi sentire "a casa mia".

Un ringraziamento particolare lo voglio rivolgere ad Angelo Doni, sempre pressato da mille impegni è riuscito comunque a seguirmi nel lavoro di tesi fornendomi suggerimenti e strumenti utili per portare a termine un progetto così impegnativo.

È obbligo ricordare quindi tutto il Laboratorio di Elettrotermia, in questi sei mesi mi sono sentito davvero a casa, ringrazio tutti per avermi aiutato nei momenti di difficoltà e per gli splendidi momenti passati insieme, dai pranzi fugaci al bar ai momenti scherzosi trascorsi in laboratorio.

Un ringraziamento personale lo voglio anche riservare a quanti hanno condiviso questo mio e nostro cammino verso il traguardo della laurea. Grazie a Christian, per tutti Ciki, ai due Alessandro e a Fabio. L'attesa vissuta insieme a voi mi ha permesso di viverla in modo meno pesante!

Ultimando questo mio percorso formativo mi rendo conto che se ho potuto scrivere questo lavoro di conclusione della mia carriera universitaria è solamente merito di quanti mi sono stati vicini, in primis la mia famiglia ma anche amici e conoscenti tutti.

Ringrazio quindi tutti i miei familiari per avermi fornito i mezzi per arrivare fin qua, dai mezzi economici, molto importanti, ai mezzi morali e psicologici, necessari.

Non posso dimenticare infatti i numerosi ma positivi momenti di sconforto che hanno accompagnato il mio percorso accademico, più volte ho pensato di mollare ma oggi sono qui a ringraziare chi mi ha aiutato a continuare credendo che ce l'avrei fatta, credendoci sicuramente più del sottoscritto.

Grazie mamma! Con un occhio vigile su di me, sin da quando ero bambino, hai sempre cercato di tenermi lontano dalle "cose sbagliate" della vita, riuscendo a creare intorno a me le condizioni migliori possibili affinché riuscissi a concentrarmi e a dedicarmi allo studio ma anche al lavoro facendomi sempre trovare le magliette pulite e stirate per i fine settimana di lavoro.

Papà, grazie! Tu più di tutti mi hai spinto a continuare sebbene i risultati tardassero ad arrivare, probabilmente mi hai dato te la forza per continuare a provare anche quando terminate le superiori in modo egregio mi sono poi trovato a fare i conti con una realtà ben più dura di quanto mi aspettassi. Grazie per avermi spinto ad intraprendere il percorso accademico rinunciando a vedermi guidare l'impresa di famiglia.

Grazie a Damiano ovviamente! Sin da bambini abbiamo passato forse più tempo a litigare che ad andare d'accordo ma questo rapporto mi ha permesso di capire i tuoi pregi. Sebbene più giovane sei diventato il mio punto di riferimento per la vita universitaria, mi hai fatto capire come procedere negli studi e vedendo i tuoi ottimi risultati accademici mi hai spinto ancora di più! Grazie davvero!

Grazie a Sonia ed Ombretta! Fin da bambino mi avete fatto da sorelle maggiori nel senso più profondo del termine. Avete saputo premiarmi con baci e carezze quando me li meritavo e mi avete insegnato come ci si comporta quando facevo i capricci. Grazie ad Ombretta per i tanti giri in bicicletta! Grazie a Sonia per i tanti, forse troppi, baci!

Per ultima, ma non per questo meno importante, ringrazio Valentina! Solamente da un anno sei entrata nel mio piccolo mondo ma hai saputo donarmi amore e comprensione come forse mai avevo provato prima. Grazie per la pazienza, non è facile avere a che fare con un orso come me, tu ci stai riuscendo benissimo! Grazie d'esistere!