___PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO___

Servizio Antincendi e Protezione Civile
Scuola Provinciale Antincendi

SICUREZZA ANTINCENDIO

DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI



Ing. Daniele Alessandrini

La Scuola Provinciale Antincendi

La Scuola Provinciale Antincendi è una struttura della Provincia Autonoma di Trento, inserita nel Servizio Antincendi e Protezione Civile del Dipartimento di Protezione Civile.

Si occupa della formazione dei vigili del fuoco del Trentino e del personale della Protezione civile. Nella propria attività promuove e realizza anche attività di studio e ricerca su materiali, dispositivi di protezione, tecniche operative, misure di sicurezza per gli operatori in emergenza e quant'altro possa essere di interesse nel settore.

Proprio per aumentare la sicurezza dei vigili del fuoco negli interventi di emergenza incendio in presenza di impianti di generazione corrente elettrica con pannelli fotovoltaici è stato realizzato questo lavoro. E' stato costruito un impianto sperimentale dal 5,7 KW presso il Centro di addestramento di Marco di Rovereto e, in collaborazione con il Corpo Permanente dei VV.F. di Trento, sono state effettuate una serie di prove e misurazioni per verificare le reali esposizioni ai rischi degli operatori.

Ne è scaturito questo documento nel quale sono riportate le prove e i risultati ottenuti, che vuole essere un contributo e un punto di partenza per ulteriori studi ed approfondimenti che si rendono sempre più necessari visto il proliferare di questa tipologia di impianti.

Si ringrazia l'autore ing. Daniele Alessandrini, funzionario del Corpo Permanente dei Vigili del fuoco di Trento, per la collaborazione prestata e per l'alta professionalità dimostrata nella realizzazione di questo studio.

Il Direttore
ing. Ivo Erler

L'autore

Daniele Alessandrini, laureato in Ingegneria Ambientale nel 2001, si occupa come libero professionista di progettazione termotecnica e di progettazione di impianti fotovoltaici e impianti ad energie rinnovabili (pompe di calore geotermiche, solare termico, biomassa).

Si specializza in edifici a basso consumo diventando "*Consulente Energetico CasaClima*".

Progettista della riqualificazione energetica di "*casAstuta*", segnalata dal "*PREMIO ILETE. Concorso per la realizzazione di edifici sostenibili" 2009* del Servizio Energia della Provincia Autonoma di Trento.

Nel 2008 vince un concorso come Funzionario Antincendi presso il Servizio Antincendi della Provincia Autonoma di Trento.

Si occupa attualmente di antincendio degli edifici in legno con la redazione del documento "*Sicurezza antincendio degli edifici in legno*" redatto dal Servizio Antincendi in collaborazione con il CNR Ivalsa di S. Michele all'Adige e di ditte specializzate nel settore. (servizio.vvftrento.it)

Collabora per la parte antincendio al sistema di certificazione di edifici in legno "*ARCA: architettura comfort ambiente*" (www.arcacert.com).

0 PREMESSA 4
1 Normativa di settore 5
1.1 Normativa italiana 5
1.1.1 Procedure Corpo Permanente dei Vigili del Fuoco di Trento 7
1.2 Normativa internazionale 11
1.2.1 Normativa tedesca 11
1.2.2 Normativa Stati Uniti d'America 13
2 Sicurezza elettrica di un impianto fotovoltaico 15
2.1 Impianto fotovoltaico e la messa fuori tensione 15
3 Pericolosità della corrente elettrica per il corpo umano 17
3.1 Effetti sull'uomo 17
3.1.1 Tetanizzazione 17
3.1.2 Arresto della respirazione 17
3.1.3 Fibrillazione ventricolare 18
3.1.4 Ustioni 19
3.2 Corrente elettrica e passaggio nel corpo umano: CEI 64-18 19
3.2.1 Definizioni di carattere generale 20
3.2.2 Impedenza elettrica del corpo umano 21
3.2.3 Effetti della corrente continua 23
3.2.4 Soglia di percezione e soglia di reazione 24
3.2.5 Soglia di rilascio 24
3.2.6 Soglia di fibrillazione ventricolare 24
3.2.7 Altri effetti della corrente continua 26
3.2.8 Valore della resistenza del corpo umano con corrente continua 26
3.2.9 Valori di resistenza del corpo umano utilizzata per le prove 28
4 L'impianto fotovoltaico di Marco di Rovereto 29
4.1 Scheda tecnica impianto 30
4.1.1 Sistema SOLAREDGE 32
4.1.2 Sistema SOLTEQ 32
5 Prove sull'impianto fotovoltaico di Marco di Rovereto 35
5.1 Prove con impianto in condizioni standard 35
5.2 Prove con schiuma in uso per incendi di Classe A (CAFS) 37
5.3 Prove con cartoni 40
5.4 Prove con Prevento Solar 43
5.4.1 Prova con giornata di sole 43
5.4.2 Prova con Prevento Solar con giornata nuvolosa 47
5.4.3 Prove con Prevento Solar con giornata luminosa 51
5.4.4 Prova con Prevento Solar su un pannello Sunpower 55
5.5 Prove con poca luminosità 58
5.6 Prove in notturna 59
5.6.1 Prova con APS a 7,5 m 59
5.6.2 Prova con APS a 15 m 61
5.7 Prove di funzionamento dei sistemi di messa fuori tensione 64
5.7.1 Prove con il sistema SOLAREDGE 64
5.7.2 Prove con il sistema SOLTEQ 64
6 Conclusioni 65

0 PREMESSA

Con l'avanzare della necessità di dotarsi di fonti di energia alternative e sostenibili, si vanno sempre più diffondendo sul territorio gli impianti fotovoltaici.

Ben poco però si sa in merito alle procedure di intervento in emergenza da parte dei vigili del fuoco, in particolare su quali operazioni è più opportuno applicare per garantire innanzitutto la sicurezza degli operatori dell'emergenza.

Per questo motivo la Scuola Provinciale Antincendi, in collaborazione con il Corpo Permanente dei Vigili del Fuoco di Trento, ha deciso di realizzare uno studio approfondito nell'ambito degli interventi dei vigili del fuoco in presenza di impianti fotovoltaici. Il referente dello studio è l'ing. Daniele Alessandrini.

A tale scopo è stato realizzato, unico nel suo genere in Italia, un impianto sperimentale a Marco di Rovereto presso il centro addestrativo di protezione civile, con l'obiettivo di affrontare in maniera sistematica e più realistica possibile i problemi connessi agli interventi in presenza di impianti fotovoltaici, per trasmettere poi queste conoscenze ai vigili del fuoco attraverso specifici e mirati corsi di formazione.

In particolare si dovranno approfondire i temi più salienti attualmente sul campo:

- interventi di soccorso in presenza di impianti fotovoltaici integri e non interessati da agenti esterni come fiamme, fumo, calore;
- interventi di soccorso in presenza di impianti fotovoltaici parzialmente o totalmente coinvolti da agenti esterni come fiamme, fumo, calore;
- sperimentazione di schiume o altri agenti per l'inibizione di radiazione solare sui pannelli stessi;
- sperimentazione sul campo di sistemi di sgancio dei singoli pannelli in modo tale da rendere tutto l'impianto fuori tensione;
- verifiche delle situazioni più pericolose per i vigili del fuoco e i soccorritori.

Per affrontare tutti questi temi è stato progettato e realizzato, un impianto fotovoltaico da 5,7 kWp costituito da 30 moduli da 190 W e suddiviso su due stringhe.

L'impianto è stato costruito utilizzando due tecnologie diverse di sgancio del singolo pannello, che consentono di mettere fuori tensione tutto il campo fotovoltaico. Ciò allo scopo di verificare con prove pratiche il grado di affidabilità e le risposte che queste apparecchiature, se usate sugli impianti civili e industriali, possono dare nell'ambito di un intervento.

1 Normativa di settore

1.1 *Normativa italiana*

La normativa italiana del settore si basa principalmente sulle norme CEI riguardanti gli impianti elettrici in bassa tensione (CEI 64-8).

In più è stata anche realizzata una Guida CEI 82-25 “Guida alla realizzazione di sistemi di generazione fotovoltaica collegati alle reti di elettriche di media e bassa tensione”. La guida cerca di affrontare in modo coerente tutti gli aspetti elettrici salienti degli impianti fotovoltaici, anche quelli riguardanti gli aspetti di protezione contro i contatti diretti e indiretti. In particolare si affrontano i problemi di messa a terra dei moduli fotovoltaici.

Il Ministero dell’Interno – “Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del soccorso pubblico e della difesa civile” ha emesso alcune circolari sul tema.

In particolare esiste una circolare ministeriale “Guida per l’installazione degli impianti fotovoltaici” con l’ultima edizione del 07-02-2012 che affronta il problema degli impianti fotovoltaici dal punto di vista della prevenzione incendi. Questa circolare riguarda solamente gli impianti fotovoltaici installati su attività soggette al controllo dei Vigili del Fuoco, anche se dà delle valide indicazioni per tutti gli impianti fotovoltaici.

In particolare si ribadisce che “*Gli impianti fotovoltaici non rientrano fra le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi ai sensi del D.P.R. n. 151 del l agosto 2011 "Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione incendi, a norma dell'articolo 49 comma 4-quater, decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122"*.

In via generale l'installazione di un impianto fotovoltaico (FV), in funzione delle caratteristiche elettriche/costruttive e/o delle relative modalità di posa in opera, può comportare un aggravio del preesistente livello di rischio di incendio.”

L'aggravio potrebbe concretizzarsi, per il fabbricato servito, in termini di:

- *interferenza con il sistema di ventilazione dei prodotti della combustione (ostruzione parziale o totale d i traslucidi, impedimenti apertura evacuatori);*
- *ostacolo alle operazioni di raffreddamento/estinzione di tetti combustibili;*
- *rischio di propagazione delle fiamme all'esterno o verso l'interno del fabbricato (presenza di condutture sulla copertura di un fabbricato suddiviso in più compartimenti - modifica della velocità di propagazione di un incendio in un fabbricato mono compartimento).*

Vengono previste anche alcune prescrizioni per quanto riguarda la posa:

“L'installazione dovrà essere eseguita in modo da evitare la propagazione di un incendio dal generatore fotovoltaico al fabbricato nel quale è incorporato. Tale condizione si ritiene rispettata qualora I'impianto fotovoltaico, incorporato in un’opera di costruzione, venga installato su strutture ed elementi di copertura e/o di facciata incombustibili (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 oppure Classe A1 secondo il DM 10/03/2005). Risulta, altresì, equivalente l'interposizione tra i moduli fotovoltaici e il piano di appoggio, di uno strato di materiale di resistenza al fuoco almeno El 30 ed incombustibile (Classe 0 secondo il DM 26/06/1984 oppure classe A1 secondo il DM 10/03/2005).

In alternativa potrà essere effettuata una specifica valutazione del rischio di propagazione dell'incendio, tenendo conto della classe di resistenza agli incendi esterni dei tetti e delle coperture di tetti (secondo UNI EN 13501-5:2009 classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - parte 5:

classificazione in base ai risultati delle prove di esposizione dei tetti a un fuoco esterno secondo UNI ENV 1187:2OOT) e della classe di reazione al fuoco del modulo fotovoltaico attestata secondo le procedure di cui all'art' 2 del 3DM 10 marzo 2005 recante ,,c/assi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione" da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio.

L'ubicazione dei moduli e delle condutture elettriche dovrà inoltre sempre consentire il corretto funzionamento e la manutenzione di eventuali evacuatori di fumo e di calore (EFC) presenti, nonché tener conto, in base all'analisi del rischio incendio, dell'esistenza di possibili vie di veicolazione di incendi (lucernari, camini, ecc.). In ogni caso i moduli, le condutture, gli inverter, i quadri ed altri eventuali apparati non dovranno essere installati nel raggio di 1 m dagli EFC.

Dal punto di vista interventistico è stata emanata una nota PROT.EM 622/867 del 18-02-2011, recante "*Procedure in caso di intervento in presenza di pannelli fotovoltaici e sicurezza degli operatori vigili del fuoco*".

In questa nota si affronta il tema interventistico che più degli altri interessa gli operatori dei Vigili del Fuoco che devono intervenire in ambienti con la presenza di un impianto fotovoltaico.

La nota ribadisce alcuni rischi connessi alla presenza degli impianti quali, tra i più significativi:

a) <u>Rischio di caduta</u>

Si tratta del rischio più comune nel caso di impianto collocato su di un tetto, soprattutto in caso di buio e/o in presenza di fumo. Alcuni impianti sono integrati nel tetto: ciò riduce fortemente il pericolo di inciampo ma non quello di scivolamento a causa delle superficie di vetro di alcuni moduli cristallini. ...

b) <u>Rischio di crollo della struttura e di caduta dei panelli</u>

A causa del sovraccarico dovuto alla presenza dei pannelli PV, il rischio di collasso della copertura sotto l'azione del fuoco è da prendere in maggiore considerazione. Un altro pericolo da non trascurare è quello della caduta dei pannelli sia causa del loro distacco dalla strutture di fissaggio sia a causa del crollo del tetto stesso.

É necessario che i soccorritori, ancorché dotati dei DPI previsti dalla procedure operative standard, valutino attentamente l'evoluzione dello scenario incidentale.

c) <u>Rischio di propagazione dell'incendio</u>

La nota prot. n. 5158 del 26 marzo 2010 avente come oggetto "Guida per l'installazione degli impianti fotovoltaici" ha già ampiamente analizzato le problematiche relative alla propagazione dell'incendio. É appena il caso di evidenziare che i componenti plastici dell'impianto saranno interessati dalla combustione.

d) <u>Rischio di inalazione di prodotti chimici pericolosi</u>

In condizioni normali, i materiali usati per gli impianti PV sono considerati non pericolosi; essi possono diventare pericolosi in caso di esposizione all'incendio o in caso di esplosione. Infatti, in queste situazioni i pannelli PV possono rilasciare sostanze chimiche tra cui il boro, il tellurio di cadmio, l'arsenurio di gallio e il fosforo. Alcuni prodotti sono già noti perché possono comportare problemi di natura tossicologica o causare danni all'ambiente.

In particolare, il tellurio di cadmio è cancerogeno la cui principale via di assunzione è quella respiratoria ...

Il rischio di inalazione di agenti chimici pericolosi è minimo nel caso di piccoli impianti PV coinvolti in un incendio o in un esplosione. Ben più elevato è il rischio di inalazione nel caso di impianti PV di elevate dimensioni;

tale rischio può essere minimizzato mediante gli usuali dispositivi di protezione delle vie respiratorie.

e) <u>Rischio di natura elettrica</u>

*Quindi, finché c'è presenza di luce, l'impianto fotovoltaico continua a generare energia elettrica. Di conseguenza, le squadre di soccorso devono considerare il sistema PV come costantemente in tensione ed adottare le procedere operative standard previste in caso in caso di interventi con presenza di sistemi connessi all'alimentazione elettrica; pertanto le operazioni effettuate durante la notte garantiscono un maggior livello di sicurezza. (*NdR questo è un caso che è stato analizzato durante le prove)

Lo sgancio elettrico d'emergenza, previsto dalle norme, consente di disalimentare l'impianto elettrico a valle dell'inverter. Invece, i conduttori ed i componenti elettrici posti tra i moduli PV ed il punto di sgancio di emergenza, in caso di esposizione alla luce solare, rimangono in tensione. Pertanto i soccorritori devono fare molta attenzione a non rompere o danneggiare i conduttori o le apparecchiature elettriche, avendo cura, come è stato detto in precedenza, di considerarli costantemente in tensione.

.....

Durante le ore diurne:

a) Sganciare il circuito a livello dell'inverter. Ciò consente solo di eliminare il rischio di elettrocuzione a valle dell'inverter stesso. Si raccomanda, inoltre di provvedere sempre allo sgancio dell'alimentazione elettrica generale dell'intero edificio ricordando che ciò non interrompe l'alimentazione elettrica dell'impianto PV;

b) Si consiglia di evitare, se possibile, ogni intervento diretto sui moduli sotto tensione. Se tale intervento risulta necessario e, soprattutto, se i pannelli risultano accessibili, potrebbe essere necessario coprire tutti i moduli PV con materiali opachi(non trasparenti alla luce) in modo da eliminare il rischio di generazione dell'energia elettrica. Ad esempio, per piccoli impianti PV si potrebbero adottare dei teloni opachi

1.1.1 Procedure Corpo Permanente dei Vigili del Fuoco di Trento

In funzione della capillare presenza di impianti fotovoltaici in Trentino, si è prodotta una linea guida interna basata sulle linee guida del Ministero dell'Interno. Si sono però aggiunti alcuni casi particolari di impianti fotovoltaici con un polo (positivo o negativo) messo a terra, che rappresenta un aggravio del rischio per elettrocuzione, visto che sono abbastanza diffusi in provincia di Trento.

Linee guida per interventi in presenza di impianti fotovoltaici

La pericolosità della presenza di impianti fotovoltaici sugli edifici richiede capacità tecniche e di analisi che richiede preferibilmente la presenza sul posto del funzionario di turno.

Gli interventi sugli impianti fotovoltaici si possono dividere in 3 categorie

- *Caso A: Interventi in presenza di impianti fotovoltaici integri e non interessati da agenti esterni come fiamme, fumo, calore*
- *Caso B: Interventi in presenza di impianti fotovoltaici parzialmente o totalmente coinvolti da agenti esterni come fiamme, fumo, calore*
- *Caso C: Interventi in presenza di impianti fotovoltaici con polo a terra integri e non interessati da agenti esterni come fiamme, fumo, calore*

Caso A: Interventi in presenza di impianti fotovoltaici integri e non interessati da agenti esterni come fiamme, fumo, calore

1. *Prima di intervenire, aprire l'interruttore generale dell'edificio. Con tale operazione:*
    a. *si spegne l'inverter;*
    b. *si toglie corrente a tutti gli impianti dell'edificio sia in c.a. che in c.c.;*
    c. ***rimane la tensione su tutto il lato c.c.;***
2. *aprire, se presenti, il sezionatore generale e i sezionatori dei quadri di campo sotto carico del lato c.c.:*
    a. *si toglie tensione fino ai sezionatori;*
    b. ***restano sotto tensione i cavi verso i pannelli fv;***
3. ***evitare tagli di coperture o smontaggio di pannelli o altre lavorazioni che possano far entrare in contatto con cavi o parti di impianto sotto tensione.***
4. *se si rendono necessarie lavorazioni di cui sopra:*
    a. *operare solo con DPI adeguati (guanti isolanti di tipo 0, scarpe preferibilmente isolanti, elmo con visiera abbassata, attrezzi isolati) e ancorarsi alla copertura se possibile e sicuro;*
    b. *per rendere sicuro l'impianto fotovoltaico esistono due possibilità:*
        i. ***disconnettere i pannelli fotovoltaici uno alla volta*** *(scollegare i cavi provenienti dal singolo pannello), in questo modo si mettono fuori servizio i generatori di corrente e di conseguenza tutti i conduttori;*
        ii. *nel caso non fosse possibile disconnettere i pannelli,* ***tagliare i cavi in c.c. partendo dai cavi di sezione più piccola vicino ai pannelli****. Si ricordi in ogni caso che, essendo i pannelli collegati in serie in una stringa, la tensione in gioco è quella della stringa nel suo complesso. Si tenga presente che i cavi tagliati possono essere ancora sottotensione e* ***quindi si eviti di lasciare non isolata la parte finale****.*
5. *in ogni caso si tenga presente che* ***ogni lavoro nell'area dell'impianto fotovoltaico è da considerarsi a tutti gli effetti come lavoro sotto tensione****. La norma CEI 11-27 prevede che tali lavori non dovrebbero essere effettuati sotto pioggia, neve o grandine, in ambienti bagnati, con visibilità scarsa.*

Caso B: Interventi in presenza di impianti fotovoltaici parzialmente o totalmente coinvolti da agenti esterni come fiamme, fumo, calore

1. *prima di intervenire, aprire l'interruttore generale dell'edificio. Con tale operazione:*
    a. *si spegne l'inverter;*
    b. *si toglie corrente a tutti gli impianti dell'edificio sia in c.a. che in c.c.;*
    c. ***rimane la tensione su tutto il lato c.c.;***
2. *si proceda con l'eventuale spegnimento dell'incendio con estinguente adatto ad essere utilizzato su apparecchiature sotto tensione;*
3. *a seconda delle situazione potrebbero presentarsi alcune opzioni:*
    a. ***fusione di cavi elettrici o altre parti di impianto che producono un corto circuito****; questo produce un abbassamento della tensione del circuito e un aumento della corrente. Sono possibili interventi di taglio di cavi tenendo conto del rischio elettrico. Sono da evitarsi assolutamente taglio di cavi di sezione notevole che potrebbero ancora trasportare una corrente elettrica*

elevata (decine di Ampere). In questo caso il taglio con cesoie dielettriche potrebbe produrre la fusione di parti metalliche delle stesse;

b. ***contatto tra un conduttore (in corrente continua) dell'impianto fotovoltaico e parti metalliche con conseguente messa a terra del polo stesso (polo positivo o negativo)****; questa è una delle situazioni più pericolose perché il contatto da parte dell'operatore con un conduttore di polarità diversa potrebbe portare alla folgorazione con passaggio di corrente attraverso il corpo umano. Il passaggio di corrente sul percorso piedi-mano è il più pericoloso dei contatti rispetto al mano-mano. Il polo a terra più pericoloso è il positivo perché produrrebbe una corrente ascendente attraverso il corpo umano;*

c. ***parziale combustione di pannelli fotovoltaici****; in questo caso si potrebbero avere varie soluzioni tra le quali corto circuiti, messa a terra di fasi. È da valutare la possibilità di limitarsi al solo spegnimento dell'incendio.*

4. *per le lavorazioni da effettuarsi si rimanda al caso A.*

Caso C: Interventi in presenza di impianti fotovoltaici con polo a terra integri e non interessati da agenti esterni come fiamme, fumo, calore

1. *prima di intervenire, aprire l'interruttore generale dell'edificio. Con tale operazione:*
   d. *si spegne l'inverter;*
   e. *si toglie corrente a tutti gli impianti dell'edificio sia in c.a. che in c.c.;*
   f. rimane la tensione su tutto il lato c.c.;
2. *aprire, se presenti, i sezionatore generale e i sezionatori dei quadri di campo sotto carico del lato c.c.*
   g. *si toglie tensione fino ai sezionatori;*
   h. restano sotto tensione i cavi verso i pannelli fv;
3. *in questo caso si possono seguire le indicazioni del Caso A ma si deve tenere presente che se non viene sezionato il polo collegato intenzionalmente a terra, il rischio di folgorazione è elevato, in quanto il contatto da parte dell'operatore con un conduttore di polarità diversa da quella collegata a terra causerebbe il passaggio di corrente attraverso il corpo umano. Il passaggio di corrente sul percorso piedi-mano è il più pericoloso dei contatti rispetto al mano-mano. Il polo a terra più pericoloso è il positivo perché produrrebbe una corrente ascendente. Pertanto si raccomanda di sezionare o interrompere (taglio con cesoie isolate) il conduttore che collega intenzionalmente il polo a terra. Se l'impianto Fv è realizzato correttamente, il polo è collegato a terra nell'inverter o nei pressi dell'inverter.*
4. ***NB. In genere gli impianti Fv con moduli fotovoltaici in film sottile (foto A) presentano il polo negativo a terra, mentre gli impianti Fv con moduli fotovoltaici di marca SUNPOWER (foto B) presentano il polo positivo a terra****.*



Foto A: impianto con film sottile



Foto B: pannello SUNPOWER, si differenza dagli altri perché utilizza la tecnologia back-contact quindi appare senza connessioni delle singole celle sul lato a vista.

1.2 *Normativa internazionale*

1.2.1 Normativa tedesca

In Germania il problema della sicurezza degli impianti fotovoltaici è stato sentito con largo anticipo rispetto agli altri paesi, perché la Germania è stata il primo mercato al mondo nel settore e quello che è partito per primo.

Il problema della sicurezza degli impianti si è posto con maggior importanza nel 2009 a seguito con un incendio di un impianto di 5 MW posto sulla copertura di un capannone di circa 50.000 mq. Nel giugno del 2009 si è innescato un incendio a causa di un malfunzionamento dei pannelli stessi, che avevano già dato problemi negli anni precedenti.

In quell'occasione e in successive occasioni, proprio per il fatto che non esisteva un sistema capace di togliere tensione a tutto l'impianto, l'intervento dei vigili del Fuoco si limitò al controllo del fuoco, facendo in modo di limitare i danni solo all'edificio in questione.

Ovviamente questa soluzione ha destato molte critiche da una parte e dall'altra ha sollevato un problema che altrimenti era solo covante.

In seguito è stato costituito un gruppo di lavoro con all'interno tutti gli attori del settore:

- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (associazione delle aziende del settore solare)
- Unione dei tecnici del settore antincendio (BFSB)
- Associazione nazionale dei Vigili del Fuoco
- Vigili del Fuoco di Monaco di Baviera

che hanno redatto anche degli opuscoli sulla materia, ad uso direttamente dei Vigili del Fuoco.

La guida è molto simile alle linee guida italiane anche se introduce alcune novità.

In particolare per quanto riguarda la parte interventistica, nella documentazione sul tema, si fa sempre riferimento alla norma DIN VDE 0132 per quanto riguarda l'utilizzo di estinguenti nel caso di impianti elettrici sotto tensione.

Nella stessa norma si trovano anche delle indicazioni sul possibile utilizzo di acqua su impianti sotto tensione. La norma riporta le seguenti possibilità:

	Distanza dell'operatore dalla parti sotto tensione (fino a 1.000 V c.a., 1.500 V c.c.)
Getto frazionato	1 m
Getto pieno	5 m

D'altro canto esclude l'utilizzo di schiume su impianti sotto tensione.

In più propone di esporre in posizione molto visibile, all'esterno di edifici con presenza di impianti fotovoltaici, un simbolo come quello di Figura 1-1 e uno schema con segnalati i principali componenti dell'impianto con in particolare in rosso le parti elettriche che rimangono sotto tensione come quello di Figura 1-2.

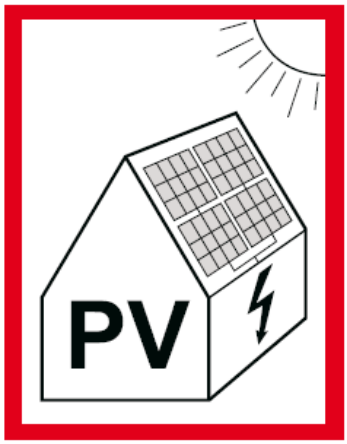


Figura 1-1: simbolo della presenza di impianti fotovoltaici

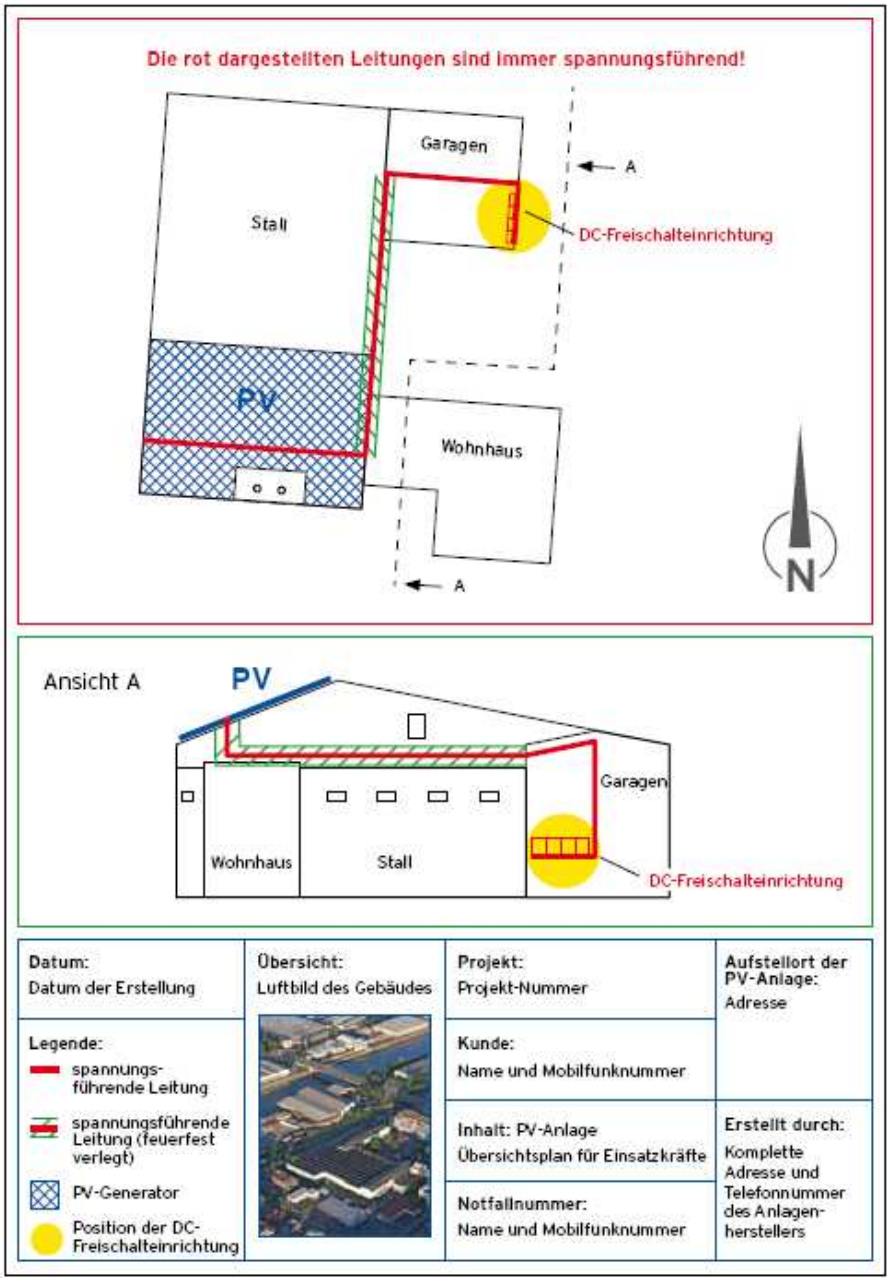


Figura 1-2: schema dell'impianto fotovoltaico

1.2.2 Normativa Stati Uniti d'America

Negli Stati Uniti d'America a livello normativo federale esistono varie linee guida. Esistono d'altro canto una serie di documenti e linee guida di associazioni o società del settore.

Un documento sul tema fotovoltaico è il final report dell'Associazione State Fire Marshall " Brindging the gap: fire safety e green buildings". Queste linee guida si occupano di tute le problematiche inerenti il settore delle nuove tipologie di costruzione chiamate green building e anche quello del fotovoltaico.

Anche in questo caso si rimarca che sarebbe meglio predisporre dei sistemi di sgancio del singolo pannello per poter fare in modo che sia completamente senza tensione. In altri documenti "*Guideline for Fire Safety Elements of Solar Photovoltaic Systems*" dei dipartimenti di prevenzione incendi di stati americani vengono proposti dei sistemi di posa dei pannelli che permetterebbero il passaggio di personale sulle falde su cui sono posizionati. In sostanza richiederebbero dei passaggi di circa 1 metro di larghezza (3 piedi ≈ 1 metro) ai bordi della falda.

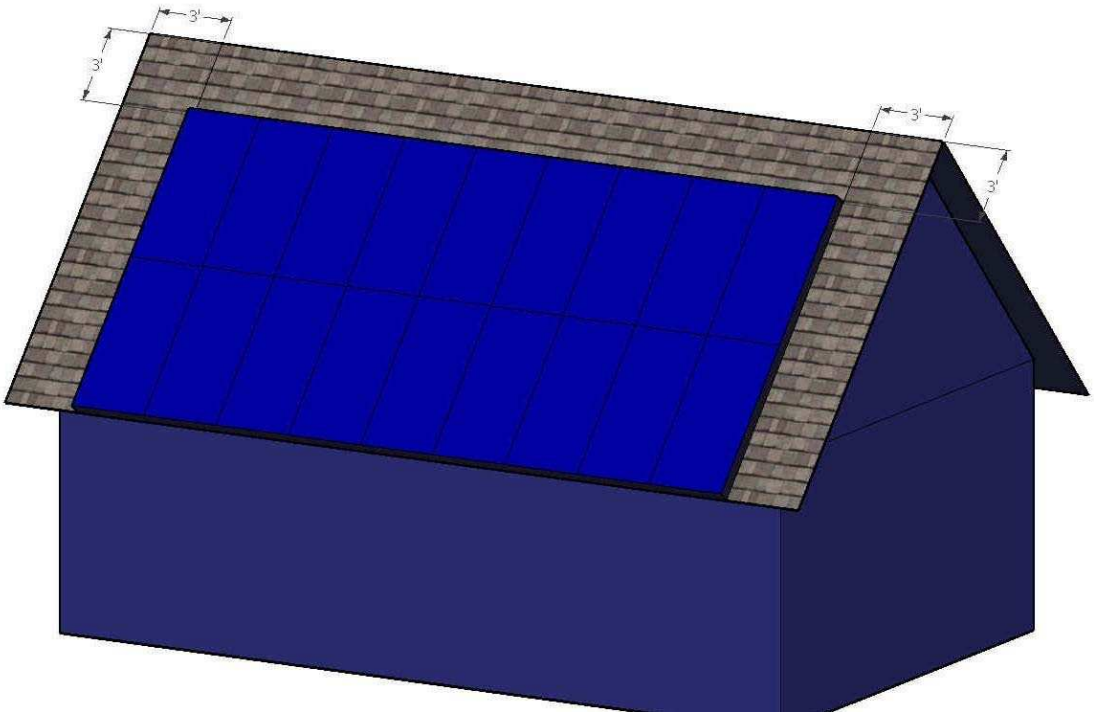


Figura 1-3: esempio posizionamento dei pannelli fotovoltaici

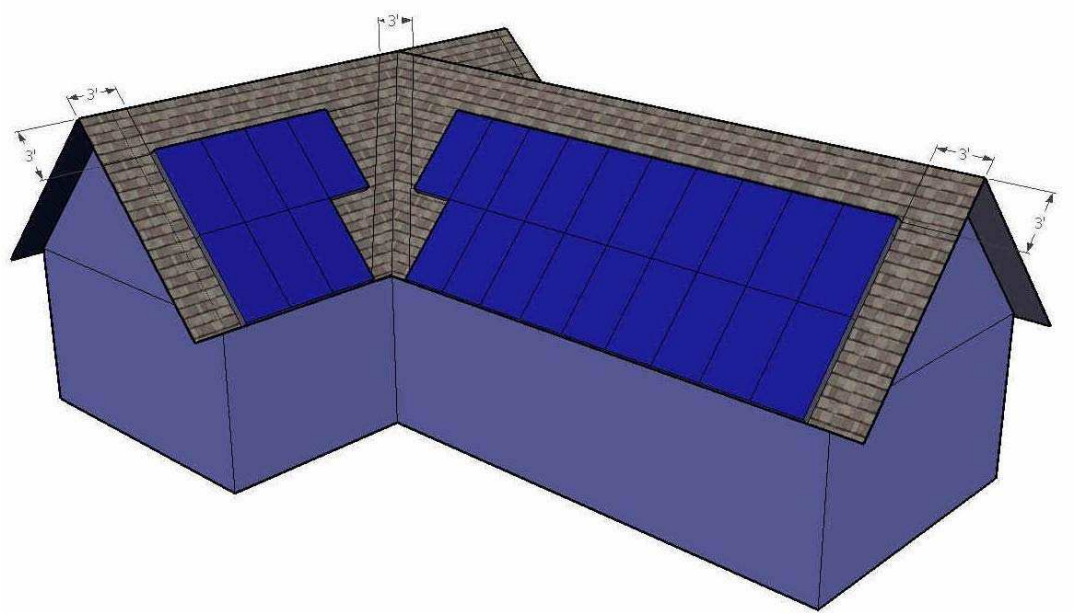


Figura 1-4: esempio posizionamento dei pannelli fotovoltaici

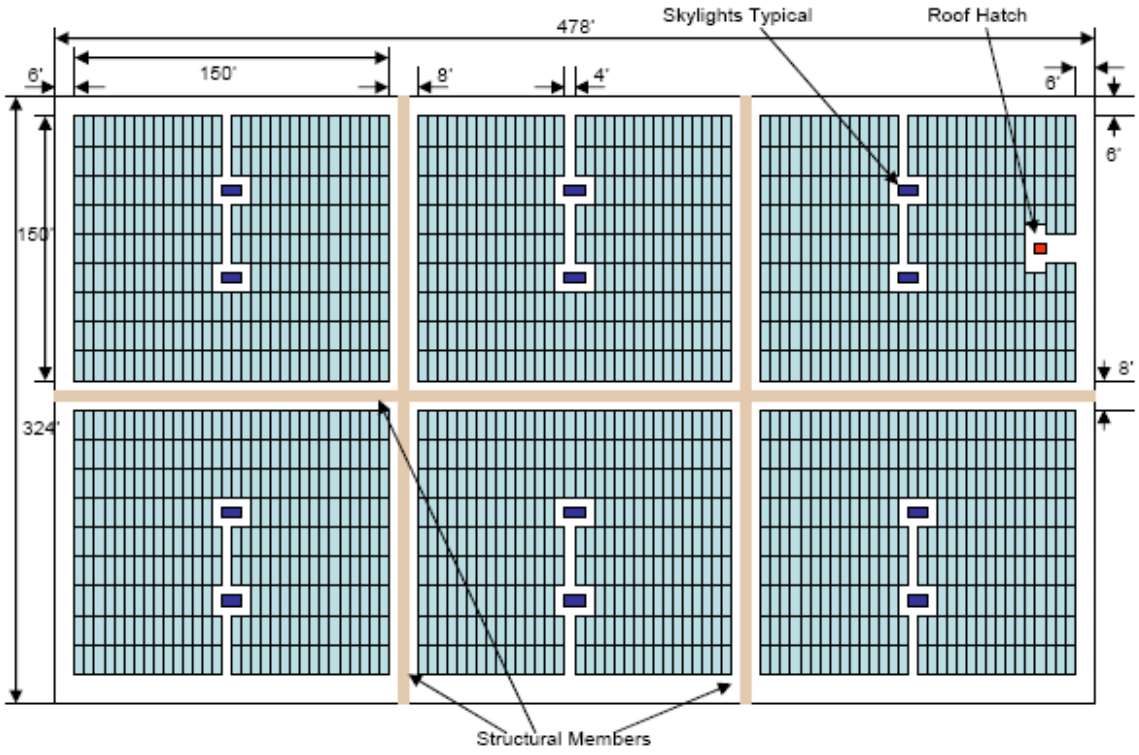


Figura 1-5: esempio posizionamento dei pannelli fotovoltaici

Per quanto riguarda impianti su grande scala ogni 45 metri di pannelli si dovrebbero prevedere dei passaggi larghi circa 2,5 metri, mentre per l'accesso ai lucernari dovrebbe avere dei passaggi pedonali larghi circa 1,25 metri.

Per quanto riguarda i documenti sull'aspetto interventistico, le indicazioni sono simili a quelle dei documenti fin qui analizzati.

2 Sicurezza elettrica di un impianto fotovoltaico

2.1 *Impianto fotovoltaico e la messa fuori tensione*

I problemi di sicurezza antincendio e più in generale di sicurezza delle persone legati agli impianti fotovoltaici si basano sul fatto che la parte in corrente continua di tali impianti, per lo meno una parte, non può essere messa fuori tensione in presenza di radiazione luminosa diretta sui pannelli stessi.

Questo è dovuto al fatto che non è previsto dal punto di vista normativo internazionale (IEC) né da quello italiano (CEI) l'installazione di apparecchi che siano in grado di togliere tensione al campo fotovoltaico nella sua interezza.

Il motivo di tale mancanza normativa non è noto, ma sta di fatto che se sugli impianti elettrici in corrente alternata classici le norme impongono la presenza di una serie di sistemi di sicurezza (differenziali, messa a terra, interruttori magnetotermici) contro i contatti diretti e indiretti, per quanto riguarda gli impianti fotovoltaici in corrente continua invece tutto ciò non si rende obbligatorio.

Quindi, gli impianti fotovoltaici hanno due differenze fondamentali rispetto ai normali impianti elettrici:

1. sono degli impianti in **corrente continua** con tensioni anche superiori agli **800 Volt;**
2. in presenza di radiazione luminosa diretta ai pannelli **non possono essere messi fuori tensione in tutte le loro parti**.

La tipologia costruttiva degli impianti fotovoltaici fatti a regola dell'arte prevedono uno schema come il seguente.

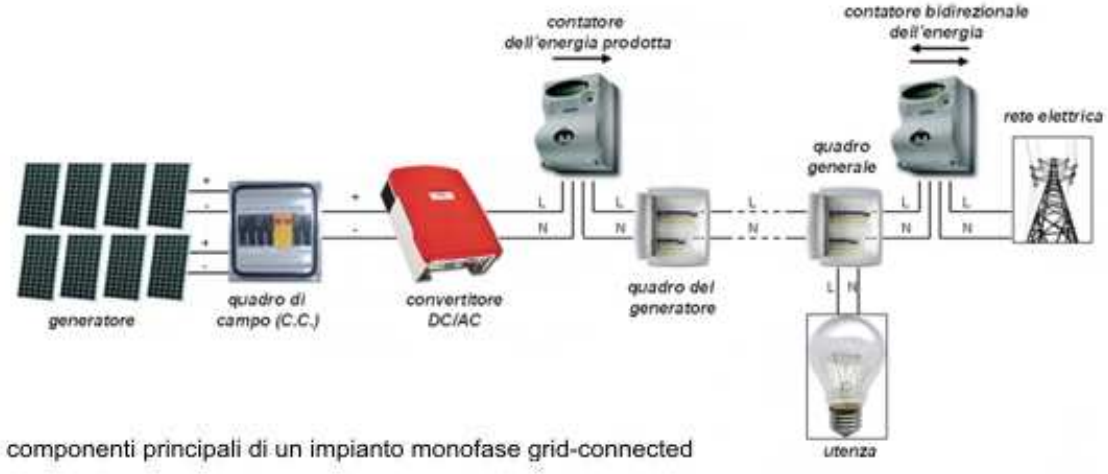


Figura 2-1: schema di un impianto fotovoltaico

I pannelli fotovoltaici vengono messi in serie a formare una stringa, le stringhe vengono poi messe in parallelo fino ad arrivare all'inverter, il quale trasforma la corrente continua in alternata. Come si vede in Figura 2-2 le tensioni tra i cavi elettrici della stringa e quelli del parallelo delle stringhe possono raggiungere anche i 1000 Volt.

Lo schema di Figura 2-2, dove non è previsto nessun sistema di sezionamento sul lato corrente continua fino all'inverter, rappresenta lo stato dell'arte della maggior parte degli impianti fotovoltaici installati in Italia. Eccezione sono quelli installati con sistemi di sicurezza ad hoc (come quelli installati sull'impianto fotovoltaico sperimentale utilizzato per le prove) oppure quelli con un interruttore di sezionamento sul lato corrente continua.

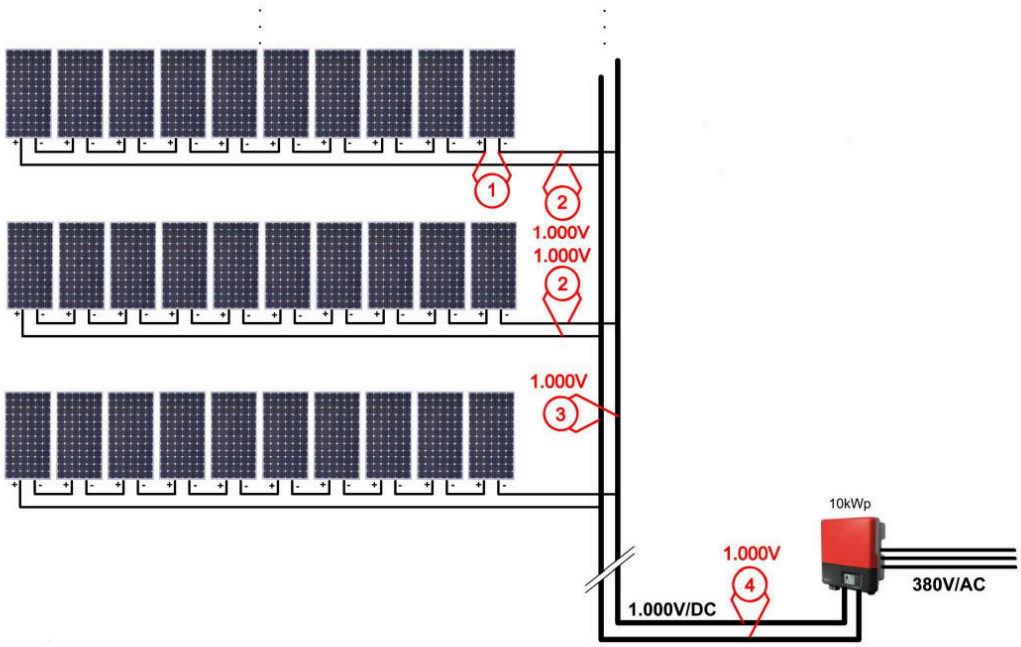


Figura 2-2: schema di un impianto fotovoltaico

Le situazioni pericolose sono state già illustrate nel Capitolo 2.

La Figura 2-3 rappresenta molto bene la situazione più pericolosa:

- c'è un principio d'incendio su una copertura
- già un parte di pannelli sono interessati all'incendio
- ci cerca di limitare l'estendersi dell'incendio ma ci sono posizionati dei pannelli fotovoltaici essi stessi combustibili per la presenza di materiale plastico.
- nello smontaggio dei pannelli si è in presenza di cavi sottotensione, che dovrebbero essere tagliati con i DPI adeguati che nello specifico non sono quelli antifiamma.



Figura 2-3: intervento in presenza di impianto fotovoltaico (CNVVF – Umbria)

3 Pericolosità della corrente elettrica per il corpo umano

3.1 *Effetti sull'uomo*

Il passaggio di corrente elettrica attraverso il corpo umano può determinare numerose alterazioni e lesioni, temporanee o permanenti. La corrente elettrica produce un'azione diretta sui vasi sanguigni, sul sangue, sulle cellule nervose; può determinare alterazioni permanenti nel sistema cardiaco (aritmie, lesioni al miocardio, alterazioni permanenti di conduzione), nell'attività celebrale (modificazione dell'elettroencefalogramma) e nel sistema nervoso centrale.

Gli effetti più frequenti e più importanti che la corrente produce sul corpo umano sono fondamentalmente quattro:

1. **Tetanizzazione**
2. **Arresto della respirazione**
3. **Fibrillazione ventricolare**
4. **Ustioni**

3.1.1 Tetanizzazione

Se uno stimolo elettrico è applicato ad un muscolo, esso si contrae, per poi ritornare allo stato di riposo. Se al primo stimolo ne segue un secondo, prima che il muscolo sia tornato allo stato di riposo, i due effetti possono sommarsi. Più stimoli opportunamente intervallati contraggono ripetutamente il muscolo in modo progressivo (contrazione tetanica).

La "tetanizzazione dei muscoli" è la contrazione involontaria dei muscoli interessati al passaggio della corrente.

E' per questo motivo che l'infortunato, se attraversato da corrente elettrica, può rimanere appiccicato alla parte in tensione; il contatto perdura nel tempo e può produrre svenimenti, asfissia, collasso, stato di incoscienza.

Il valore più grande di corrente per cui una persona è ancora in grado di staccarsi dalla sorgente elettrica si chiama corrente di rilascio e mediamente è compreso tra i 10mA e i 15mA per una corrente di 50Hz. Da notare che correnti molto elevate non producono solitamente la tetanizzazione perché quando il corpo entra in contatto con esse, l'eccitazione muscolare è talmente elevata che i movimenti muscolari involontari generalmente staccano il soggetto dalla sorgente.

La corrente elettrica, a seguito del calore dissipato per effetto Joule, riscalda le parti attraversate, è lesiva per le pareti cellulari sia per la presenza del campo elettrico che perturba le forze intermolecolari di van der Waals, sia per il superamento della temperatura di transizione che, facendo vibrare le code idrofobe del doppio strato fosfolipidico queste passerebbero allo stato fluido. Inoltre ha un'azione di denaturazione delle proteine per rottura del legame p presente nel doppio legame del gruppo carbossilico nella sequenza degli aminoacidi.

Altri fenomeni sono la termocoagulazione. Si possono avere ustioni superficiali o profonde. La necrosi muscolare si manifesta anche con l'immissione in circolo di grandi quantità di mioglobina che risulta essere nefrotossica.

Nel caso in cui la pelle venisse esposta per un flusso di corrente la cui densità fosse di circa 60 milliampere per mm2, questa sarebbe carbonizzata in pochi secondi.

3.1.2 Arresto della respirazione

È dovuta al blocco involontario dei muscoli che riguardano la respirazione. Il fenomeno può provocare l'arresto della respirazione se non si interviene entro pochi minuti dall'infortunio praticando la respirazione bocca-bocca o la respirazione bocca-naso.

Correnti superiori ai limiti sopra indicati per la corrente di rilascio producono nell'infortunato difficoltà respiratorie e segni di asfissia: il passaggio della corrente determina una contrazione dei muscoli addetti alla respirazione e una paralisi dei centri nervosi che sovrintendono alla funzione respiratoria; se la corrente perdura, l'infortunato perde conoscenza e può morire soffocato.

Circa il 6% delle morti per folgorazioni è dovuto ad asfissia. Di qui l'importanza della respirazione artificiale (bocca a bocca), della tempestività con la quale è applicata e della durata per cui è praticata. E' necessario intervenire al max. entro 3-4 min.

3.1.3 Fibrillazione ventricolare

Il cuore funziona grazie a stimoli elettrici, pertanto una corrente elettrica esterna può alterare il suo funzionamento fino alla fibrillazione ventricolare.

E' l'effetto più pericoloso, ed è dovuto alla sovrapposizione delle correnti provenienti dall'esterno con quelle fisiologiche che, generando delle contrazioni scoordinate, fanno perdere il giusto ritmo al cuore. Il cuore ha la funzione di pompare il sangue lungo le vene e le arterie del corpo. Per questo scopo, i muscoli del cuore, le fibrille, si contraggono e si espandono ritmicamente a circa 60/100 volte al minuto. Questi movimenti sono coordinati da un vero e proprio generatore d'impulsi elettrici, il nodo seno-atriale. Appositi tessuti conduttori si incaricano di propagare questi impulsi che, passando attraverso il nodo atrio-ventricolare, arrivano alle fibre muscolari del cuore. Quando gli impulsi elettrici arrivano alle fibrille, queste ultime producono le contrazioni dando luogo al battito cardiaco. Il cuore, proprio a causa della natura elettrica del suo funzionamento, è particolarmente sensibile a qualunque corrente elettrica che proviene dall'esterno, sia essa causata da uno shock elettrico che introdotta volontariamente, come nel caso del pace-maker. La corrente generata dal pace-maker è semplicemente un supporto agli impulsi elettrici prodotti nel nodo seno-atriale e non produce anomalie nel normale funzionamento del cuore ma lo aiuta a correggere certe disfunzioni. Una corrente esterna che attraversa il cuore potrebbe in questo caso avere effetti molto gravi per l'infortunato perché potrebbero alterarsi la sincronizzazione ed il coordinamento nei movimenti del cuore con paralisi dell'operazione di pompaggio del sangue. Questa anomalia si chiama fibrillazione ed è particolarmente pericolosa nella zona ventricolare perché diventa un fenomeno non reversibile in quanto esso persiste anche se lo stimolo è cessato. Meno pericolosa, grazie alla sua natura reversibile, è invece la fibrillazione atriale.

La fibrillazione ventricolare è reversibile entro i primi minuti soltanto se il cuore è sottoposto ad una scarica elettrica appropriata. Solo così si possono evitare gravi danni al tessuto miocardico, al cervello e nel peggiore dei casi la morte dell'infortunato.

Il tessuto miocardico per sua natura è un conduttore, ed in molte zone le cellule sono organizzate in microcircuiti. Queste riconoscono in un gruppo di cellule del NS la proprietà di circuito primario. La funzione contrattile si esplica quando il segnale elettrico dal circuito primario abbia attraversato per induzione tutti i microcircuiti e da questi in tutte le cellule, giungendo alla periferia. Quando i circuiti secondari, per una delle tante cause, e fra queste l'influenza di una corrente esterna non riconoscono il circuito primario perdono la capacità di una depolarizzazione sincronizzata.

L'invasione di un flusso di corrente elettrica esterna avente un valore d'induzione elettromagnetica notevolmente elevato, che per la sua durata colpisce anche nel periodo di vulnerabilità, distrugge il delicato equilibrio dove i microcircuiti vengono attivati e sottratti alla dipendenza del circuito primario, con conseguenti depolarizzazioni autonome, perdita del sincronismo, contrazione di tipo vermicolare, maggior consumo di molecole di adenosintrifosfato.

Qualora questo fenomeno fosse di breve durata (un tempo inferiore al ciclo cardiaco), e i valori della intensità non fossero elevati (< 70 mA), è possibile che possa verificarsi solo l'azzeramento dei potenziali elettrici, lasciando la facoltà alle cellule del circuito primario di riprendere la sua normale funzione come in una defibrillazione.

Proprio questo risultato viene raggiunto impiegando il defibrillatore, un'apparecchiatura medicale che applica un impulso elettrico al torace dell'infortunato tramite due elettrodi. I fattori che possono rendere probabile l'innesco della fibrillazione ventricolare sono diversi, tra questi sicuramente c'è l'intensità della corrente che attraversa il corpo nell'unità di tempo, di cui una piccola parte passa attraverso il cuore e causa la fibrillazione. Questo valore è molto difficile da determinare in modo certo, nonostante i numerosi studi che sono stati realizzati per valutare il minimo valore di corrente che può dare inizio a questo fenomeno, l'impossibilità di realizzare esperimenti diretti con l'uomo rendono molto difficoltosa una raccolta di dati sufficientemente attendibili.

3.1.4 Ustioni

Sono prodotte dal calore sviluppato dal passaggio di corrente nel corpo umano. La pelle è il tessuto più esposto a questo fenomeno poiché ha un'elevata resistenza elettrica; il passaggio di corrente elettrica su una resistenza è accompagnato da sviluppo di calore per effetto Joule; il corpo umano non fa eccezione a questa regola generale; le ustioni peggiori si hanno sulla pelle, perché questa presenta una resistività maggiore rispetto agli altri tessuti; inoltre la densità di corrente è maggiore in corrispondenza dei punti di entrata e di uscita della corrente.

3.2 *Corrente elettrica e passaggio nel corpo umano: CEI 64-18*

Per uno dato percorso attraverso il corpo umano, il pericolo per le persone dipende principalmente dalla intensità e dalla durata del passaggio di corrente. Tuttavia, le zone tempo/corrente specificate che seguono, in molti casi, non sono direttamente applicabili ai fini pratici della designazione di misure di protezione contro la scossa elettrica. Il criterio necessario è dato dal limite ammesso per la tensione di contatto (cioè il prodotto della corrente che circola nel corpo, per l'impedenza del corpo stesso) in funzione del tempo.

La relazione fra la corrente e la tensione non è lineare, in quanto l'impedenza del corpo umano varia in funzione della tensione di contatto e sono, di conseguenza, necessarie informazioni in tal senso. Le diverse parti del corpo umano (come la pelle, il sangue, i muscoli, gli altri tessuti e le articolazioni) presentano una certa impedenza alla corrente elettrica con componenti resistive e capacitive.

I valori dell'impedenza del corpo dipendono da una serie di fattori ed in particolare, dal percorso della corrente, dalla tensione di contatto, dalla durata del passaggio della corrente, dalla sua frequenza, dal livello di umidità della pelle, dall'area della superficie di contatto, dalla pressione esercitata e dalla temperatura.

La CEI 64-18 riporta valori di impedenza del corpo umano che sono il risultato di un accurato esame dei dati sperimentali ottenuti da misure effettuate principalmente su cadaveri e su alcune persone viventi.

La conoscenza degli effetti della corrente alternata si basa principalmente su constatazioni connesse con gli effetti della corrente a frequenze di 50 Hz o 60 Hz, che sono le più comuni negli impianti elettrici. I valori indicati, tuttavia, sono considerati applicabili sul campo di frequenze che va da 15 Hz a 100 Hz, i valori di soglia ai limiti di questo campo di valori sono superiori a quelli per una frequenza a 50 Hz o 60 Hz. Principalmente il rischio di fibrillazione ventricolare è considerato la principale causa di morte per folgorazione.

Benché gli infortuni con la corrente continua siano molto meno frequenti di quello che ci si aspetterebbe dal numero di applicazioni in corrente continua, gli infortuni elettrici mortali si verificano solo in condizioni molto sfavorevoli, per esempio nelle miniere. Questo è parzialmente dovuto al fatto che con la corrente continua, il rilascio delle parti in tensione è meno difficile e che, in presenza di durate di scossa elettrica più lunghe rispetto al periodo del ciclo cardiaco, la soglia di fibrillazione ventricolare è considerevolmente superiore rispetto a quella per la corrente alternata.

3.2.1 Definizioni di carattere generale

Ai fini del documento si esplicano alcuni termini e definizioni:

- **corrente longitudinale**
  corrente che fluisce, nel senso della lunghezza, attraverso il tronco del corpo umano, ad esempio da una mano verso i piedi
- **corrente trasversale**
  corrente che fluisce nel senso trasversale attraverso il tronco del corpo umano, ad esempio tra le mani
- **impedenza interna del corpo umano Zi**
  impedenza tra due elettrodi in contatto con due parti del corpo umano, trascurando le impedenze della pelle
- **impedenza della pelle Zs**
  impedenza tra un elettrodo applicato sulla pelle ed i tessuti conduttivi sottostanti
- **impedenza totale del corpo umano ZT**
  somma vettoriale dell'impedenza interna e delle impedenze della pelle (si veda la Figura 3-1)
- **resistenza iniziale del corpo umano R0**
  resistenza che limita il valore di picco della corrente al momento in cui si stabilisce la tensione di contatto
- **condizione di asciutto**
  condizione della pelle e superficie di contatto, per quanto riguarda l'umidità, di una persona in condizioni di riposo in un ambiente al chiuso ordinario
- **condizione di bagnato con acqua**
  condizione della pelle e superficie di contatto esposta per la durata di 1 min, all'acqua della rete idrica pubblica (resistività media ρ = 3 500 Ωcm, pH = da 7 a 9)
- **soglia di percezione**
  valore minimo della corrente che provoca una qualsiasi sensazione alla persona attraverso cui fluisce
- **soglia di reazione**
  valore minimo della corrente che provoca una contrazione muscolare involontaria
- **soglia di rilascio**
  valore massimo della corrente per la quale una persona può rilasciare gli elettrodi che sta impugnando
- **soglia di fibrillazione ventricolare**
  valore minimo della corrente attraverso il corpo che provoca la fibrillazione ventricolare
- **fattore di percorso *F***
  rapporto tra l'intensità del campo elettrico (densità di corrente) presente nel cuore, per un dato percorso di corrente, e l'intensità del campo elettrico (densità di corrente) nel cuore, per una corrente di intensità uguale, che circola tra mano sinistra e piedi

NOTA Nel cuore, la densità di corrente è proporzionale all'intensità del campo elettrico.

- **resistenza totale del corpo RT**
  somma della resistenza interna del corpo umano e della resistenza della pelle
- **corrente ascendente**
  corrente continua attraverso il corpo umano per la quale i piedi rappresentano il polo positivo
- **corrente discendente**
  corrente continua attraverso il corpo umano per la quale i piedi rappresentano il polo negativo

3.2.2 Impedenza elettrica del corpo umano

I valori dell'impedenza del corpo dipendono da un certo numero di fattori, in particolare, dal percorso della corrente, dalla tensione di contatto, dalla durata della corrente, dalla frequenza, dall'umidità della pelle, dall'area della superficie di contatto, dalla pressione esercitata e dalla temperatura.

Nella Figura 3-1 è mostrato uno schema dell'impedenza del corpo umano.

3.2.2.1 Impedenza interna del corpo umano (Zi)

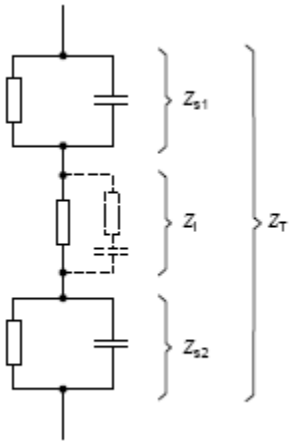
L'impedenza interna del corpo umano può essere considerata sostanzialmente resistiva. Il suo valore dipende principalmente dal percorso della corrente e, in misura minore, dall'area della superficie di contatto.

Le misure indicano che esiste una piccola componente capacitiva (linee tratteggiate nella Figura 3-1).

La Figura 3-2 mostra l'impedenza interna del corpo umano per diversi percorsi della corrente, espressa come percentuali del valore dell'impedenza per il percorso mano-piede.

Per i percorsi di corrente da una mano all'altra o da una mano verso i piedi, le impedenze sono principalmente localizzate negli arti (braccia e gambe). Se l'impedenza del tronco del corpo viene trascurata, lo schema semplificato può essere rappresentato come in Figura 3-3.

Al fine di semplificare lo schema del circuito, si ipotizza che l'impedenza delle braccia e delle gambe abbia lo stesso valore.



Legenda
*Z*i impedenza interna
*Z*s1, *Z*s2 impedenza della pelle
*Z*T impedenza totale

Figura 3-1: rappresentazione dell'impedenza interna del corpo umano

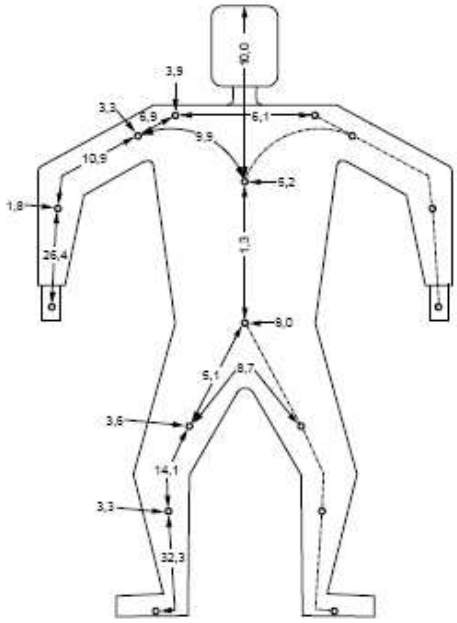


Figura 3-2: percentuale d’impedenza interna

I numeri indicano la percentuale d’impedenza interna del corpo umano per la parte del corpo considerata, rispetto al percorso mano - piede.

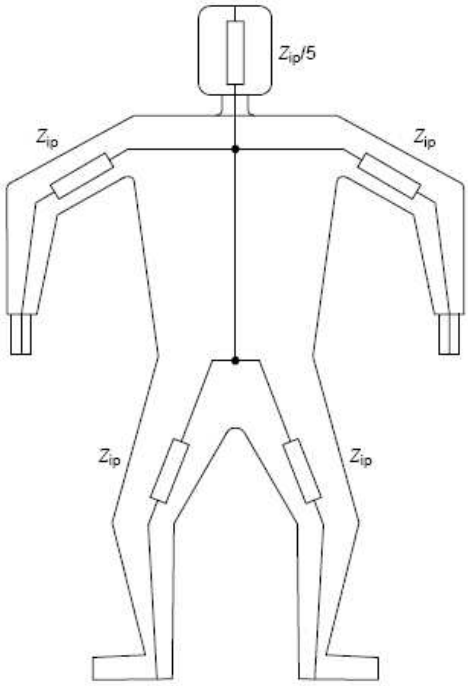


Figura 3-3: Schema semplificato delle impedenze interne del corpo umano

In Figura 3-3 vengono esemplificate le impedenze del corpo umano con Zip impedenza parziale interna di una estremità (braccio o gamba). Fatta uguale a 100 l’impedenza interna mano-mano o mano-piede:

- l'impedenza tra una mano ed entrambi i piedi è approssimativamente uguale al 75 %,
- l'impedenza tra entrambe le mani ed entrambi i piedi è il 50 %
- l'impedenza da entrambe le mani verso il tronco del corpo è il 25 %

3.2.2.2 Impedenza della pelle (Zs)

L’impedenza della pelle può essere considerata come una rete di resistenze e di capacità. La sua struttura è costituita da uno strato semi-isolante e da piccoli elementi conduttivi (pori).

L’impedenza della pelle diminuisce rapidamente con l’aumento della corrente. Il valore dell’impedenza della pelle dipende dalla tensione, dalla frequenza, dalla durata della corrente, dall’area della superficie di contatto, dalla pressione del contatto, dal grado di umidità della pelle e dalla sua temperatura e tipo.

Per tensioni di contatto piccole, il valore dell’impedenza della pelle varia notevolmente, anche nella stessa persona, con la superficie di contatto e con le sue condizioni (asciutta, bagnata, sudorazione), la temperatura, la rapidità della respirazione, ecc. Per tensioni di contatto elevate, l’impedenza della pelle diminuisce considerevolmente e diventa trascurabile quando la pelle viene perforata.

L’impedenza della pelle diminuisce all’aumentare della frequenza.

3.2.2.3 Impedenza totale del corpo umano (ZT)

L’impedenza totale del corpo è costituita da componenti resistive e capacitive.

Per tensioni di contatto piccole, si hanno variazioni considerevoli nell'impedenza della pelle, ZS e l'impedenza totale del corpo umano ZT varia anch’essa in modo considerevole. Per tensioni di contatto elevate, l'impedenza totale dipende sempre meno dall'impedenza della pelle ed il suo valore si avvicina a quella dell'impedenza interna Zi.

Tenendo conto di come varia l'impedenza della pelle con la frequenza, l’impedenza totale del corpo umano diminuisce al crescere della frequenza ed è superiore nel caso di corrente continua.

3.2.2.4 Fattori che influenzano la resistenza iniziale del corpo umano (R0)

Nel momento in cui si applica una tensione di contatto, le capacità del corpo umano non sono cariche. Di conseguenza, le impedenze della pelle ZS1 e ZS2 sono trascurabili e la resistenza iniziale R0 è approssimativamente uguale all'impedenza interna del corpo umano Zi (si veda la Figura 3-1). La resistenza iniziale R0 dipende principalmente dal percorso della corrente e, in modo minore, dall’area della superficie di contatto.

La resistenza iniziale R0 limita i picchi di corrente degli impulsi brevi (ad esempio le scosse elettriche provocate dai recinti elettrici).

3.2.3 Effetti della corrente continua

Il termine "corrente continua" indica una corrente continua priva di ondulazione. Tuttavia, dal punto di vista degli effetti della fibrillazione, i dati riportati in questo articolo sono considerati prudenziali per le correnti continue con contenuto ondulatorio sinusoidale non superiore al valore efficace del 10 %.

Un esempio di corrente e dei suoi effetti è mostrato nella Figura 3-4.

La prova è stata fatta con una tensione UT = 200 V in corrente continua, durata della corrente 20 ms, corrente IT = 119 mA, valore di picco per la corrente ITP = 301 mA, resistenza totale del corpo RT = 1 681 Ohm, resistenza iniziale del corpo R0 = 664 Ohm, forte sensazione di bruciore e contrazioni muscolari involontarie delle braccia e delle spalle.

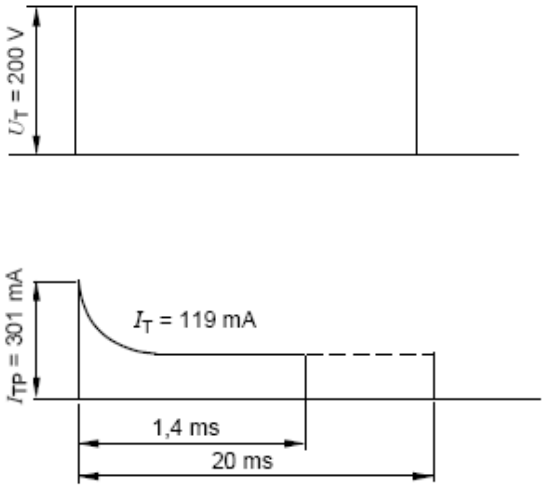


Figura 3-4: Oscillogramma della tensione di contatto UT e della corrente IT in corrente continua, percorso di corrente da mano a mano, superficie di contatto estesa, in condizioni asciutte

3.2.4 Soglia di percezione e soglia di reazione

La soglia di rilascio si definisce il valore minimo della corrente che provoca una qualsiasi sensazione alla persona attraverso cui fluisce.

La soglia di reazione si definisce il valore minimo della corrente che provoca una contrazione muscolare involontaria.

Queste soglie dipendono da diversi parametri, quali la superficie di contatto, le condizioni del contatto (asciutto, bagnato, pressione, temperatura), la durata della corrente e le caratteristiche fisiologiche dell'individuo. A differenza della corrente alternata, sono sentiti solo lo stabilirsi e l'interruzione della corrente e nessun’altra sensazione viene notata durante la circolazione della corrente a livello della soglia di percezione. In condizioni paragonabili a quelle applicate negli studi con corrente alternata, la soglia di reazione è intorno a 2 mA.

3.2.5 Soglia di rilascio

La soglia di rilascio si definisce come valore massimo della corrente per la quale una persona può rilasciare gli elettrodi che sta impugnando.

A differenza della corrente alternata non esiste una soglia definibile di rilascio per la corrente continua. Solo il passaggio e l'interruzione della corrente danno contrazioni di dolore simili a crampi muscolari.

3.2.6 Soglia di fibrillazione ventricolare

La soglia di fibrillazione ventricolare si definisce come valore minimo della corrente attraverso il corpo che provoca la fibrillazione ventricolare.

La soglia di fibrillazione ventricolare indotta dalla corrente continua dipende da parametri sia fisiologici sia elettrici.

Le informazioni ricavate da infortuni di natura elettrica sembrano indicare un pericolo di fibrillazione ventricolare nel caso di correnti longitudinali. Per le correnti trasversali, gli esperimenti su animali hanno tuttavia dimostrato che per intensità di correnti più elevate si può verificare anche la fibrillazione ventricolare.

Gli esperimenti effettuati su animali, come pure le informazioni raccolte sugli infortuni di natura elettrica, mostrano che la soglia di fibrillazione per una corrente discendente è circa il doppio rispetto ad una corrente ascendente.

Per durate delle corrente superiori ad un ciclo cardiaco, la soglia di fibrillazione per la corrente continua è diverse volte superiore a quella per la corrente alternata. Per durate inferiori a 200 ms, la soglia per la fibrillazione è all'incirca la stessa della corrente alternata, misurata in valore efficace.

Le curve ricavate da esperimenti effettuati su animali sono state tracciate applicando una corrente longitudinale e ascendente (polarità positiva nei piedi). Le curve c2 e c3 della Figura 3-5 mostrano i valori calcolati d'intensità e durata di corrente in corrispondenza dei quali le probabilità di fibrillazione ventricolare sono, rispettivamente, all'incirca il 5 % ed il 50 %, quando il percorso della corrente è longitudinale attraverso il corpo (vale a dire zampa anteriore - entrambe le zampe posteriori). La curva c1 individua i valori intensità e durata di corrente al di sotto delle quali la probabilità di fibrillazione ventricolare è ritenuta molto bassa per lo stesso percorso longitudinale di corrente attraverso il corpo, sulla base di studi effettuati su animali.

Studi recenti mostrano che la soglia di fibrillazione ventricolare nel caso degli esseri umani è superiore rispetto a quella degli animali, per ogni durata. Per esempio la soglia di corrente per il percorso mano sinistra - piedi, nel caso di un individuo in buona salute, può essere dell'ordine di 200 mA per durate prolungate del passaggio di corrente.

Tuttavia, non tutti i cuori umani sono in salute, e alcune infermità possono influenzare la soglia di fibrillazione ventricolare. Alcune persone in condizioni cardiache non buone hanno soglie di fibrillazione ventricolare inferiori al normale, ma l'entità di tale riduzione non è nota con precisione. Di conseguenza si raccomanda che la linea c1 mostrata nella figura, che si basa su studi effettuati su animali, debba essere utilizzata per descrivere la soglia di fibrillazione ventricolare degli esseri umani come una stima prudenziale. Non si conoscono infortuni mortali per valori al di sotto della curva c1. Questo indica che la curva c1 probabilmente è prudente, se riferita a tutti gli esseri umani. Nel caso di una corrente longitudinale discendente (polo negativo nei piedi), le curve devono essere traslate verso un'intensità di corrente superiore di un fattore circa 2.

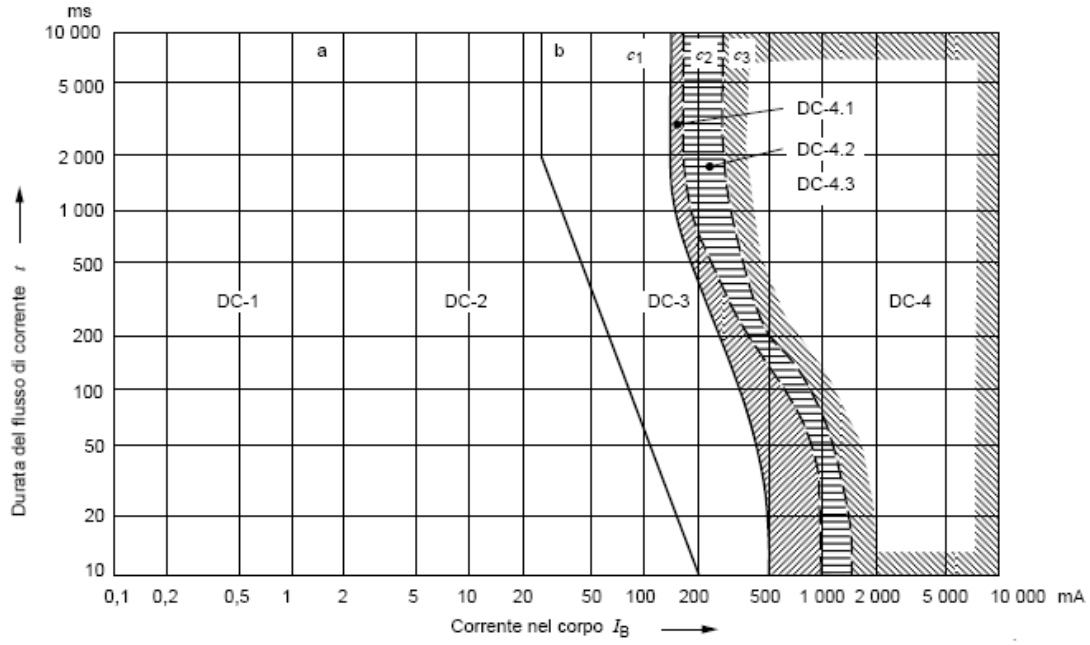


Figura 3-5: Zone tempo/corrente convenzionali degli effetti delle correnti continue su persone, per un percorso di corrente longitudinale ascendente

Zone	Confini	Effetti fisiologici
DC-1	Sino a 2 mA curva a	È possibile una leggera sensazione di punzecchiature nei momenti in cui la corrente si stabilisce e si interrompe o varia rapidamente
DC-2	2 mA Sino a curva b	Probabili contrazioni muscolari involontarie, specialmentecontatto nei momenti in cui la corrente si stabilisce, si interrompe o varia rapidamente, ma normalmente non si rilevano effetti fisiologici dannosi dovuti alla corrente elettrica
DC-3	Curva b ed oltre	Si possono verificare forti contrazioni muscolari involontarie e disturbi reversibili di generazione e conduzione di impulsi nel cuore, che aumentano con l'intensità della corrente e la durata. Normalmente non sono previsti danni organici
DC-4 1)	Al di sopra della curva c_1	Possono verificarsi effetti pato-fisiologici, come l'arresto cardiaco, il blocco respiratorio ed ustioni o altri danni cellulari. La probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta con l'intensità e la durata della corrente
	c_1-c_2	DC-4.1 La probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta sino a circa il 5 %
	c_2-c_3	DC-4.2 La probabilità di fibrillazione ventricolare aumenta sino a circa il 50 %
	Al di sopra della curva c_3	DC-4.3 La probabilità di fibrillazione ventricolare supera il 50 %
(1) Per durate di corrente inferiori a 200 ms, la fibrillazione ventricolare si innesca solamente all'interno del periodo vulnerabile quando vengono superate le corrispondenti soglie. Per quanto riguarda la fibrillazione ventricolare, questa figura si riferisce agli effetti della corrente nel percorso mano sinistra i piedi e per una corrente ascendente. Per altri percorsi di corrente, deve essere tenuto in considerazione il fattore di percorso		

Figura 3-6: Zone tempo/corrente per una corrente continua in un percorso mano sinistra piedi – Vedasi Figura 3-5

3.2.7 Altri effetti della corrente continua

Per una corrente superiore a circa 100 mA, può rilevarsi una sensazione di tepore alle estremità durante la circolazione della corrente. All'interno dell'area di contatto si rilevano sensazioni dolorose nella pelle.

Correnti trasversali sino a 300 mA per diversi minuti possono, provocare aritmie reversibili, marchi elettrici, ustioni, capogiri e a volte stati d'incoscienza. Per correnti d'intensità superiore a 300 mA, si verifica spesso la perdita di conoscenza.

Correnti di alcuni ampere, peri durate di parecchi secondi, possono provocare ustioni profonde, altre lesioni o anche la morte.

Effetti quali l'elettroporazione possono essere prodotti dalla corrente sia alternata sia continua.

Si raccomanda di prendere in considerazione anche lesioni di natura non elettrica, come quelle di natura traumatica.

3.2.8 Valore della resistenza del corpo umano con corrente continua

Nel caso della corrente continua, la resistenza totale del corpo RT per tensioni di contatto sino a circa 200 V, è superiore all'impedenza totale del corpo ZT alla corrente alternata, poiché viene meno l'influenza della capacità della pelle. Le misure dell'impedenza totale del corpo effettuate con corrente continua su aree della superficie di contatto ampie, in condizioni di asciutto, sono descritte nella CEI 64-18.

Non sono state effettuate misure in condizioni di bagnato con acqua e bagnato con soluzione salina.

I valori per la resistenza totale del corpo RT, nel caso della corrente continua, sono riportati nella Figura 3-7 (si veda la Figura 3-8, linee continue).

Nel caso di superfici di contatto estese, in condizioni di bagnato con acqua e bagnato con soluzione salina, la resistenza totale del corpo RT può essere determinata con una precisione sufficiente dalle tabelle della corrente alternata della CEI 64-18.

Tensione di contatto V	Valori della resistenza totale del corpo R_T (Ω) che non possono essere superati dal		
	5 % della popolazione	50 % della popolazione	95 % della popolazione
25	2 100	3 875	7 275
50	1 600	2 900	5 325
75	1 275	2 275	4 100
100	1 100	1 900	3 350
125	975	1 675	2 875
150	875	1 475	2 475
175	825	1 350	2 225
200	800	1 275	2 050
225	775	1 225	1 900
400	700	950	1 275
500	625	850	1 150
700	575	775	1 050
1 000	575	775	1 050
Valore asintotico	575	775	1 050

NOTA 1 Alcune misure indicano che la resistenza totale del corpo R_T in un percorso mano-piede è leggermente inferiore a quella del percorso di corrente mano-mano (dal 10 % al 30 %).

NOTA 2 Nel caso di persone viventi, i valori di R_T corrispondono ad una durata della corrente di circa 0,1 s. Per durate superiori, i valori di R_T possono diminuire (di circa il 10 % ÷ 20 %) e, dopo la perforazione della pelle, il valore di R_T si approssima al valore iniziale della resistenza del corpo R_0.

NOTS 3 I valori di R_T sono arrotondati a 25 Ω.

Figura 3-7: resistenze totali del corpo RT per un percorso da mano a mano, in corrente continua, per superfici di contatto estese, in condizioni di asciutto

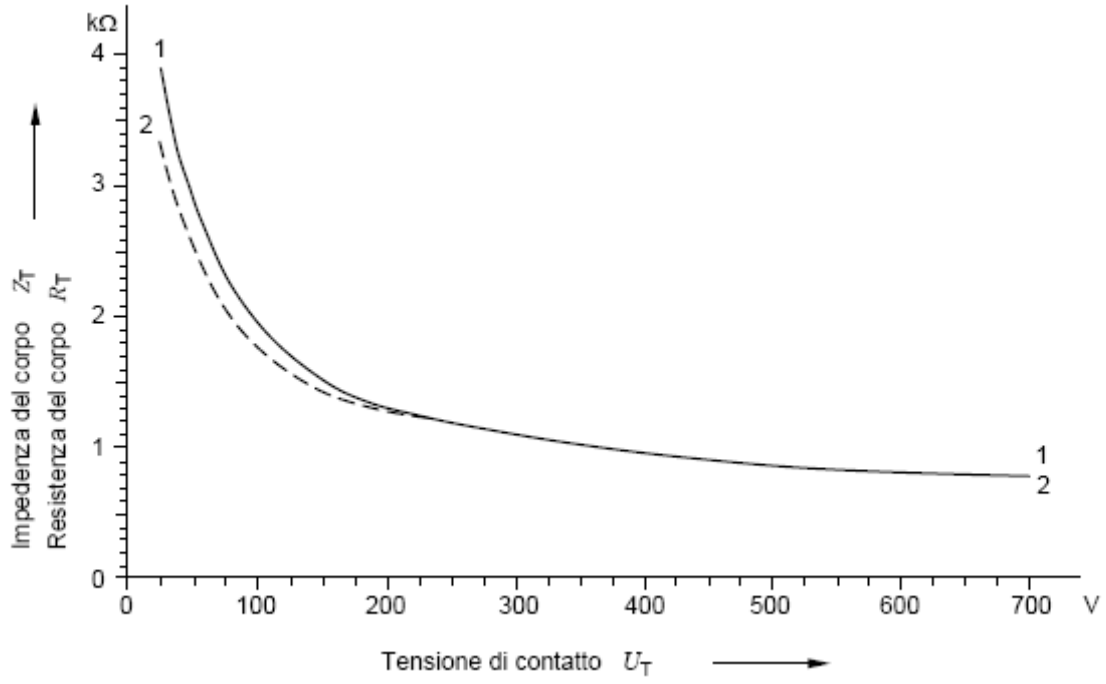


Figura 3-8: Valore statistico delle impedenze totali del corpo ZT (corrente alternata a 50 Hz) e della resistenza del corpo RT(corrente continua) per una percentuale del 50 % di una popolazione di esseri umani viventi, in un percorso di corrente da mano a mano, con aree della superficie di contatto estese, in condizioni di asciutto, per tensioni di contatto sino a 700 V, in corrente alternata a 50/60 Hz (2) e in corrente continua (1)

3.2.9 Valori di resistenza del corpo umano utilizzata per le prove

In base ai dati riportati nella CEI 64-18, si può evincere che:

- l'impedenza del corpo umano nel caso di correnti continue è resistiva;
- l'impedenza del corpo umano dipende per tensioni elevate poco dall'impedenza della pelle e si avvicina sempre più all'impedenza interna;
- la resistenza del corpo umano aumenta con il diminuire della superficie di contatto.

Di conseguenza è possibile simulare l'impedenza del corpo umano attraverso un resistore variabile (reostato) come nel caso in esame.

Facendo un parallelo con la corrente alternata dalle tabelle 1,4 e 7 della CEI 64-18, si può dire che la resistenza del corpo umano in caso di superfici di contatto ridotte è di circa 4 volte superiore a quella nel caso di superfici di contatto estese. Il caso della superficie di contatto ridotta (100 mm2) è quello che si avvicina di più al rischio di contatto con i cavi elettrici sotto tensione dell'impianto fotovoltaico.

Resta ovviamente anche il caso di messa in tensione delle parti metalliche dell'impianto per il quale la superficie risulterebbe estesa o media (10.000 mm2 o 1000 mm2).

Quindi prendendo come dato 575 Ohm della tabella di Figura 3-7 per valori di tensione di 700 V per valori che non possono essere superati dal 5% della popolazione per un percorso da mano a mano, moltiplicata per 4 volte risulta 2.300 Ohm. Per mettersi a favore di sicurezza considerando che potrebbero essere anche possibili dei casi di contatto con superfici estese o medie e che potrebbero verificarsi anche dei percorsi di corrente mano-piedi, le prove sono state effettuate con resistenza di 1.000,1.500 e 2.000 Ohm.

Tali valori potrebbero apparire elevati in alcuni casi, ma si è anche tenuto conto che normalmente gli operatori VVF operano con DPI che parzialmente dovrebbero aumentare la resistenza totale del corpo umano.

In ogni caso prove sotto i 1000 Ohm non sono state effettuate per la limitazione della strumentazione in uso presso l'impianto sperimentale.

Si dovranno effettuare altre prove con altra strumentazione nel caso si volesse approfondire il tema.

4 L’impianto fotovoltaico di Marco di Rovereto

L’impianto fotovoltaico di Rovereto è stato realizzato per essere un impianto fotovoltaico sperimentale sul quale poter eseguire delle prove e delle simulazioni per l’intervento dei Vigili del Fuoco.



Figura 4-1: impianto fotovoltaico sperimentale presso il Centro di Protezione Civile di Marco di Rovereto

L’impianto fotovoltaico di Rovereto è stato concepito da una parte per sperimentare l’utilizzo di schiume coprenti che impediscano la produzione di corrente, dall’altra per sperimentare l’utilizzo di tecnologie in grado di limitare le tensioni sul campo fotovoltaico stesso.



o

Figura 4-2: Particolare dell'impianto che mostra le due tipologie di sgancio dei pannelli fotovoltaici

In particolare si dovranno approfondire i temi più salienti attualmente sul campo:

- interventi di soccorso in presenza di impianti fotovoltaici integri e non interessati da agenti esterni come fiamme, fumo, calore;
- sperimentazione di schiume o altri agenti per l'inibizione di radiazione solare sui pannelli stessi;
- sperimentazione sul campo di sistemi di sgancio dei singoli pannelli in modo tale da rendere tutto l'impianto fuori tensione;
- verifiche delle situazioni più pericolose per i Vigili del Fuoco e i soccorritori.

4.1 *Scheda tecnica impianto*

Per affrontare tutti questi temi è stato progettato e realizzato un impianto fotovoltaico da 5,7 kWp costituito da 30 moduli da 190 W e suddiviso su due stringhe. L'impianto è collegato in rete.

L'impianto è costituito come si vede in Figura 4-3 da:

- 2 stringhe di 15 panelli per una potenza complessiva di 5,7 kWp;
- 2 analizzatori di rete sul lato cc, uno per stringa; gli analizzatori hanno una sensibilità di 0,01 A;
- 2 sistemi di messa fuori tensione SOLTEQ e SOLAREDGE;
- 1 reostato con range di resistenza da 1.000 a 2.000 Ohm;
- quadri elettrici e altre apparecchiature per dare l'impianto a regola dell'arte.

Il sistema SOLAREDGE si basa sull'installazione di cosiddetti POWER BOX che in caso di necessità diminuisce la tensione in uscita da ogni singolo pannello fino a 1 volt (approfondimento nel Capitolo 4.1.1).

Il sistema SOLTEQ si basa sull'installazione di cosiddette scatole di sicurezza BFA che in caso di necessità cortocircuitano direttamente i due cavi collegati alla scatola di giunzione del panello stesso (approfondimento nel Capitolo 4.1.2).

Su ognuna delle due stringhe è collegato in serie un analizzatore di rete che misura tensione e corrente del lato corrente continua dell'impianto fotovoltaico. Questo permette di poter ricavare i dati di tensione in particolare anche quando l'impianto sul lato corrente alternata è spento oppure nella situazione di circuito aperto quando si apre l'interruttore di emergenza sul lato corrente continua.

Questa è la situazione reale nella quale i Vigili del Fuoco saranno chiamati ad operare ed è su questa situazione che sono state fatte la maggior parte delle prove. Si ricorda, infatti, che in ogni procedure d'intervento sia italiana sia internazionale l'apertura dell'interruttore generale dell'impianto elettrico sul lato corrente alternata è la prima operazione da fare. In questo caso si spegne automaticamente l'inverter e quindi siamo nella situazione di circuito aperto.

In ogni prova è stata anche verificata la formazione di correnti pericolose sul corpo umano collegando in serie il reostato imponendo resistenze variabili dai 1000 ai 2000 Ohm, come già spiegato nel Capitolo 3.2.9.

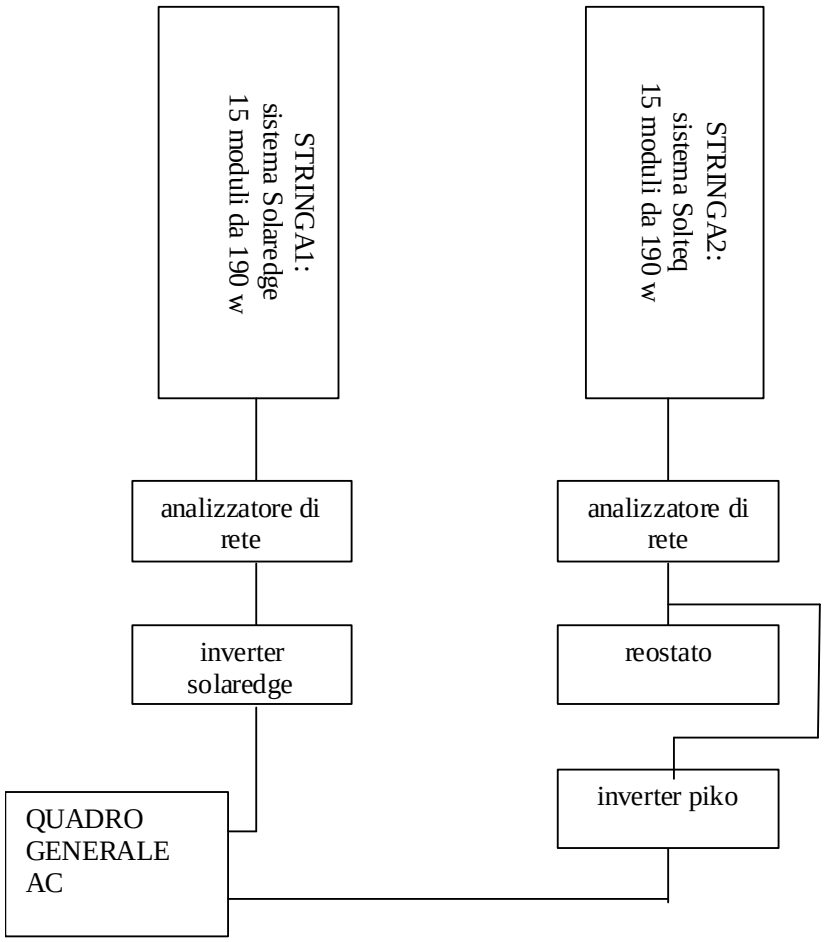


Figura 4-3: schema a blocchi del funzionamento dell'impianto fotovoltaico sperimentale.

4.1.1 Sistema SOLAREDGE

L'architettura SolarEdge è composta da ottimizzatori di potenza(collegati a ciascun modulo), da inverter e da un sistema di monitoraggio che analizza il comportamento di ciascun modulo, come si vede in Figura 4-4.

Quindi è una tecnologia nata per ottimizzare la produzione di corrente elettrica che ha anche delle potenzialità nel campo della sicurezza.



Figura 4-4: architettura del sistema SOLAREDGE

Nei sistemi dotati della soluzione SolarEdge, gli ottimizzatori restano in produzione solo fintanto che ricevono un continuo segnale di «luce verde» dall'inverter. In caso di assenza del segnale, gli ottimizzatori di potenza vanno automaticamente in sicurezza, arrestando (lato continua) sia la corrente che la tensione in ciascun modulo e nella stringa. In modalità sicura (Safety Mode), la tensione di uscita di ogni ottimizzatore è pari a 1V. Per esempio, se in pieno giorno si scollegasse dalla rete elettrica un sistema fotovoltaico dotato dell'architettura SolarEdge e il sistema fotovoltaico fosse costituito da 10 moduli per stringa, la tensione di stringa scenderebbe a soli 10V.

Dato che la lunghezza massima di una stringa in un sistema SolarEdge è di 50 moduli, la tensione in sicurezza ai capi della stringa è limitata al più a 50 V in continua. Anche in caso di malfunzionamenti, la soluzione è stata certificata per mantenere un voltaggio inferiore a 120V, quindi in SELV.

L'arresto a livello di modulo avviene automaticamente:

- quando l'inverter è scollegato dalla rete elettrica;
- quando l'inverter viene spento;
- quando i sensori termici per ogni modulo rilevano un aumento di temperatura (soglia 95˚C).

4.1.2 Sistema SOLTEQ

Il sistema SOLTEQ si basa su un sistema di cortocircuitazione dei singoli pannelli tramite un sistema di comando da remoto. É un sistema che, a differenza del sistema SOLAREDGE, può essere applicato con inverter di qualsiasi marca.

Ogni modulo solare dispone delle proprie scatole BFA. La disattivazione avviene direttamente sul modulo solare. Il modulo solare viene cortocircuitato in maniera sicura e ridondante in modo che non si possa più produrre alcuna tensione.

In pratica le correnti restano all'interno di un circuito posto direttamente sotto il pannello con correnti e tensioni di cortocircuito da dati del pannello fotovoltaico stesso ma in ogni caso sotto le soglie di tensione considerate pericolose dalle norme CEI (60 Volt nel caso di corrente continua per i contatti diretti).



Figura 4-5: posizionamento della strumentazione BFA

I moduli solari vengono cortocircuitati in sicurezza se:

1. viene disattivata l'alimentazione di rete dell'edificio;
2. la condotta di alimentazione del sistema BFA viene separata (ad esempio a causa di un incendio);
3. la condotta di alimentazione del sistema BFA viene cortocircuitata (ad esempio a causa di un incendio);
4. viene premuto un segnalatore manuale(Figura 4-6);
5. viene attivato un segnale di allarme tramite un impianto di segnalazione antincendio di altro allarme (allagamento p.e.);
6. mediante separazione del cavo di dati del sistema dal tetto.



Figura 4-6: sistema di limitazione delle tensioni tramite cortocircuitazione del singolo pannello. Comando a distanza

Il risultato dal punto di vista elettrico generale è quello di Figura 4-7, con quindi tutto il campo fotovoltaico fuori tensione nel suo complesso.

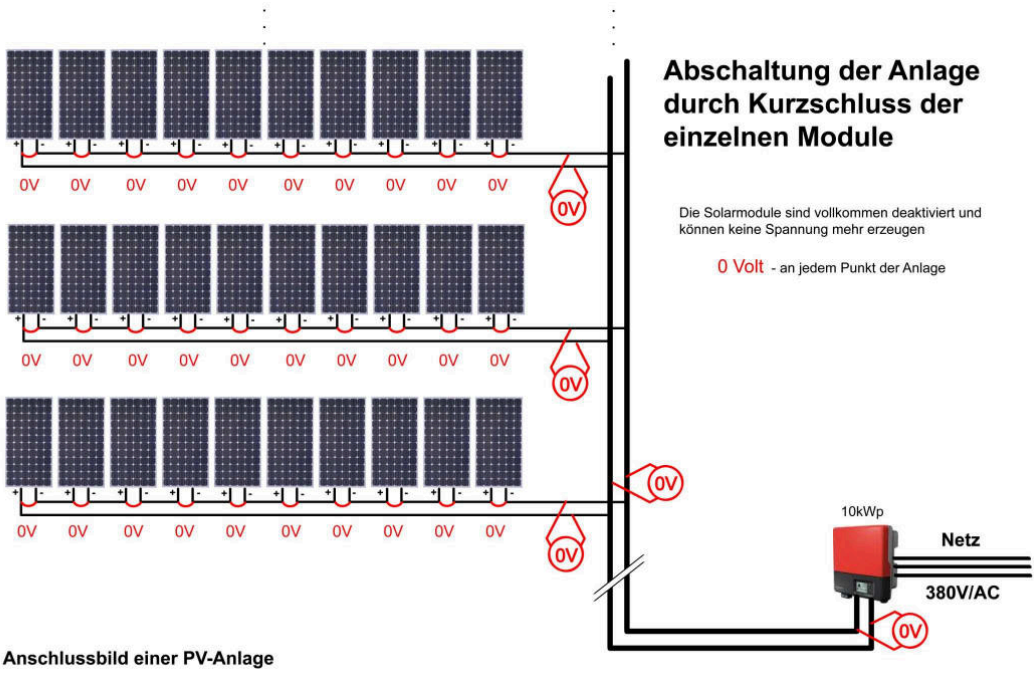


Figura 4-7: funzionamento del sistema SOLTEQ sul complesso dell'impianto

5 Prove sull'impianto fotovoltaico di Marco di Rovereto

Le prove sull'impianto hanno riguardato:

1. prove con impianto in condizioni standard;
2. prove con schiume di tipologia CAFS;
3. prove diurne con copertura dei pannelli con materiali opachi;
4. prove con schiuma per oscurare i pannelli;
5. prove con scarsa illuminazione (nuvoloso);
6. prove notturne;
7. prove di funzionamento dei sistemi SOLAREDGE e SOLTEQ.

Tutte le prove sono state effettuate in due condizioni:

a. a circuito aperto;
b. collegando in serie il reostato.

Non si sono effettuate prove con l'impianto collegato alla rete elettrica poiché le procedure dei Vigili del Fuoco prevedono sempre la messa fuori tensione della corrente elettrica dell'ambiente dove si va ad operare e quindi l'apertura dell'interruttore generale dell'impianto lato c.a.

5.1 *Prove con impianto in condizioni standard*

L'impianto è stato utilizzato anche per prove in condizioni standard, cioè senza nessun tipo di copertura dei pannelli o altro, solo collegando in serie il reostato.

La prova si è svolta il 28-02-2012 con i seguenti dati meteorologici:

- Irraggiamento: 800 W/mq
- Temperatura: circa 15 °C
- Venti: deboli circa 05, m/s

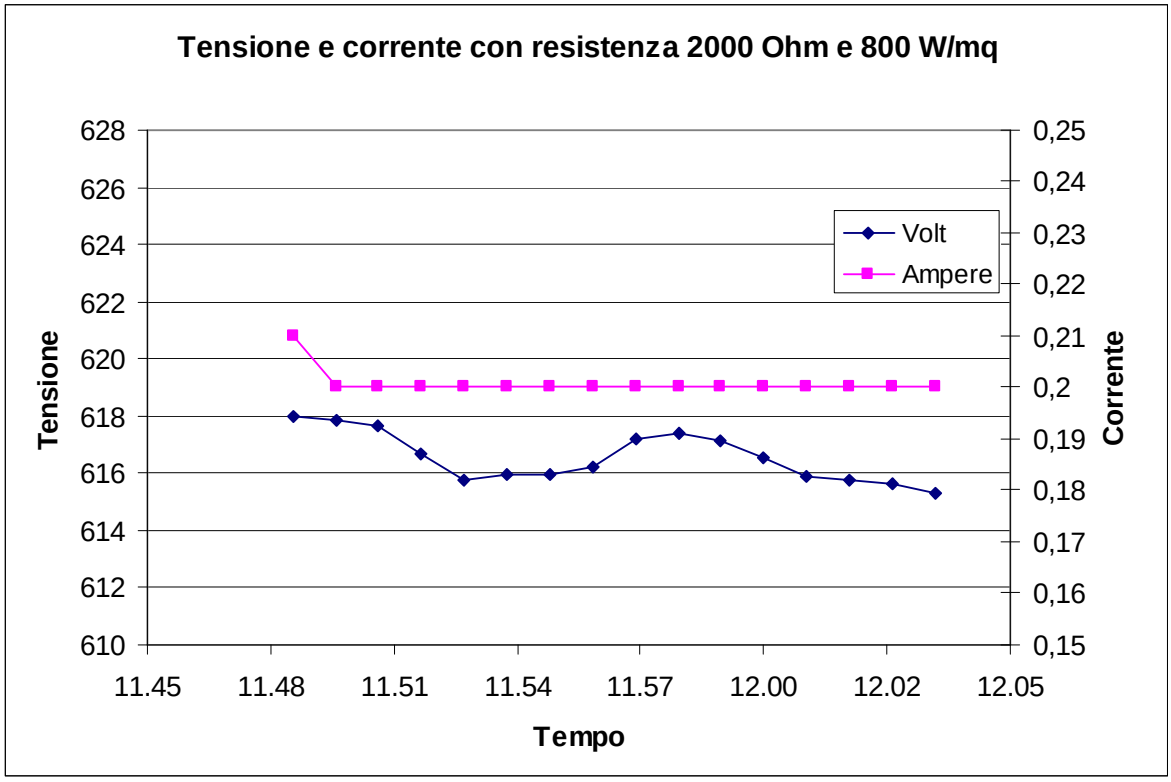


Figura 5-1: prova in condizioni standard con 2000 Ohm di resistenza

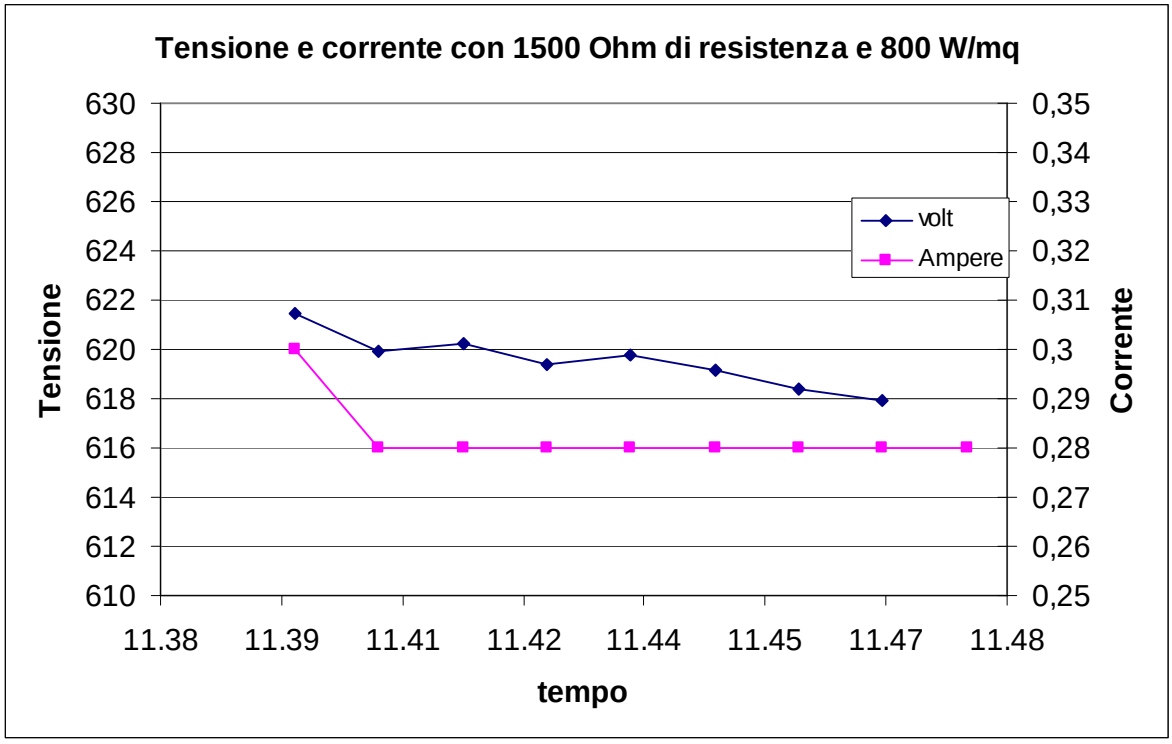


Figura 5-2: prova in condizioni standard con 1500 Ohm di resistenza



Figura 5-3: prova in condizioni standard con 1500 Ohm di resistenza

Come si può notare in Figura 5-1 e Figura 5-2 in una giornata con un buon irraggiamento (si tenga conto che si può arrivare a superare anche i 1000 W/mq in giornate particolarmente limpide), se un operatore dovesse entrare in contatto con la corrente prodotta da un impianto fotovoltaico, potrebbe avere delle correnti che rientrano nel campo della pericolosità per contrazioni muscolari e per fibrillazione ventricolare con rischio d'infarto.

5.2 *Prove con schiuma in uso per incendi di Classe A (CAFS)*

La prova con il CAFS è stata effettuata in data 06-12-2011 durante una giornata di sole con una radiazione sull'impianto fotovoltaico di circa 580 W/mq.

La prova ha lo scopo di verificare se la schiuma utilizzata al momento su alcuni mezzi dei Vigili del Fuoco (presso il Comando di Trento le APS sono dotate di questo sistema) e che ha un certificato per essere utilizzato su impianti sotto tensione, possa essere anche un valido aiuto in presenza di impianti fotovoltaici.

La schiuma è stata prodotta con un impianto di tipo CAFS (Compressed Air Foam System). Il CAFS è un sistema composto da una pompa per l'acqua, una pompa per lo schiumogeno e un compressore per l'aria. Il vantaggio di questo tipo di produzione di schiuma è che le gocce di schiuma sono mediamente più piccole rispetto agli altri sistemi in uso e hanno una capacità estinguente maggiore per il fatto che la superficie di contatto è maggiore.



Figura 5-4: Prova con CAFS: situazione iniziale



Figura 5-5: prova con CAFS: fase di schiumaggio



Figura 5-6: prova con CAFS: schiumaggio completato



Figura 5-7: prova con CAFS: schiuma in fase di discesa

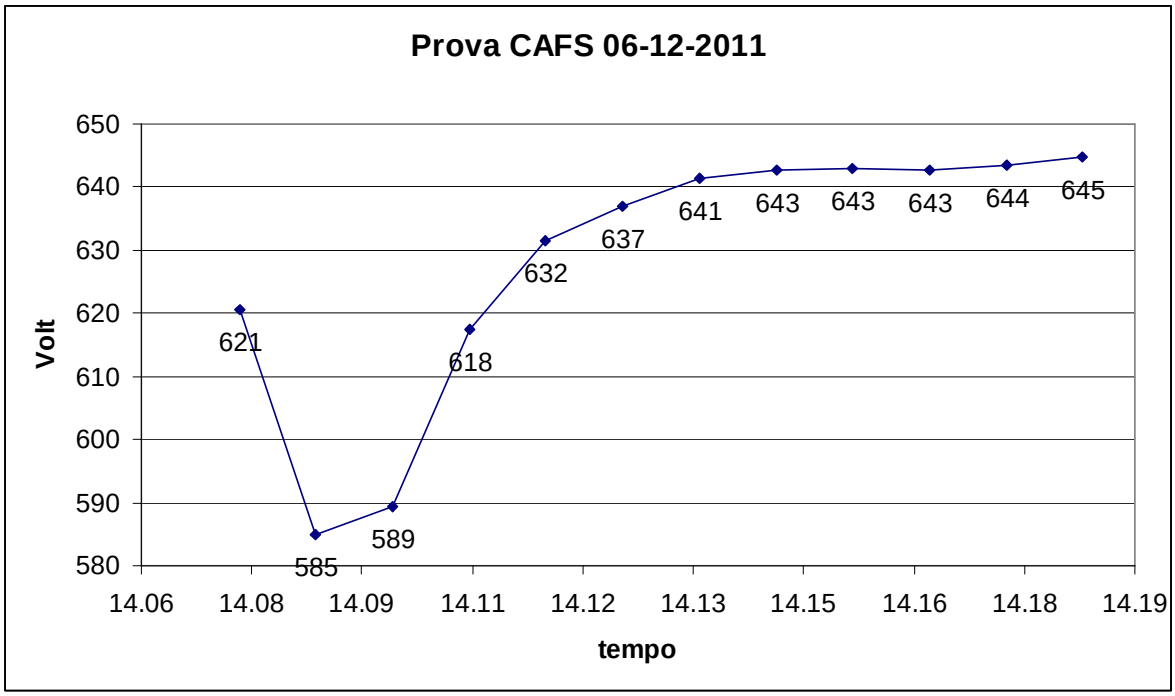


Figura 5-8: grafico con l'andamento delle tensioni

Come si può vedere dal grafico, tenendo conto dell'ombreggiamento iniziale dovuto alla presenza dell'autoscala (anche che se non è possibile vedere questo particolare nella Figura 5-4) che alla fine della prova era stata ritirata dalla zona di ombreggiamento, la schiuma CAFS riduce la tensione iniziale di circa il 5 % per un tempo molto breve.

Infatti nel giro di alcuni minuti la tensione ricomincia a salire poiché la schiuma scivola sulla superficie dei pannelli. Concludendo non si può affermare che

l'utilizzo di tale schiuma possa in alcun modo venire incontro alla esigenze di riduzione delle tensioni dell'impianto fotovoltaico.

5.3 *Prove con cartoni*

É stata anche effettuata una prova con copertura dei pannelli tramite dei cartoni.

Tale procedura appare complessa nella gestione, pericolosa dal punto di vista della combustibilità del materiale usato e in ogni caso con scarsissimi risultati dal punto di vista del calo delle tensioni.

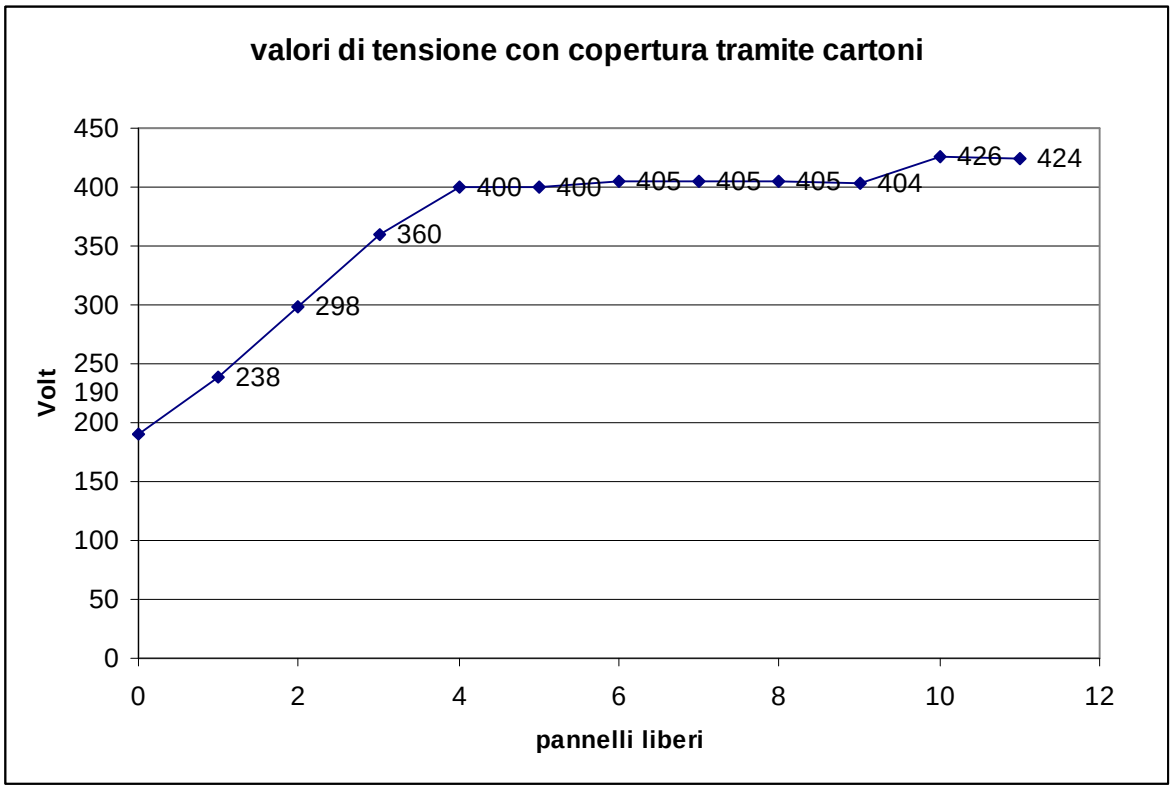


Figura 5-9: grafico con l'andamento delle tensioni



Figura 5-10: Prova con cartoni: inizio posa cartoni



Figura 5-11: prova con cartoni: posati metà cartoni



Figura 5-12: prova con cartoni: postai tutti i cartoni

5.4 *Prove con Prevento Solar*

5.4.1 Prova con giornata di sole

Sul mercato tedesco è in vendita un gel coprente Prevento Solar della ditta Febbex® International GmbH che ha l'obbiettivo (dichiarato dal produttore stesso) di inibire la radiazione luminosa sui pannelli, in modo da che essi non producano più corrente elettrica.

Tale prova è stata effettuata con un solo estintore datoci dal rivenditore italiano di tale prodotto e pertanto si è dovuto riempire l'estintore più volte. In questo modo la prova non ha avuto significato dal punto di vista dei tempi di intervento.

La prova è stata effettuata con una radiazione solare sul piano dei pannelli di circa 560 W/mq e una temperatura esterna di circa 15 °C.

Il risultato finale dal punto di vista elettrico è che non si è arrivati a tensioni considerate non pericolose per l'uomo.

La prova è stata effettuata prima che venisse installato il reostato, pertanto sono state fatte solo prove a circuito aperto.

In ogni caso il valore minimo di 100 Volt raggiunti con la copertura totale dei pannelli e con l'utilizzo di 3 estintori da 10 litri con un operatore impegnato per circa 20 minuti non è un risultato che porta le tensioni sotto i limiti di sicurezza.

In precedenza erano già state eseguite delle prove con lo stesso prodotto su un pannello della ditta SunPower (vedi Capitolo 5.4.4).

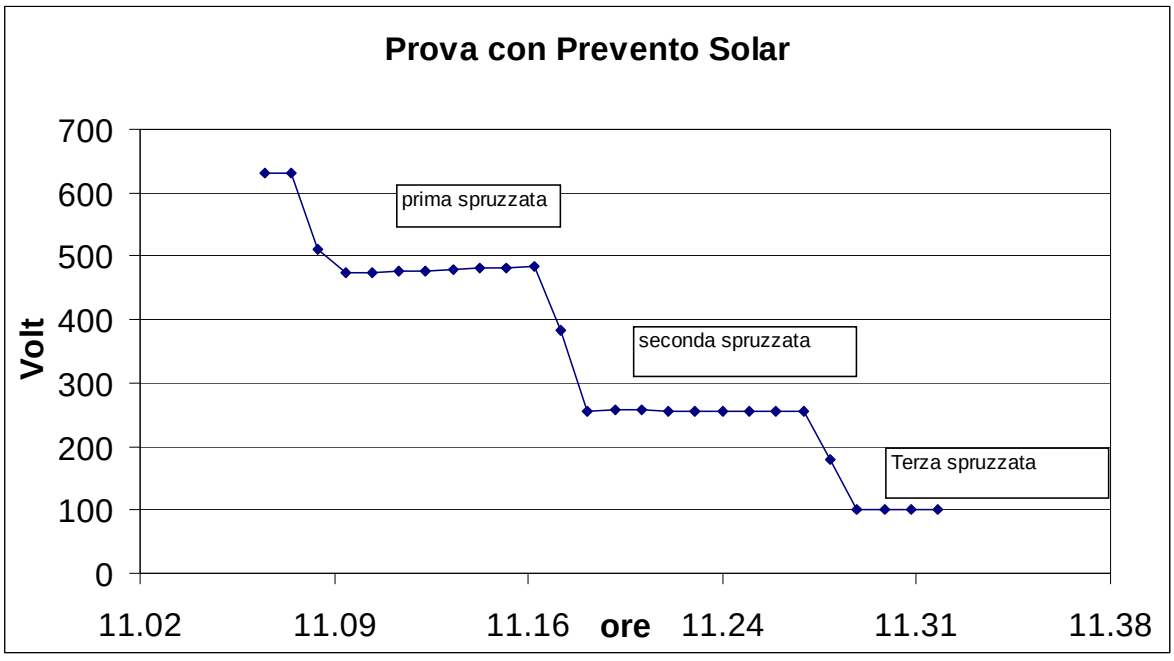


Figura 5-13: prova con PreventoSolar



Figura 5-14: prova con PreventoSolar: inizio primo spruzzata



Figura 5-15: prova con PreventoSolar: fine primo spruzzata, coperti circa 7-8 pannelli



Figura 5-16: prova con PreventoSolar: inizio seconda spruzzata, copertura dei primi7-8 pannelli



Figura 5-17: prova con PreventoSolar: fine seconda spruzzata, copertura dei primi 10-11 pannelli



Figura 5-18: Prova con PreventoSolar: inizio terza spruzzata, copertura di tutti i pannelli



Figura 5-19: prova con Prevento Solar: fine terza spruzzata, copertura di tutti i pannelli

5.4.2 Prova con Prevento Solar con giornata nuvolosa

É stata effettuata una prova con l'utilizzo del prodotto Prevento Solar alla presenza del titolare sig. Gerd Goebel della ditta Febbex, produttrice del gel.

Tale prova è avvenuta il giorno 19 gennaio 2011, durante una giornata uggiosa con una radiazione solare di circa 50-55 W/mq e una temperatura di circa 0 °C.

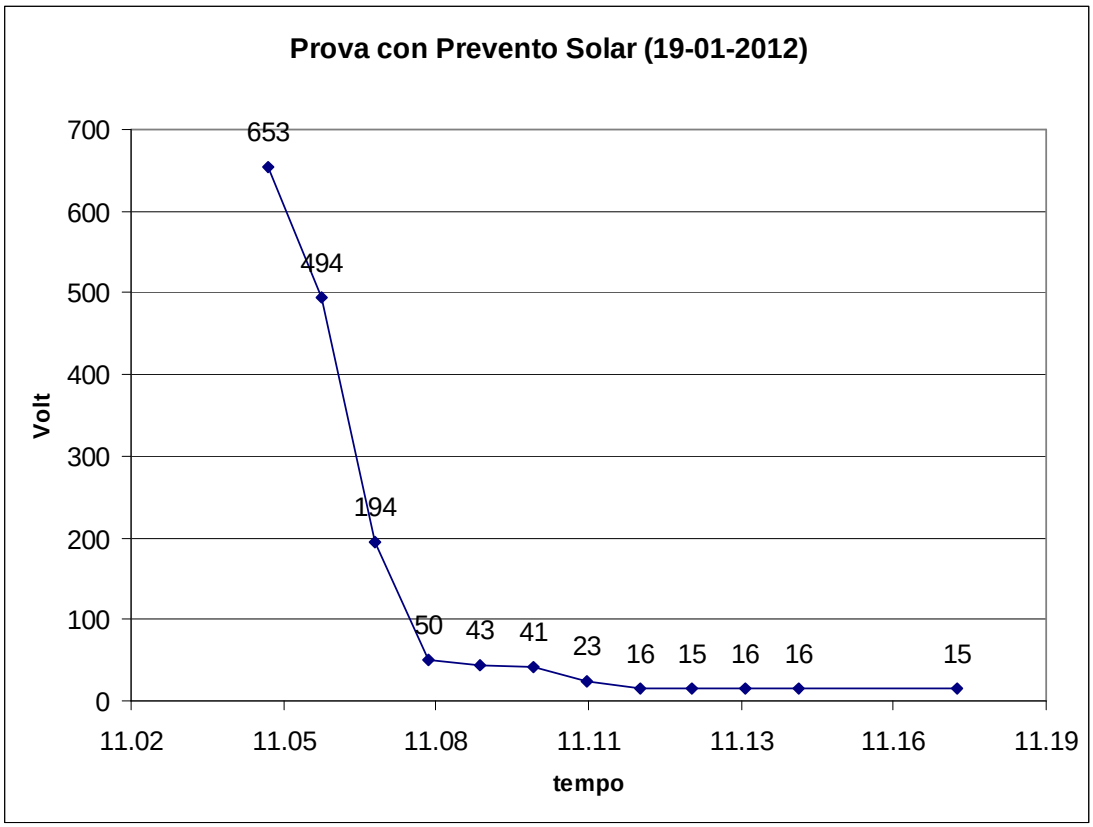


Figura 5-20: prova con PreventoSolar

La prova è stata eseguita direttamente dal sig. Goebel che ha spruzzato il prodotto direttamente sui pannelli.

Si deve aggiungere che il colore del prodotto era diverso da quello della prova del 28 ottobre 2011, anche se le indicazioni della targa sui fusti sono rimaste tali.

Il prodotto è stato spruzzato in due tornate con un tempo complessivo di circa 8 minuti per coprire 15 pannelli in maniera esaustiva.

Si ricorda che, come per la precedente prova, si è utilizzata solo una stringa per la prove.



Figura 5-21: colore del gel Prevento Solar, ora nero nella precedente prova grigio.



Figura 5-22: prova con Prevento Solar: prima spruzzata



Figura 5-23: prova con Prevento Solar: prima spruzzata



Figura 5-24: prova con Prevento Solar: copertura finale dei pannelli



Figura 5-25: prova con Prevento Solar: copertura finale dei pannelli



Figura 5-26: prova con Prevento Solar: copertura finale dei pannelli



Figura 5-27: prova con Prevento Solar: copertura finale dei pannelli

Si conclude che questa prova ha ridotto le tensioni in gioco da circa 640 Volt a 16 Volt. Rispetto alla prova del 28 ottobre 2011 si tenga conto della riduzione di 10 volte della razione solare.

5.4.3 Prove con Prevento Solar con giornata luminosa

In data 28-02-2012 è stata effettuata una terza prova con il gel Prevento Solar per verificare in una giornata soleggiata la resa di tale prodotto.

Le condizioni metrologiche sono state:

- Irraggiamento: 800-850 W/mq
- Temperatura: circa 15 °C
- Venti: deboli circa 0,5 m/s

Le prove hanno dato i risultati che si vedono in Figura 5-28.

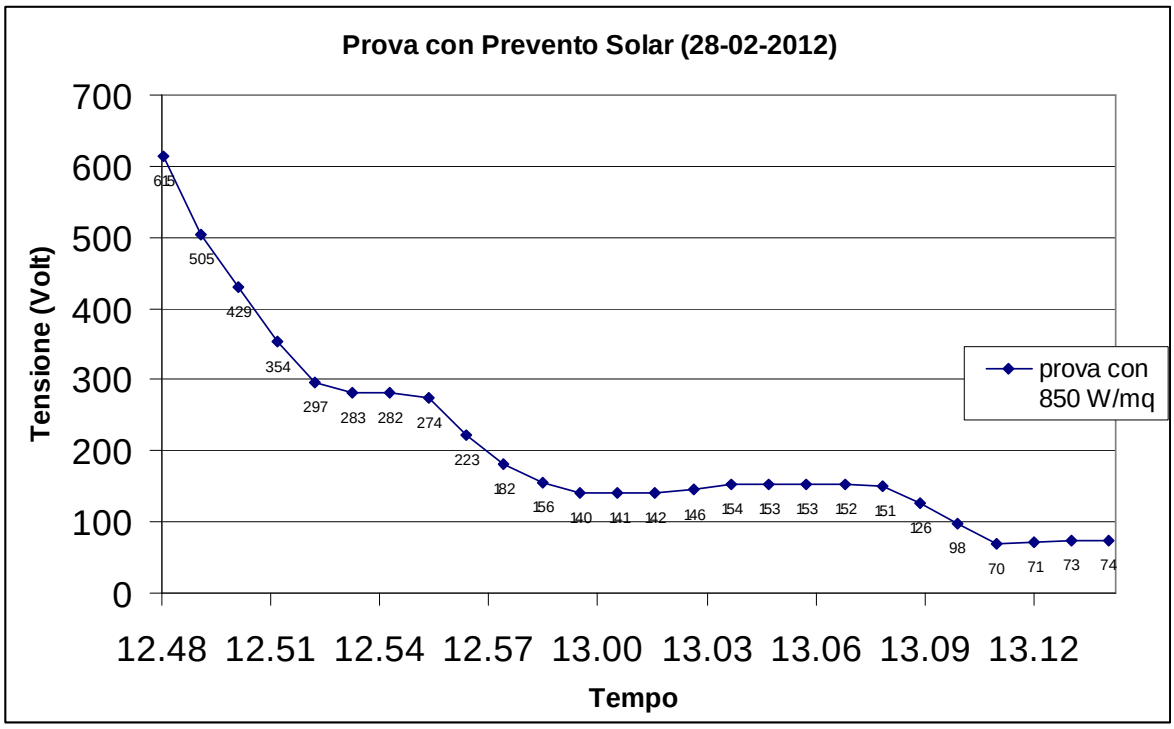


Figura 5-28: prova con Prevento Solar

La prova è stata effettuata in una prima spruzzata abbastanza veloce (12:48 fino alle 13:00), per poi ripassare più attentamente dalle ore 13:09 alle ore 13:14.

La prima spruzzata, che potrebbe simulare una situazione di emergenza nella quale la tempistica è fondamentale, ha prodotto una riduzione consistente (da 615 a 140 Volt) ma non sufficiente per essere fuori dal campo delle tensioni pericolose.

La seconda spruzzata ha prodotto una riduzione fino a circa 70 Volt, fuori dal campo delle tensioni pericolose per contatto indiretto ma non per contatto diretto (60 V).

Per verificare la reale corrente che si potrebbe formare nel corpo umano è stata applicata la resistenza di 1500 Ohm. I risultati sono quelli di Figura 5-29

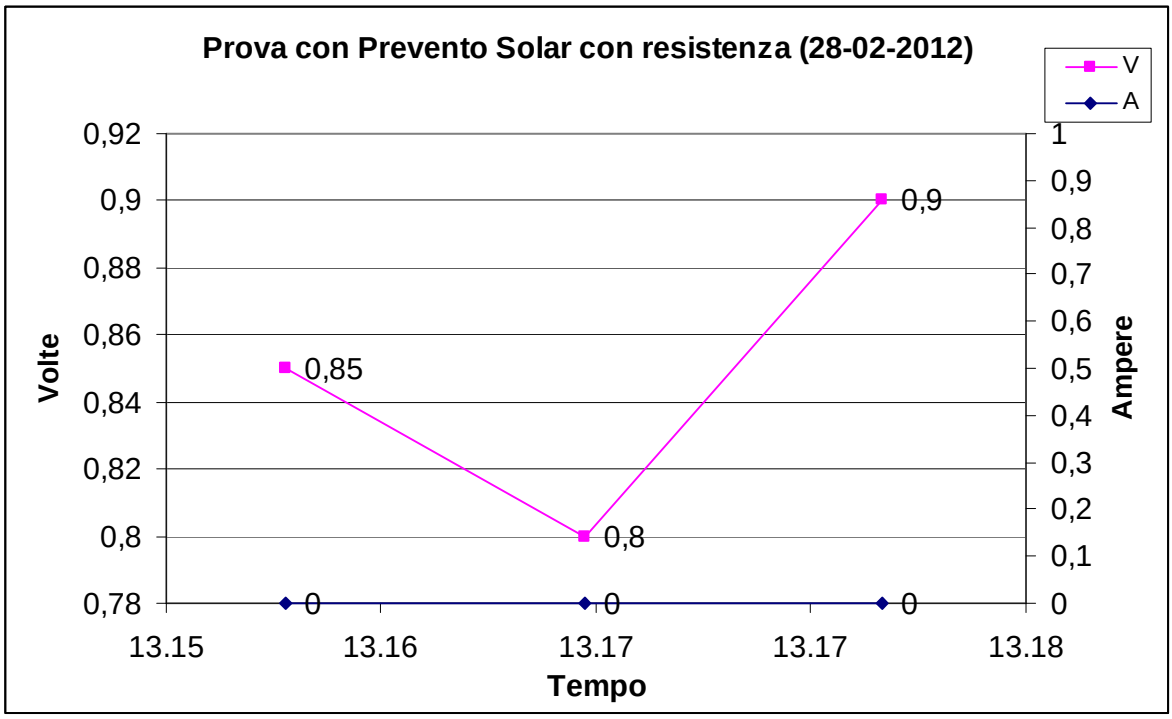


Figura 5-29: prova con Prevento Solar: valori di tensione e corrente con i pannelli coperti

I dati di Figura 5-29 mostrano che nel caso di pannelli completamente coperti con gel Prevento, l'eventuale formazione di corrente all'interno del corpo di una persona che entrasse in contatto diretto con i cavi sotto tensione sarebbe praticamente nulla. Questo ci permette di dire che nonostante le tensioni non siano zero, la probabilità di formazione di una corrente pericolosa nel corpo umano è bassa.



Figura 5-30: inizio prova con gel Prevento Solar



Figura 5-31: prova con gel Prevento Solar: copertura di metà pannelli



Figura 5-32: prova con gel Prevento Solar: copertura di tutti i pannelli

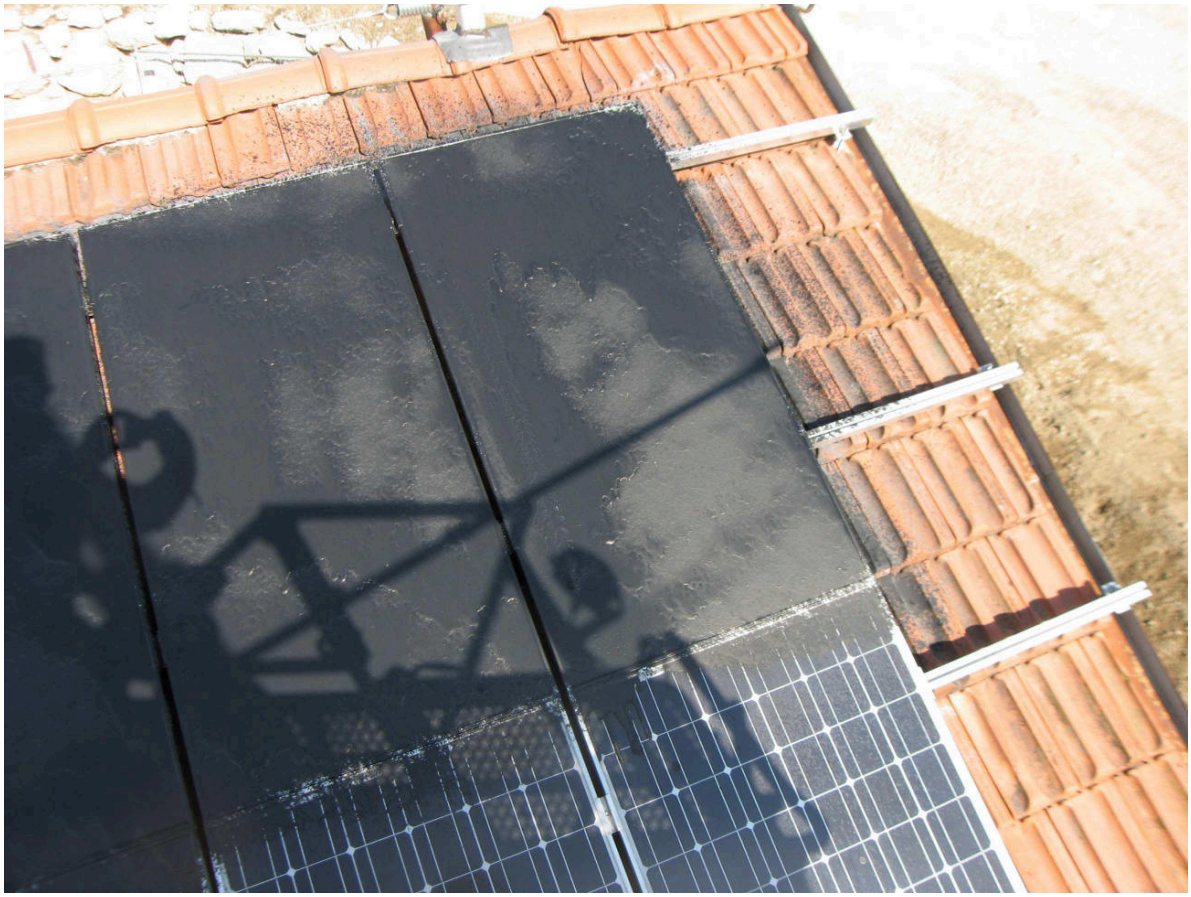


Figura 5-33: prova con gel Prevento Solar: particolare del gel posato sui pannelli

Rispetto alle altre prove dove il gel era stato tolto subito dopo la prova, in questo caso si è lasciato il gel sui pannelli per circa un'ora. Successivamente la procedura di lavaggio dei pannelli è stata prolungata e complicata. Questo fatto mette in mostra che in caso di surriscaldamento o di lavaggio con acqua dei pannelli il gel non cola e resta funzionante. Concluso il lavaggio, i pannelli sono tornati allo stato precedente alla prova.

5.4.4 Prova con Prevento Solar su un pannello Sunpower

In funzione del fatto che era stato acquistato un pannello della ditta Sunpower per fare delle lezioni e prove interne visto che è un pannello che ha la messa a terra del polo positivo e quindi risulta più pericoloso (vedasi 1.1.1 Procedure Corpo Permanente dei Vigili del Fuoco di Trento Caso C) , si è ritenuto di fare alcune prove con tale pannello particolarmente performante dal punto di vista della potenza di picco che delle tensioni (Voc maggiore di 60 V).

La prova è stata effettuata con questi dati:

- Irraggiamento 750 W/mq
- Temperatura 15 °C
- Tensione iniziale 61,4 Volt



Figura 5-34: prova con gel Prevento Solar su pannello Sunpower


Figura 5-35: prova con gel Prevento Solar su pannello Sunpower: pannello coperto

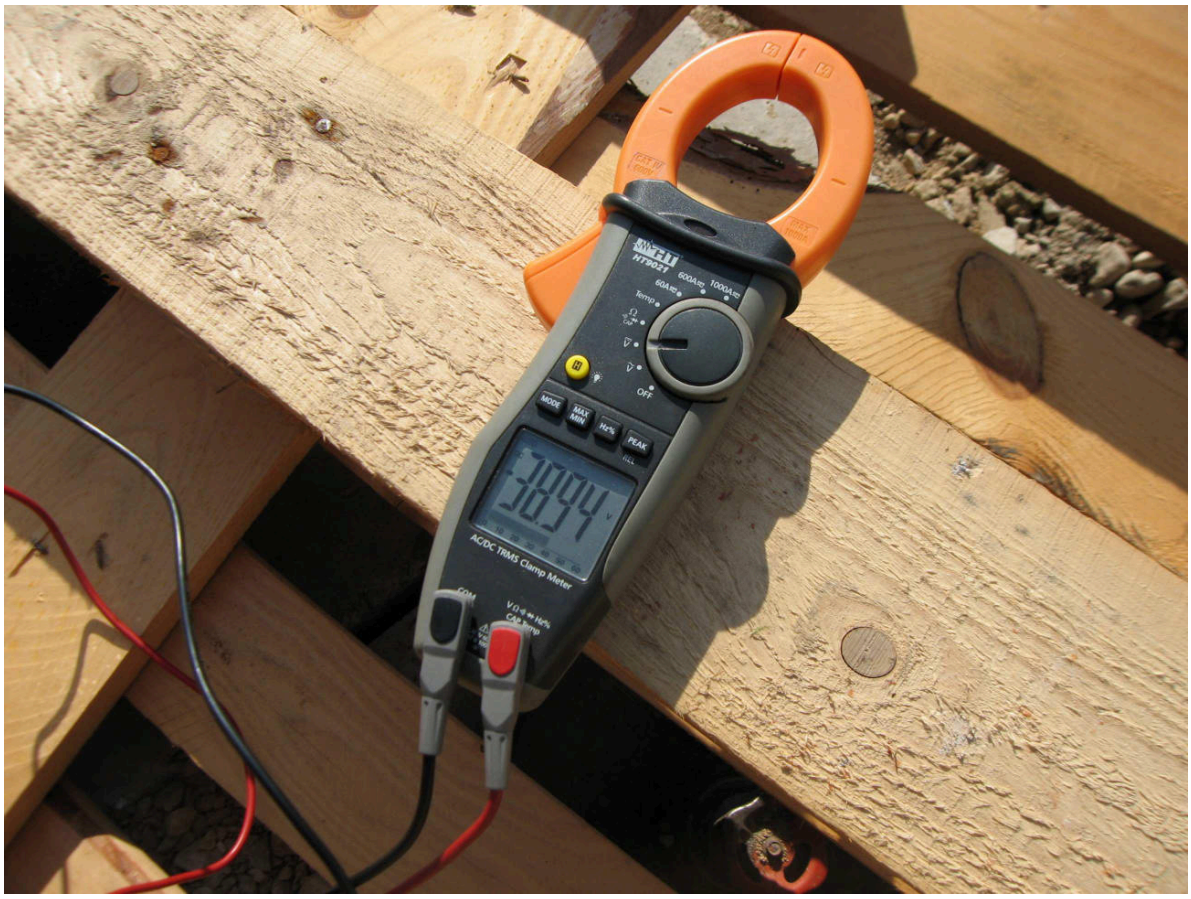


Figura 5-36: prova con gel Prevento Solar su pannello Sunpower: tensione finale

Dalla prova effettuata e da precedenti prove effettuate sempre con lo stesso pannello ma con la versione precedente di Prevento Solar (versione di colore grigio), si può dichiarare che la tensione viene ridotta di circa il 35 %. Con altri pannelli i valori di resa sono stati più elevati. Questo pannello, molto diffuso negli impianti privati con poca superficie disponibile per via di un ottimo rapporto potenza-superficie, ha pertanto delle performance anche in caso di copertura con schiume o altro.

Il risultato che impianti con questo tipo di tecnologia, non solo sono di difficile messa fuori tensione coprendoli (ci si è accorti che la luce da sotto il pannello riesce a portare una discreta quantità di luce sufficiente per produrre corrente e tensione) ma hanno anche il problema delle messa a terra del polo positivo. In questo caso quindi basta entrare in contatto con il polo negativo dell'impianto che il circuito elettrico si chiude sulla persona (se non si è isolati elettricamente dal terreno ovviamente).

5.5 *Prove con poca luminosità*

É stata effettuata una prova con condizioni di poca luminosità. La data della prove è stato il 02-12-2011, giornata nuvolosa con pioggia debole.

Le prove diurne hanno evidenziato in ogni caso una tensione di circuito aperto elevata



Figura 5-37: Prove con poca luminosità alle ore 12:33

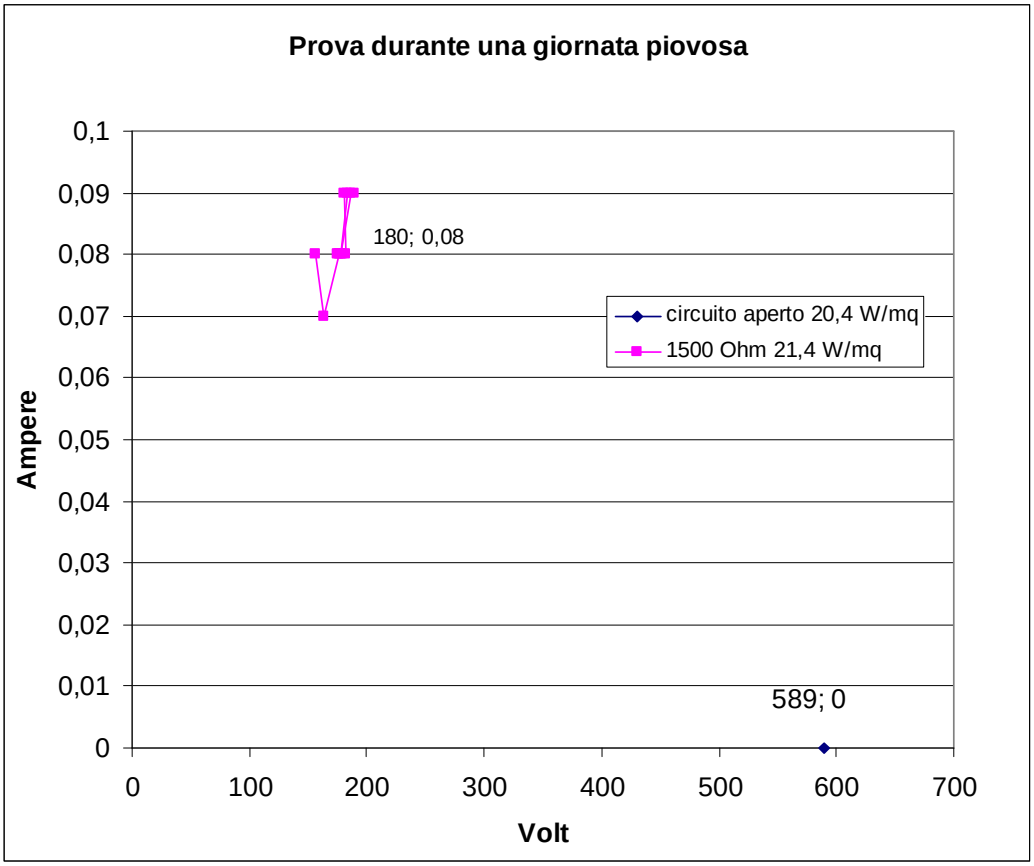


Figura 5-38: Grafico delle tensioni e correnti durante una giornata piovosa

Come si vede dal grafico la tensione nel caso di circuito aperto abbiamo avuto una tensione di circa 590 Volt, notevole considerando la bassa luminosità della giornata.

Considerando invece di chiudere il circuito collegando in serie il reostato posizionato a circa 1500 Ohm la corrente che si è prodotta è stata di circa 0,08 A.

Tale corrente si configura nella zona definita DC-2 in Figura 3-5: in tale zona si hanno probabili contrazioni muscolari involontarie ma normalmente non si rilevano effetti fisiologici dannosi permanenti.

Ma si consideri che, a causa delle normali condizioni interventistiche, anche un solo effetto di tetanizzazione per un soccorritore posizionato su una copertura senza essere assicurato tramite opportuni sistemi di ancoraggio, può provocare un incidente medio-grave.

5.6 *Prove in notturna*

5.6.1 Prova con APS a 7,5 m

In seguito è stata eseguita una prova notturna con una colonna fari di una normale APS – prima partenza in uso presso il Corpo Permanente di Trento.

La potenza della colonna fari era di 3000 Watt complessivi con tecnologia delle lampade di tipo alogene. L'altezza dei fari era di 6,5 m. L'APS è stata posizionata in un due modi diversi per simulare due posizioni diverse e due illuminazioni diverse.

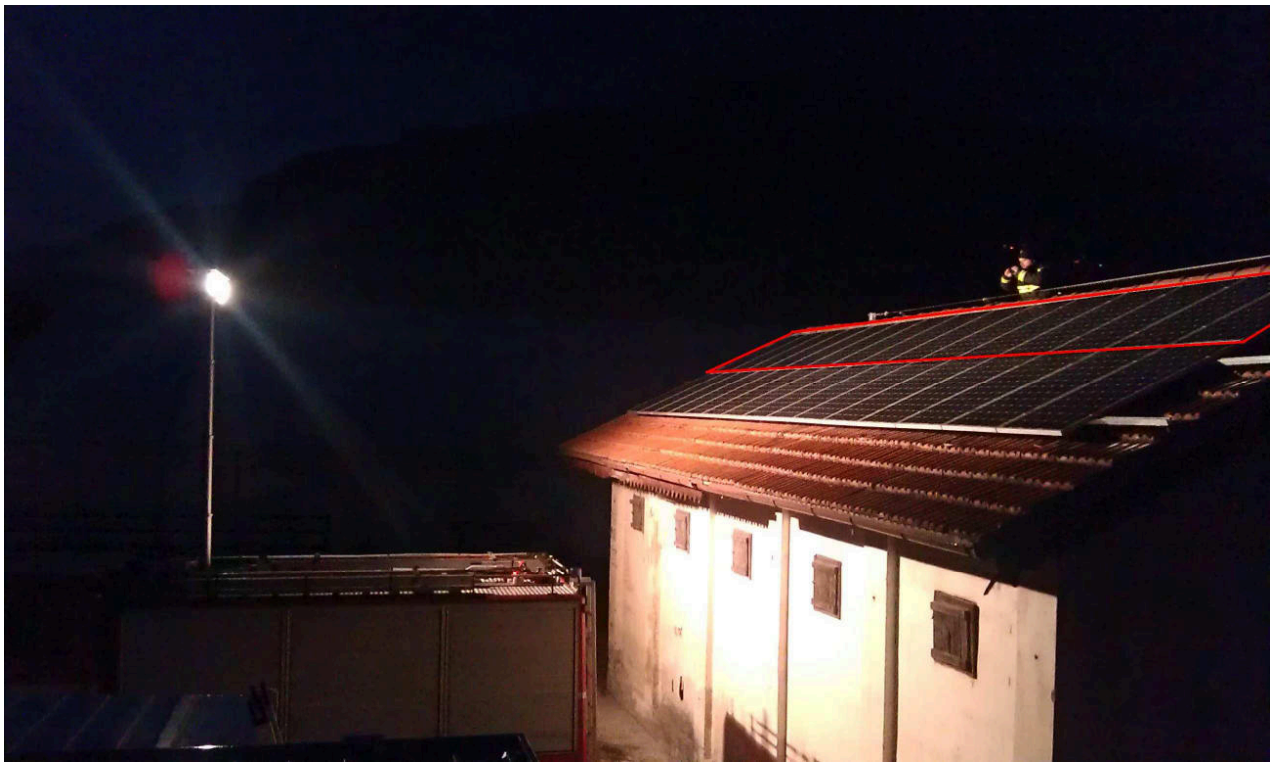


Figura 5-39: prima prova: colonna fari distante 7,5 m dalla stringa in prova

Durante questa prima prova è risultato che a fronte di una luminosità di circa 4 W/mq massimi, con ai lati 1,2 W/mq, le correnti di passaggio attraverso il corpo umano erano molto più basse, di circa 0,01 A. (Si tenga conto che la sensibilità dello strumento è di 0,01 A)

Da tenere conto però che a circuito aperto la stringa in questione produceva 390 V di tensione.

La prova ha voluto simulare quelle che sono le condizioni estreme di un intervento notturno, visto che difficilmente si riesce a posizionare la colonna fari in modo così vicino all'edificio.

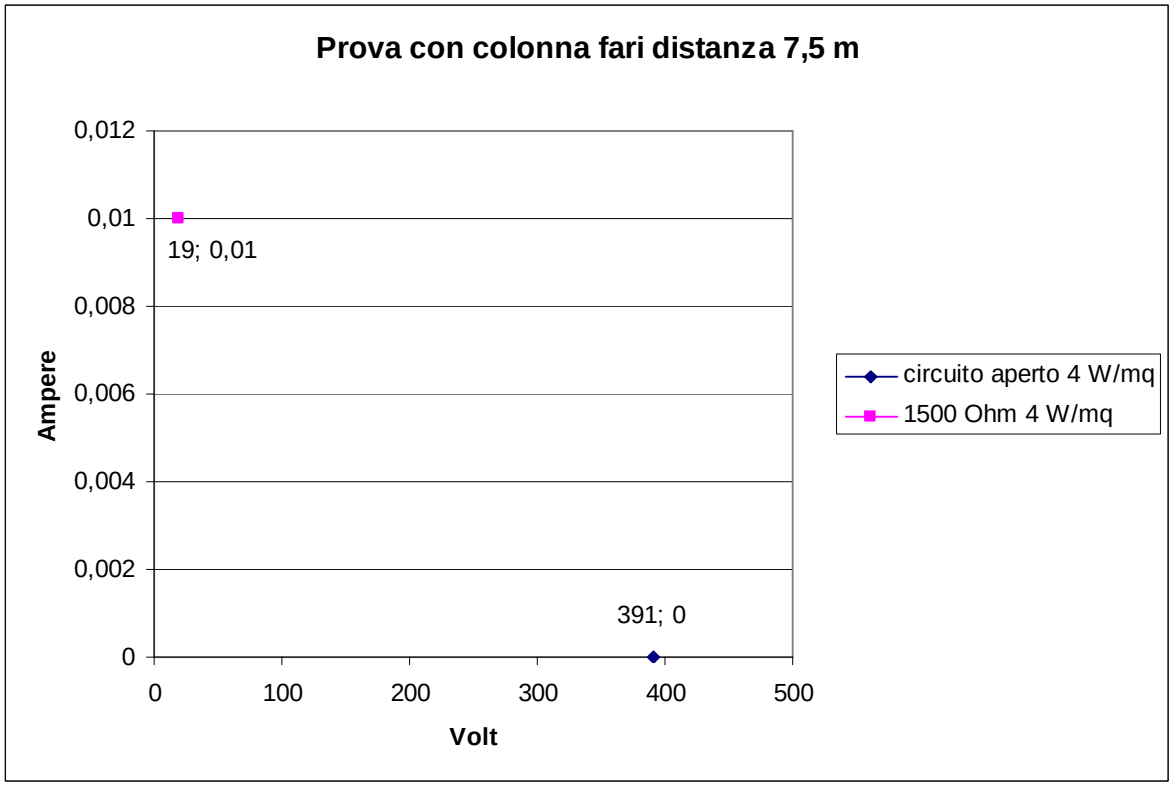


Figura 5-40: prima prova: colonna fari distante 7,5 m dalla stringa in prova



Figura 5-41: prima prova: colonna fari distante 7,5 m dalla stringa in prova



Figura 5-42: prima prova: colonna fari distante 7,5 m dalla stringa in prova, verifica della radiazione tramite solarimetro ai lati della stringa



Figura 5-43: prima prova: colonna fari distante 7,5 m dalla stringa in prova

5.6.2 Prova con APS a 15 m

La seconda prova ha permesso di effettuare una simulazione con una posizione più defilata dell'APS e quindi minore radiazione sulla stringa. La radiazione max è stata di circa 1 W/mq al centro e di 0,5 W/mq ai lati della stringa stessa.

Questa simulazione può essere paragonabile ad una classica illuminazione di un intervento di incendio copertura. Da tenere conto che normalmente le colonne fari sono più di una.



Figura 5-44: seconda prova: colonna fari distante 15 m dalla stringa in prova

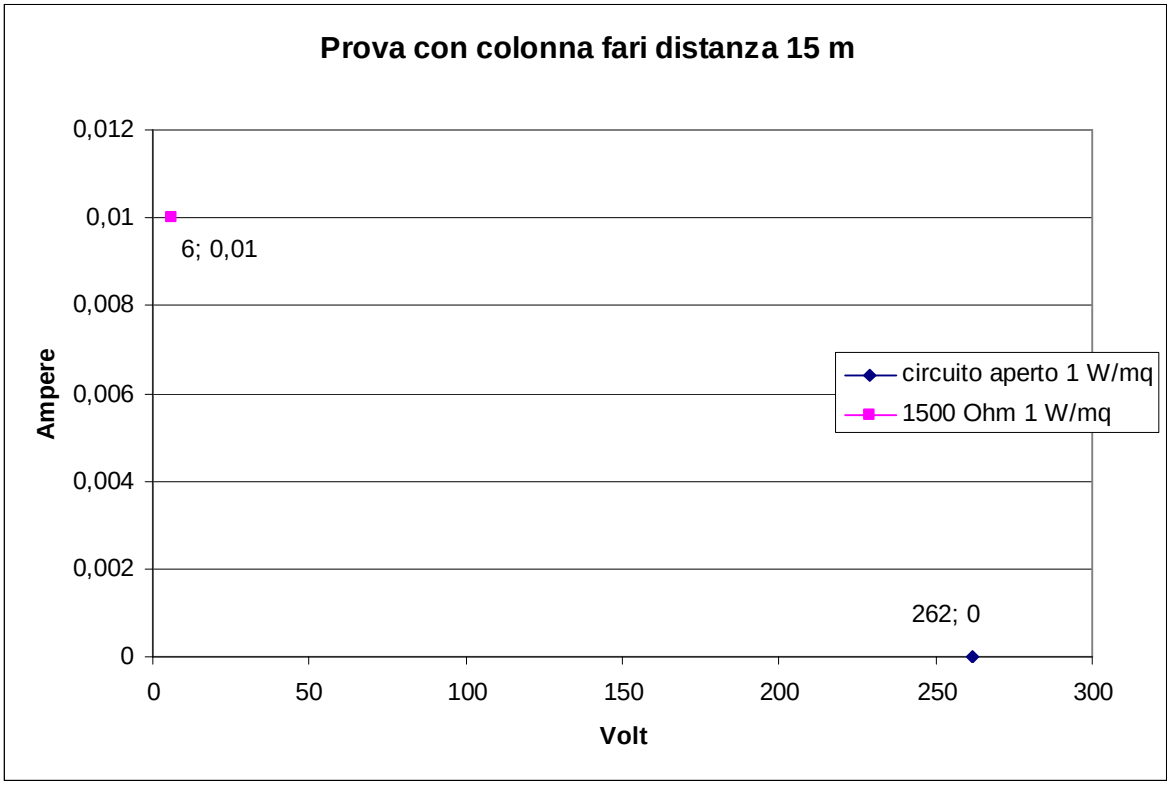


Figura 5-45: seconda prova: colonna fari distante 15 m dalla stringa in prova

In questo caso come si può vedere le tensioni in gioco sono molto più basse e le correnti che si potrebbe produrre attraverso il corpo umano sono intorno ai 0,01 Ampere. (Si tenga conto che la sensibilità dello strumento è di 0,01 A)

In ogni caso appare questa situazione molto più tranquilla della precedente, anche se in questo caso le tensioni a circuito aperto sono dell'ordine dei 260 V.

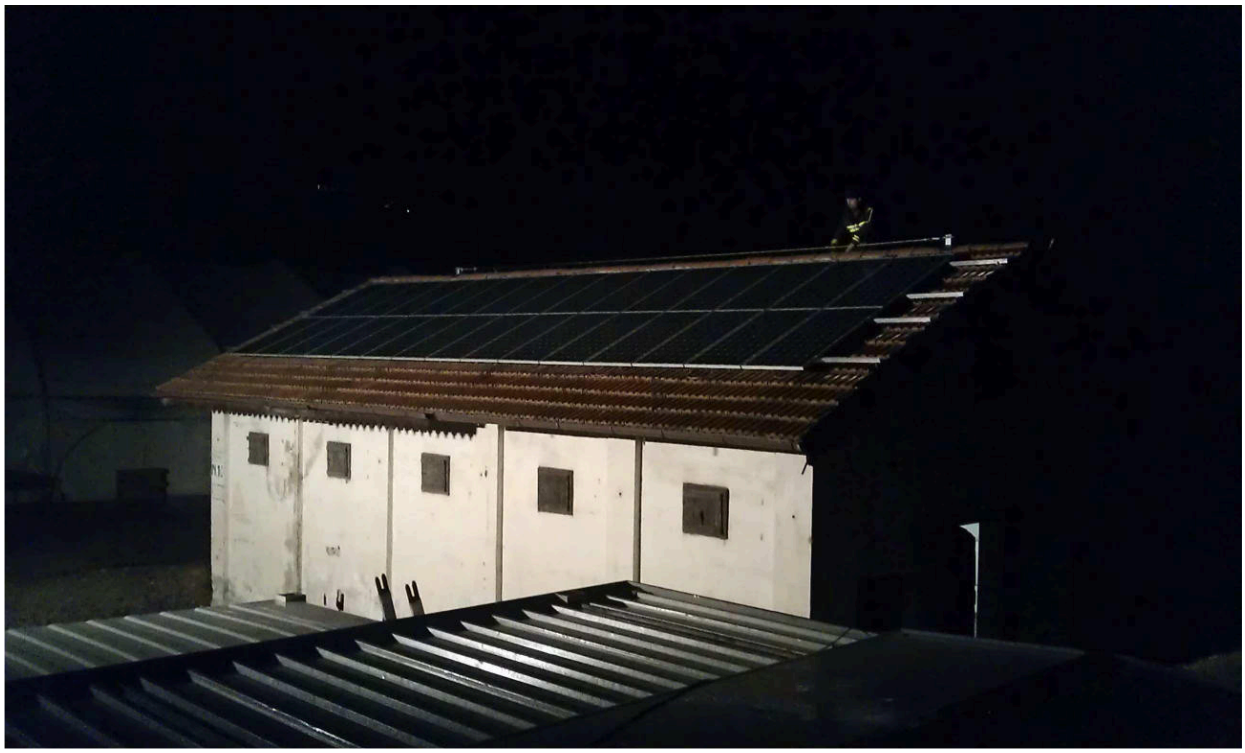


Figura 5-46: seconda prova: colonna fari distante 15 m dalla stringa in prova



Figura 5-47: seconda prova: colonna fari distante 15 m dalla stringa in prova

5.7 *Prove di funzionamento dei sistemi di messa fuori tensione*

5.7.1 Prove con il sistema SOLAREDGE

Le prove di funzionamento del sistema di limitazione delle tensioni SOLAREDGE hanno riguardato il caso d'interruzione di corrente sul lato corrente alternata. In questo caso automaticamente si spegne l'inverter ma gli ottimizzatori di potenza installati uno per pannello limitano la tensione in uscita ad 1 Volt.

Le prove di funzionamento sono state alcune decine e in tutti i casi la tensione di stringa veniva limitata a 14-15 Volt. Pertanto in base ai pochi mesi di funzionamento (l'impianto è entrato in servizio nell'estate del 2011) si può dire che il sistema funziona.

L'unico neo, comune anche al caso di SOLTEQ, è che nel caso di malfunzionamento del sistema non si ha un'evidenza del fatto che i pannelli siano ancora in tensione.

5.7.2 Prove con il sistema SOLTEQ

Le prove di funzionamento del sistema di limitazione delle tensioni SOLTEQ hanno riguardato il caso comando manuale della cortocircuitazione dei pannelli. In questo caso, indipendentemente dall'inverter, le tensioni della stringa vengono portate a zero.

Le prove di funzionamento sono state alcune decine e nella normalità dei casi la tensione di stringa veniva portata a zero. Pertanto in base ai pochi mesi di funzionamento (l'impianto è entrato in servizio nell'estate del 2011) si può dire che il sistema funziona.

L'unico neo, comune anche al caso di SOLAREDGE, è che nel caso di malfunzionamento del sistema non si ha un'evidenza del fatto che i pannelli siano ancora in tensione.

6 Conclusioni

Le conclusioni dello studio sono:

1. l’impianto fotovoltaico rappresenta una situazione di pericolo per l’intervento dei Vigili del Fuoco per vari aspetti, tra i quali il più difficile da gestire risulta il rischio di elettrocuzione;
2. dalle prove effettuate si può concludere che tutte le situazioni di intervento sono pericolose per quanto riguarda le correnti di elettrocuzione; nel caso di interventi in notturna i rischi di correnti di elettrocuzione pericolose è molto basso;
3. le varie tipologie di copertura dei pannelli per cercare di inibire la produzione di corrente elettrica sono complesse, lente e non consone alla tipologia interventistica dei VVF e con scarsi risultati dal punto di vista del calo delle tensioni;
4. un grosso limite osservato è che nel momento in cui si apre l’interruttore generale lato c.a., spegnendosi l’inverter, non si hanno più dati in merito alla situazione elettrica del lato c.c.; questo limita fortemente la possibilità di verificare le tensioni in gioco sul campo fotovoltaico e la possibilità o meno di procedere ad eventuale smontaggio di pannelli fotovoltaici o altre parti sotto tensione in sicurezza;
5. appare sempre più evidente che il problema andrebbe affrontato a monte con l’installazione di qualche sistema di messa fuori tensione del campo fotovoltaico (come quelli installati sul campo fotovoltaico di Marco di Rovereto) che permettano di poter operare in sicurezza;
6. gli interventi su impianti esistenti richiedono una buona capacità di analisi della situazione elettrica e una buona capacità di analisi dei rischi a cui potrebbero andare incontro gli operatori VVF;
7. appare molto evidente che si necessita a livello di VVF di un’ampia formazione del personale, a partire dai vigili fino ai funzionari con presa visione di impianti reali e prove sul campo.

Bibliografia

- Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI), (2011) *CEI 64-18: Effetti della corrente elettrica attraverso il corpo umano e degli animali domestici*, Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI);
- Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI), (2011) *Guida CEI 82-25: Guida alla realizzazione di sistemi di generazione fotovoltaica collegati alle reti elettriche di Media e Bassa Tensione*, Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI);
- Deutscher Feuerwehr Verband, (2010) *Einsatz an Photovoltaikanlagen,* Deutscher Feuerwehr Verband;
- Deutscher Feuerwehr Verband, (2010) *Handlungsempfehlungen Photovoltaikanlagen,* Deutscher Feuerwehr Verband;
- California Department Of Forestry And Fire Protection (2008), *SOLAR PHOTOVOLTAIC INSTALLATION GUIDELINE,* California Department Of Forestry And Fire Protection;
- Photon International, (8-2009), *Playing with fire,* Photon International;
- Parisi, L. (2011) *Lotta agli incendi con il CAFS*, Scuola Provinciale Antincendi di Trento;
- TuttoNormel, (2011) *Guide Blu N.15 • FOTOVOLTAICO (1/2011,)* TuttoNormel.

Ringraziamenti

- Il perito Massimo Gamba (esperto di impianti fotovoltaici, membro del CEI CT 82 Sistemi Fotovoltaici e docente di numerosi corsi di formazione in materia) per la progettazione dell'impianto fotovoltaico e la consulenza tecnica durante le prove;
- La ditta ALBATECH per la fornitura del sistema SOLAREDGE;
- La ditta SoLeon GmbH per la fornitura del sistema SOLTEQ;
- La ditta PRO FIRE per la fornitura del gel PREVENTO SOLAR.