



Ricerca di Sistema elettrico

## Modelli elettro-termici e progettazione ottimizzata dei convertitori SMPPT

G. Adinolfi, R. Ciavarella, G. Graditi, V. Palladino

## MODELLI ELETTRO-TERMICI E PROGETTAZIONE OTTIMIZZATA DEI CONVERTITORI SMPPT

G. Adinolfi, R. Ciavarella, G. Graditi, V. Palladino  
ENEA

Settembre 2017

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: B.1.2 "Ricerca su tecnologie fotovoltaiche innovative"

Obiettivo: Sviluppo di tool di progettazione e studio di dispositivi attivi innovativi per convertitori smppt

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA



## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 BACKGROUND.....	5
1.2 LA PROGETTAZIONE DI UNA SOLUZIONE “OTTIMA”.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
3 PROGETTAZIONE DI CONVERTITORI SMPPT.....	7
4 ALGORITMI PER LA PROGETTAZIONE E OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO.....	10
4.1 ALGORITMO DI OTTIMIZZAZIONE SMPPT.....	10
4.1.1 Algoritmo di ottimizzazione SPEA-II.....	11
4.1.2 La progettazione multi-obiettivo mediante NSGA-II.....	15
5 MODELLI ELETTRO-TERMICI PER LA PROGETTAZIONE SMPPT.....	16
<i>Vincoli progettuali per i componenti magnetici.....</i>	<i>17</i>
<i>Vincoli progettuali per i componenti switching.....</i>	<i>18</i>
<i>Vincoli progettuali per i componenti capacitivi.....</i>	<i>18</i>
5.1 CICLO TERMICO PER COMPONENTI MAGNETICI, SWITCHING E CAPACITIVI.....	19
6 STANDARD E PROCEDURE PER LA VALUTAZIONE AFFIDABILISTICA.....	27
7 VISUALIZZAZIONE DELLE SOLUZIONI DI PROGETTO MEDIANTE GUI.....	31
8 CONCLUSIONI.....	35
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	36
10 INDICE DELLE FIGURE.....	38

## Sommario

Il presente documento "*Rapporto tecnico sui modelli elettro-termici e progettazione ottimizzata dei convertitori SMPPT*" descrive le attività di ricerca svolte nell'ambito del PAR 2016 per la "Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio", e, in particolare, del progetto di Ricerca su Tecnologie Fotovoltaiche Innovative.

A termine del PAR 2015 sono state presentate le metodologie di progettazione multi-obiettivo per convertitori SMPPT, al fine di analizzarne potenzialità e criticità. Il lavoro di ricerca condotto nella seconda annualità ha riguardato, invece, lo studio e lo sviluppo e l'implementazione degli algoritmi evolutivi e delle procedure elettro-termiche per la progettazione ottimizzata di convertitori SMPPT.

Lo sviluppo del tool RET "Reliable Electro-Thermal" ha richiesto l'implementazione dell'algoritmo di ottimizzazione e di quello di progettazione, mediante la definizione e l'individuazione delle metodologie per la valutazione del comportamento del convertitore SMPPT dal punto di vista elettrico e affidabilistico anche in condizioni critiche di lavoro. In particolare, sono stati implementati gli algoritmi "Nondominated Sorting Genetic Algorithm II" (NSGA-II) e "Strength Pareto Evolutionary Algorithm II" (SPEA-II) e sono state studiate le dipendenze dalla temperatura dei principali componenti elettronici, costituenti il convertitore SMPPT.

Al fine di analizzare e valutare gli effetti termici sui parametri caratteristici di tali dispositivi elettronici, nonché sul loro comportamento in termini di affidabilità, sono state sviluppate due specifiche subroutine, definite rispettivamente "Electro-Thermal design" e "Reliable-Thermal design". Esse consentono di effettuare una valutazione quantitativa delle grandezze caratteristiche dei singoli componenti elettronici, nonché della potenza dissipata e, quindi, del rendimento complessivo e dell'affidabilità del convertitore SMPPT.

Il presente report è articolato in 7 capitoli.

Nei capitoli 1 e 2 viene proposta una sintesi delle diverse fasi di lavoro relative alla seconda annualità di progetto. In particolare, sono descritte le fasi implementative del codice di progettazione e ottimizzazione e dello sviluppo dell'interfaccia utente.

Nel capitolo 3 è riportata la descrizione delle diverse fasi di progettazione del convertitore SMPPT a partire dalle modalità di interazione tra il progettista e la "Graphic User Interphase - GUI", che consente di selezionare e/o customizzare le soluzioni e le applicazioni di interesse.

Nel capitolo 4 sono presentate le attività relative all'implementazione degli algoritmi evolutivi SPEA-II e NSGA-II che sono stati selezionati per la fase di ottimizzazione multi-obiettivo del convertitore SMPPT.

Il capitolo 5 affronta il tema dell'influenza dei fenomeni termici sui parametri caratteristici dei dispositivi elettronici commerciali utilizzati nei convertitori SMPPT e, conseguentemente, sulle loro prestazioni energetiche, ed illustrare le procedure seguite per l'implementazione della subroutine "Electro-Thermal design".

A seguire, nel capitolo 6, viene proposta la valutazione dell'affidabilità del convertitore SMPPT, mediante l'impiego del modello RIAC 217 Plus che è stato utilizzato per l'implementazione della subroutine "Reliable-Thermal design".

Nel capitolo 7, vengono, infine, riportati i risultati operativi ottenuti con il software RET per uno specifico caso studio e sono illustrate le modalità di utilizzo della GUI, per la visualizzazione delle soluzioni e dei risultati.

# 1 Introduzione

## 1.1 Background

I convertitori SMPPT sono dei convertitori DC-DC, il cui iter progettuale differisce da quello usualmente seguito per i tradizionali convertitori DC-DC.

Nel caso delle applicazioni fotovoltaiche un fattore che influenza, in maniera determinante, le caratteristiche tecniche e il funzionamento dei singoli componenti elettronici e, conseguentemente le prestazioni del convertitore, nella sua interezza, è la temperatura di lavoro.

I dispositivi elettronici, quali quelli switching, magnetici e capacitivi, sono, seppur in misura diversa, particolarmente sensibili ai fenomeni termici. E', pertanto, fondamentale considerare gli effetti della temperatura di lavoro e delle relative escursioni sulle prestazioni energetiche del convertitore, al fine di verificarne la corretta rispondenza alle condizioni operative reali per un dato sito di installazione, nonché assicurare adeguati livelli di qualità ed affidabilità (riduzione dei guasti e/o dei malfunzionamenti) del servizio erogato.

## 1.2 La progettazione di una soluzione "ottima"

Uno degli aspetti più delicati nella progettazione di convertitori SMPPT è legato prevalentemente alla necessità di dover soddisfare, contemporaneamente, requisiti diversi e "contrastanti" tra di loro. In questo ambito occorre, quindi, avvalersi di metodi di progettazione multi-obiettivo atti all'individuazione non di un'unica soluzione di progetto, ma di un set di possibili soluzioni in grado di soddisfare al meglio i diversi vincoli progettuali. Ciascuna soluzione rispetta, con un certo livello prestazionale, il trade-off tra le diverse specifiche tecniche da considerare. Il compito del progettista è quello di analizzare la famiglia di soluzioni ottenute e individuare, tra tutte, quella "ottima", che viene intesa come il set di componenti elettronici in grado di funzionare secondo un'opportuna topologia circuitale e di garantire il soddisfacimento delle specifiche in termini di rendimento, affidabilità e costo. Il progettista deve, in questo contesto, avvalersi di modelli, procedure e strumenti che permettano di perseguire il suddetto obiettivo.

E' questo il presupposto che sta alla base della definizione e realizzazione del software RET inteso come uno strumento che, realizzato in un opportuno ambiente di sviluppo, consente di analizzare un numero elevato di possibili soluzioni per l'individuazione di quella di miglior compromesso in termini tecnico-economici. L'obiettivo desiderato viene ottenuto mediante l'utilizzo combinato, nelle diverse fasi di progettazione del convertitore, di un algoritmo di progettazione e di uno di ottimizzazione. L'esperienza del progettista contribuisce, nella fase finale, all'individuazione del convertitore SMPPT "ottimo" tra tutte le soluzioni individuate dal software.

## 2 Descrizione delle attività svolte

A valle dell'introduzione sulle problematiche relative alla fase di progettazione del convertitore, si procederà con la descrizione delle attività di ricerca svolte durante il secondo anno. L'attenzione è stata focalizzata sull'implementazione e l'applicazione di metodologie di ottimizzazione multi-obiettivo per la progettazione di convertitori SMPPT. Gli algoritmi individuati sono stati integrati nel tool RET per il design di convertitori SMPPT "ottimi", ossia in grado di garantire adeguati livelli prestazionali e un buon trade-off in termini tecnico-economici. Nel dettaglio, l'attività è stata organizzata in tre fasi, di seguito, brevemente descritte.

- *Prima fase:* descrizione delle diverse fasi di progettazione del convertitore SMPPT, mediante l'utilizzo del software RET e dell'interfaccia utente sviluppata (GUI). Si intende, in questo caso, seguire un procedimento di tipo UP – BOTTOM per illustrare le attività svolte nella seconda annualità di ricerca, con riferimento allo sviluppo del tool RET ed alla realizzazione della GUI. Vengono fornite indicazioni per il set delle impostazioni iniziali di progetto che consistono nella selezione o customizzazione di profili rappresentativi delle condizioni ambientali (temperatura, irraggiamento solare, etc.) e dei moduli/generatori fotovoltaici considerati. Una volta che sono stati selezionati gli algoritmi genetici NSGA-II e SPEA-II per la fase di ottimizzazione multi-obiettivo, l'attenzione viene concentrata sull'implementazione dei relativi codici in ambiente Matlab® Release 2016 e sulla loro integrazione nel tool RET.
- *Seconda fase:* verifica dei vincoli progettuali per ciascun dispositivo del circuito, studio dell'effetto dei fenomeni termici sul comportamento dei dispositivi elettronici presenti nel convertitore SMPPT e sviluppo di una subroutine ad hoc per la valutazione quantitativa, mediante procedura di tipo iterativo, dei parametri caratteristici dei dispositivi elettronici e del rendimento del SMPPT. A valle dell'esecuzione della subroutine "Electro-Thermal design" per ciascuna delle condizioni iniziali selezionate dal progettista, il software effettua il calcolo della funzione di merito  $\eta_{SMPPT}$  che sarà utilizzata, insieme alle altre funzioni di merito, per le fasi successive di ottimizzazione. È stata, poi, definita e implementata la subroutine "Reliable-Thermal design" per la valutazione dell'affidabilità del convertitore SMPPT. Tra i diversi Reliability Prediction Model analizzati nell'annualità precedente è stato selezionato il modello RIAC 217Plus in quanto ritenuto più idoneo per calcolare l'affidabilità di sistemi operanti in condizioni di lavoro continuamente variabili, come quelli considerati in questo lavoro di ricerca. A seguito della valutazione del Mean Time Between Failure (MTBF) in ciascun punto di funzionamento considerato, il tool RET calcola la funzione ponderata  $MTBF_{SMPPT}$  per l'ottimizzazione multi-obiettivo.
- *Terza fase:* individuazione di un caso studio, analisi dei risultati ottenuti e descrizione delle modalità di rappresentazione dei risultati ottenuti dal processo di progettazione e ottimizzazione del convertitore SMPPT mediante la GUI.

### 3 Progettazione di convertitori SMPPT

Un convertitore SMPPT è, come già sottolineato, un convertitore DC-DC caratterizzato da una logica digitale on board che lo rende un sistema “smart” in grado di fungere da elemento di controllo, ma anche di fornire servizi ancillari. La progettazione di tale convertitore non può essere effettuata utilizzando gli stessi metodi impiegati per i tradizionali convertitori DC-DC. Bisogna, infatti, tener presente che differenti scenari energetici, quali applicazioni/installazioni fotovoltaiche, NetZEB e microreti [1], richiedono sistemi e dispositivi in grado di assicurare adeguate prestazioni sia in termini energetici, sia dal punto di vista dell’affidabilità di servizio. Non è, pertanto, sufficiente pervenire all’individuazione di una possibile soluzione progettuale, ma è necessario progettare un convertitore “ottimo” in grado di funzionare con adeguati indici prestazionali al variare delle condizioni di lavoro e di garantire continuità e affidabilità di servizio.

L’obiettivo ultimo è, quindi, quello di massimizzare l’efficienza e l’affidabilità del convertitore, minimizzandone, nel contempo, il costo. E’ evidente che le suddette specifiche sono in contrasto tra loro; per ottenere, infatti, un convertitore SMPPT ad alto rendimento sono necessari componenti pregiati che hanno un certo costo. D’altra parte, non è detto che un dispositivo costoso sia anche in grado di assicurare alta affidabilità.

Di conseguenza le correlazioni tra le specifiche considerate sono complesse e non note a priori.

La complessità dell’aspetto sopra descritto appare evidente se si considera che, a determinare il rendimento e/o l’affidabilità del convertitore, contribuiscono non solo i parametri caratteristici dei componenti elettronici, ma anche le relazioni esistenti tra parametri di componenti diversi e le dipendenze di questi dai fenomeni termici. D’altra parte, progettare un convertitore altamente performante per una determinata condizione di esercizio, potrebbe comportare l’individuazione di una soluzione non soddisfacente per le altre condizioni operative. Ciò si traduce in un insieme di equazioni costituite da un ingente numero di parametri e variabili che costituiscono il modello del convertitore.

Si intende, quindi, proporre una strategia di ottimizzazione multi-obiettivo che permetta di pervenire all’individuazione di una soluzione “ottima”. In tale contesto, si è deciso di avvalersi di un opportuno ambiente, MATLAB di MathWorks, capace di gestire il livello di complessità evidenziato.

Nel report “Analisi delle metodologie di progettazione multi-obiettivo di convertitori SMPPT e sviluppo di un tool dedicato”, relativo al PAR 2015, sono stati già analizzati i diversi algoritmi evolutivi di ottimizzazione multi-obiettivo, descrivendone le caratteristiche, i punti di forza e le criticità. Sono state, inoltre, indicate le diverse fasi del processo di progettazione di un convertitore SMPPT.

Si intende, in questo caso, seguire un procedimento di tipo UP – BOTTOM per illustrare le attività svolte nella seconda annualità di ricerca, con riferimento allo sviluppo del tool di progetto e descrivere nel dettaglio modelli, metodi e procedure utilizzati.

Nel prosieguo di questo documento l’attenzione è stata anche focalizzata sulla descrizione delle modalità di utilizzo della GUI accoppiata al tool di progettazione RET.

In Fig.1 viene schematicamente rappresentata la sequenza delle fasi richieste per la progettazione di SMPPT “ottimi”, mediante l’utilizzo del tool RET.

La procedura di design viene avviata specificando l’ambito applicativo del convertitore SMPPT da progettare. Il software RET permette, infatti, di ottenere il design di ottimizzatori di potenza per un impianto fotovoltaico asservito a un’utenza domestica, oppure per l’utilizzo in una microrete DC o in un Net Zero Energy Building. Come già indicato precedentemente, a valle della scelta dell’applicazione di interesse, il progettista può selezionare il tipo di architettura e la topologia circuitale del convertitore. La definizione dei parametri iniziali si completa mediante la scelta delle condizioni operative [2].

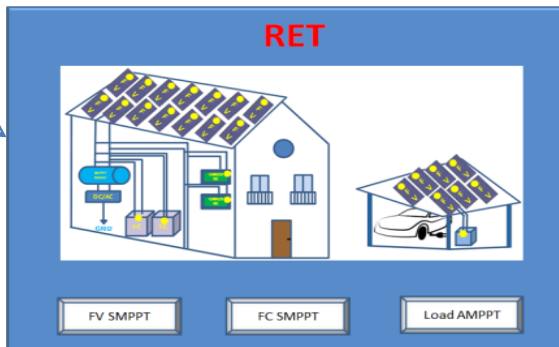
Ciò significa selezionare (Fig.2) il tipo di generatore fotovoltaico, il numero di moduli, il tipo di connessioni serie/parallelo caratterizzanti l’impianto ed il “profilo” ambientale da considerare. In particolare, si può optare per la scelta di default, definita a partire dai dati monitorati e acquisiti in siti reali di installazione, che sono stati analizzati al fine di identificare le condizioni operative che si verificano con maggiore frequenza. In alternativa, è possibile scegliere i profili relativi a diverse condizioni ambientali (sereno,

nuvoloso, parzialmente o totalmente nuvoloso) oppure customizzare la sezione delle impostazioni iniziali, introducendo le caratteristiche desiderate (Corrente-Tensione) del generatore fotovoltaico in esame e/o le condizioni operative di interesse.

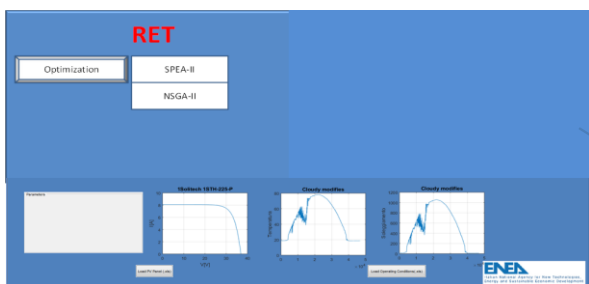
**SCELTA SCENARIO ENERGETICO**



**SCELTA ARCHITETTURA SMPPT E TOPOLOGIA CIRCUITALE**



**GUI OTTIMIZZAZIONE**



**VISUALIZZAZIONE 3D E 2D**

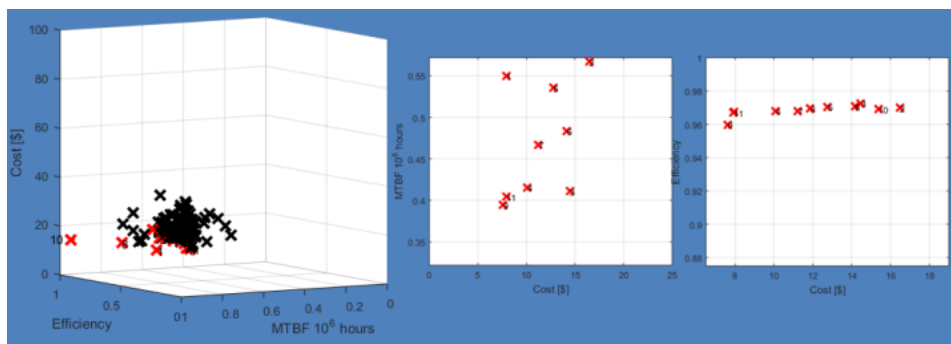
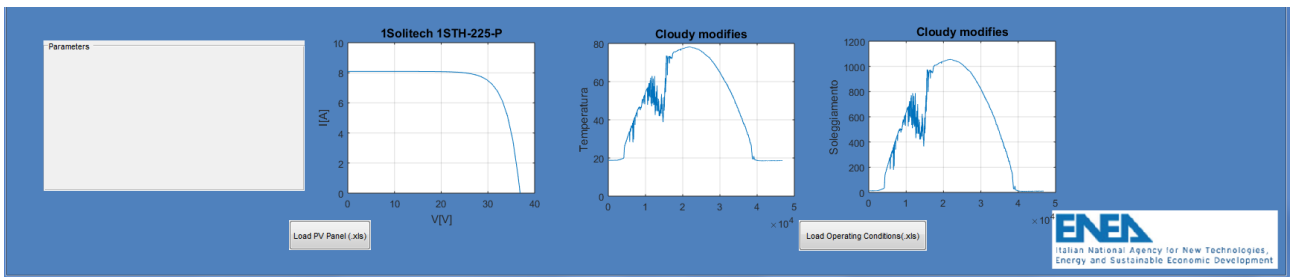


Figura 1. Rappresentazione sintetica delle fasi di progetto mediante RET.





**Figura 2. Sezione “Impostazioni iniziali” della procedura di progettazione SMPT.**

## 4 Algoritmi per la progettazione e ottimizzazione multi-obiettivo

A valle delle impostazioni iniziali, si passa alla fase di progettazione e ottimizzazione. E' importante sottolineare che l'algoritmo di ottimizzazione sviluppato agisce "in cooperazione" con quello di progettazione durante le diverse fasi di design [13,16]. In questo documento vengono, innanzitutto, descritti, gli step caratteristici degli algoritmi di ottimizzazione implementati e, successivamente, le fasi di realizzazione delle subroutine di progettazione. Nell'ambito del tool RET, le fasi di ottimizzazione e di progettazione "cooperano" sinergicamente per il raggiungimento dell'obiettivo finale.

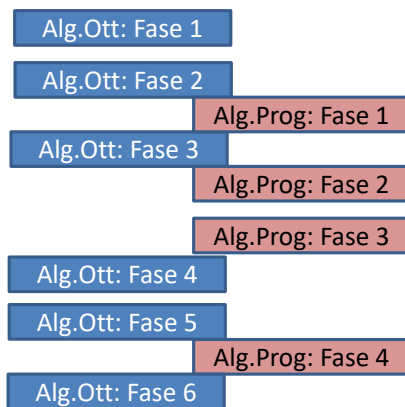


Figura 3. Struttura dell'esecuzione degli algoritmi di ottimizzazione e progettazione.

### 4.1 Algoritmo di ottimizzazione SMPPT

Lo studio condotto nel precedente PAR sui metodi evolutivi utilizzabili per problemi di ottimizzazione ha permesso di studiare ed analizzare le prestazioni di diversi algoritmi. In dettaglio, è emerso, che gli algoritmi NSGA-II e SPEA-II risultano più performanti di altri, per la risoluzione di problemi di ottimizzazione multi-obiettivo. SPEA-II è particolarmente indicato nel caso di problemi con numerosi obiettivi da considerare. L'applicazione di tali algoritmi nel settore della conversione di energia è riscontrabile in letteratura [3, 13]. Nel prosieguo, saranno descritte le fasi di implementazione dei due algoritmi selezionati.

La GUI permette al progettista di decidere quale algoritmo di ottimizzazione adottare per il problema di interesse. Il tool è stato realizzato in maniera tale da consentire la selezione dell'algoritmo desiderato mediante un apposito menù a tendina (Fig.4); in particolare, uno specifico pulsante permette l'avvio della procedura di progettazione e ottimizzazione del convertitore SMPPT.

Il software procede con una serie di operazioni che consistono nell'acquisizione di dati esterni e nell'elaborazione di variabili da parte dell'algoritmo di ottimizzazione e quello di progettazione.

Indipendentemente dall'algoritmo di ottimizzazione scelto, la prima fase è rappresentata dall'inizializzazione della popolazione. Come di seguito riportato, la popolazione iniziale è costituita da vettori di dimensione  $1 \times N_t$ . Il tool inizializza la popolazione per la topologia circuitale selezionata dal progettista scegliendo casualmente (Fig.5) i componenti elettronici del convertitore nel corrispondente database di dispositivi commerciali.

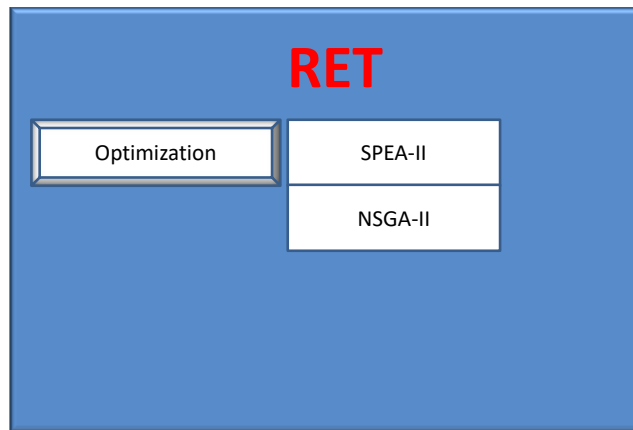


Figura 4. Interfaccia GUI scelta algoritmo di ottimizzazione multi-obiettivo.

Nel dettaglio, il cromosoma risulta, così, costituito:

$$y = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \dots \ x_{N_t-1} \ x_{N_t}] \tag{1}$$

dove ciascun gene  $x_i$  per  $i=1, \dots, N_t-1$  rappresenta uno specifico dispositivo elettronico della topologia considerata. Il valore che ciascun gene assume corrisponde al numero ordinale di un componente elettronico commerciale inserito nel database. L'ultimo elemento coincide con la frequenza di switching del convertitore, anch' essa scelta in maniera random tra 50 e 160 kHz.

La dimensione della popolazione iniziale viene settata mediante la variabile "popsize".

```

Inizializzazione della popolazione

popsize=1000;
Nt=6;

[file1,text1]=xlsread('ENEAinduttori_21102013.xls');
[file2,text2]=xlsread('ENEAcondensatori_21102013.xls');
[file3,text3]=xlsread('ENEAmos_21102013_prov.xls');

Nindutt=size(file1,1);
Ncond=size(file2,1);
Nmos=size(file3,1);

y=[randi(Nindutt) randi(Ncond) randi(Ncond) randi(Nmos) randi(Nmos) randi(fs)]
    
```

Figura 5. SPEA II: Inizializzazione della popolazione.

#### 4.1.1 Algoritmo di ottimizzazione SPEA-II

L'attenzione è, a questo punto, concentrata sull'algoritmo SPEA-II [14-15] che, a valle dell'inizializzazione della popolazione, prosegue con la creazione di un archivio vuoto (Fig.6) di dimensione "popsize x (N<sub>t</sub>+3)". L'archivio vuoto viene creato con tre colonne aggiuntive rispetto agli elementi citati precedentemente giacché esso contiene, per ogni cromosoma, anche i valori delle tre funzioni obiettivo considerate (efficienza, affidabilità e prezzo).

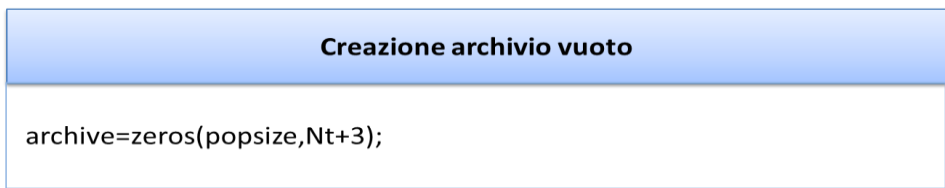


Figura 6. SPEA II: Creazione archivio iniziale.

In seguito alla creazione della popolazione iniziale e dell’archivio vuoto, l’algoritmo di progettazione elabora i dati ed i parametri di ciascun elemento, come mostrato schematicamente in Fig.7.

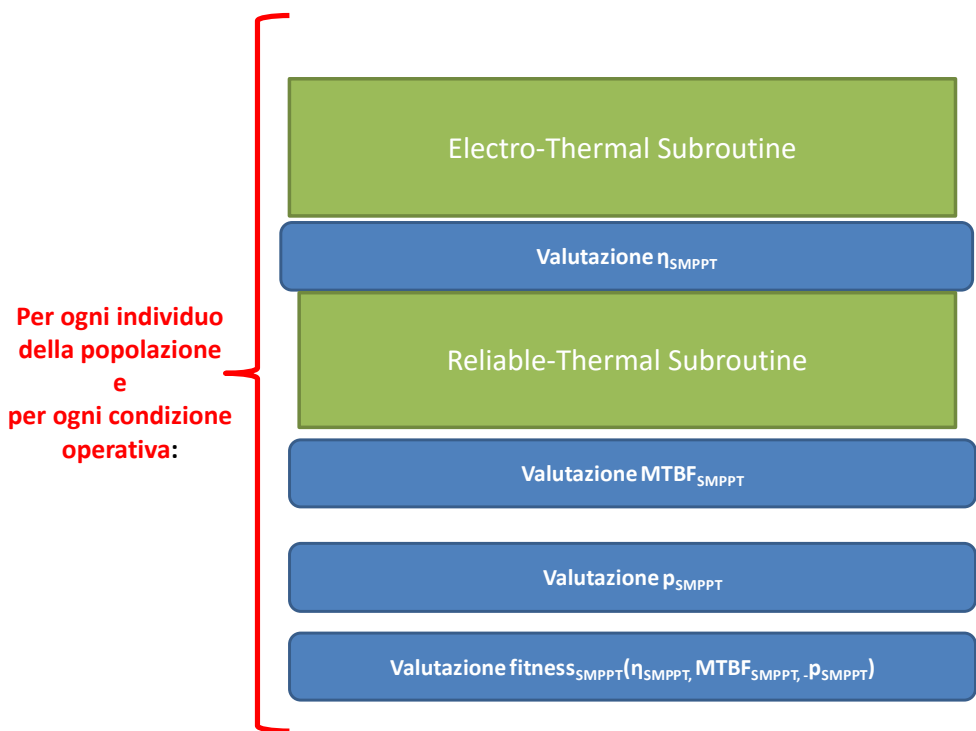


Figura 7. Schema fasi dell’algoritmo di progettazione.

In dettaglio, l’algoritmo di progettazione acquisisce dai database i valori dei parametri dei componenti elettronici che costituiscono uno specifico cromosoma della popolazione ed utilizza, poi, tali valori per risolvere le equazioni del modello Pulse Width Modulation Switch comprensivo delle non idealità dei dispositivi impiegati.

Bisogna specificare che i valori dei parametri dei componenti commerciali forniti nei datasheet sono relativi alla temperatura ambiente di 25°C.

Gli scenari energetici considerati sono caratterizzati da condizioni operative continuamente variabili. A ciò bisogna aggiungere che i convertitori SMPPT sono tipicamente collocati all’interno della scatola di giunzione posizionata sul retro dei moduli fotovoltaici. E’ evidente che gli stress termici ai quali vengono sottoposti i componenti elettronici, nelle suddette condizioni, possono influire significativamente sulle loro prestazioni, sia in termini di rendimento, sia dal punto di vista dell’affidabilità. Ai fini di una progettazione orientata a ridurre il numero e la frequenza di malfunzionamenti e/o guasti, è necessario implementare una subroutine per la determinazione della temperatura di esercizio dei componenti elettronici del convertitore nelle diverse condizioni operative.

L’esecuzione della subroutine “Electro-Thermal design”, che sarà analizzata, nel dettaglio, nel seguito di questo report, consente di valutare dell’efficienza “ponderata” della soluzione in esame, come descritto nel documento relativo al PAR 2015.

L'algoritmo di progettazione prosegue con l'esecuzione della subroutine "Reliable-Thermal design" relativa al calcolo degli indici di prestazione affidabilistica della soluzione in esame. Analogamente al caso precedente, nel prosieguo di questo documento saranno forniti dettagli su tale subroutine. Segue la valutazione economica del convertitore ottenuto. A questo punto, i dati del cromosoma analizzato e le relative funzioni obiettivo calcolate vengono fornite all'algoritmo di ottimizzazione (Fig.3).

A partire da tali dati, l'ottimizzazione prosegue con il calcolo della funzione di fitness F.

Nel caso di ottimizzazione mediante algoritmo SPEA-II, per ottenere la fitness function F è necessario eseguire una serie di operazioni, di seguito, elencate:

- calcolo delle soluzioni dominanti tra quelle della popolazione iniziale e quelle dell'archivio;
- calcolo, per ogni soluzione, del valore di Strength (S) che indica il numero di soluzioni dominate;
- calcolo della Raw Fitness (R). La R di una soluzione «A» è pari alla somma dei valori di S delle soluzioni che dominano A;
- calcolo della matrice delle distanze «d» tra le soluzioni ordinata in modo ascendente;
- calcolo della funzione di densità D;
- calcolo di  $F = R+D$ .

Lo step successivo dell'algoritmo SPEA-II consiste nel copiare gli individui non dominati della popolazione iniziale nell'archivio. Si ricordi che un individuo di una popolazione risulta non dominato se nessuna altra soluzione risulta contemporaneamente migliore per tutte le funzioni fitness considerate. In particolare, il codice sviluppato, riportato in Fig. 8, valuta quali sono gli individui dominati e inserisce tutti gli altri nell'archivio.

Individuazione individui dominati
<pre> %DETERMINIAMO I DOMINATI for j=1:n     for k=1:n         if (temp(j,Nt+3)&lt;temp(k,Nt+3)) &amp;&amp; (temp(j,Nt+1)&gt;temp(k,Nt+1)) &amp;&amp;             (temp(j,Nt+2)&gt;temp(k,Nt+2))             dominate(k,j)=true;         end     end end end  %%%CREIAMO L'ARCHIVIO CON LE SOLUZIONI SELEZIONATE  if num_nd&lt;=popsize     archive2(1:popsize,:) =         [temp(I(1:popsize)),R(I(1:popsize)),F(I(1:popsize))']; else     archive2=zeros(num_nd,Nt+5);     archive2(1:num_nd,:)=temp(I(1:num_nd),:),R(I(1:num_nd)),F(I(1:num_nd))     temp1=distance(I(1:num_nd),I(1:num_nd));     for k = 1:num_nd-popsize         size_a2 = size(archive2);         d2 = sort(temp1,1);         range_temp = [1:length(temp1)];         j=1;         while j &lt; num_nd             range_temp2 = find(d2(j,range_temp)&lt;=min(d2(j,range_temp)));             range_temp = range_temp(range_temp2);             if(length(range_temp)==1)                 j = num_nd;             end             j= j+1;         end         row_to_del = min(range_temp)         rows_to_keep = [1:(row_to_del-1) row_to_del+1:size_a2(1)];         rows_to_keep2 = [1:(row_to_del-1) row_to_del+1:length(temp1)];         temp_archive = archive2(rows_to_keep,:);         temp2 = temp1(rows_to_keep2, rows_to_keep2);         archive2 = temp_archive;         temp1 = temp2;     end end end </pre>

**Figura 8. SPEA II: Individuazione individui dominati.**

Se, a valle di quest'operazione, l'archivio iniziale non è stato ancora completamente riempito vengono usati i dominati per completarlo del tutto. Se, invece, il numero degli individui è superiore alla capienza dell'archivio si effettua un troncamento. In questo modo si ottiene il primo insieme di possibili soluzioni. I passi successivi dell'algoritmo effettuano la creazione della mating pool ed operazioni di cross-over e

mutazioni (Fig. 9) consentono la formazione di nuove soluzioni fino a pervenire al fronte di Pareto dei convertitori migliori.

### Mating pool, cross-over e mutazione

```

%%Creazione mating pool: alg. estrae in maniera random popsize soluzioni
diverse e le ordina in funzione di F
num=size(archive2,1);
matepool=zeros(num,Nt+3);
for i=1:num
    comp=randsample(num,2);
    if archive2(comp(1),Nt+5)<archive2(comp(2),Nt+5) %nella posizione Nt+5
        si trova F
        matepool(i,:)=archive2(comp(1),1:Nt+3);
    else
        matepool(i,:)=archive2(comp(2),1:Nt+3);
    end
end
end
% Crossover con singolo punto
matepool_size=size(matepool,1);
rand_cross=rand(1,matepool_size/2);
cross_point=ceil(rand(1,matepool_size/2)*(Nt-1));
for i=1:matepool_size/2;
    if rand_cross(i)<crossrate
        cross_pop(2*i-1,:)=matepool(mates(i,1),1:cross_point(i))
        matepool(mates(i,2),cross_point(i)+1:Nt+3);
        cross_pop(2*i,:)=matepool(mates(i,2),1:cross_point(i))
        matepool(mates(i,1),cross_point(i)+1:Nt+3);
    else
        cross_pop(2*i-1,:)=matepool(mates(i,1),:);
        cross_pop(2*i,:)=matepool(mates(i,2),:);
    end
end
end
%%
%%Mutiamo la popolazione
nmut=ceil((matepool_size-1)*Nt*mutrate); % numero mutazioni
mut_row=ceil(rand(1,nmut)*(matepool_size-1))+1;
mut_col=ceil(rand(1,nmut)*Nt);
for i=1:nmut
    if mut_col(i)==1
        cross_pop(mut_row(i),mut_col(i))=randi(Nindutt);
    elseif mut_col(i)==2 || mut_col(i)==3
        cross_pop(mut_row(i),mut_col(i))=randi(Ncond);
    elseif mut_col(i)==4 || mut_col(i)==5
        cross_pop(mut_row(i),mut_col(i))=randi(Nmos);
    else
        cross_pop(mut_row(i),mut_col(i))=49+randi(111);
    end
end
end

```

Figura 9. SPEA II: Creazione mating pool e operazioni di cross-over e mutazione degli individui.

#### 4.1.2 La progettazione multi-obiettivo mediante NSGA-II

Nel caso dell'algoritmo NSGA-II è stato possibile avvalersi di un'apposita funzione di Matlab per lo sviluppo dell'ottimizzazione del convertitore mediante una variante elitistica di tale metodo. NSGA-II favorisce sempre gli individui con migliore *rank*, il processo di ottimizzazione mediante la funzione "gamultiobj()" avvantaggia anche gli individui che possono contribuire ad aumentare la diversità della popolazione.

Mantenere la diversità della popolazione per la convergenza verso un fronte ottimale di Pareto è un punto essenziale. Tale diversità è ottenuta controllando i membri migliori della popolazione mentre l'algoritmo progredisce. Due opzioni "ParetoFraction" e "DistanceFcn" sono utilizzate per controllare l'elitismo. L'opzione "ParetoFraction" limita il numero di individui sul fronte di Pareto e la funzione "DistanceFcn" contribuisce a mantenere la diversità sul fronte favorendo gli individui relativamente lontani dal fronte.

L'algoritmo utilizzato genera, inizialmente, una popolazione  $P_t$  di individui "genitori". A partire da questi "genitori" viene generata una popolazione figlia  $Q_t$ . Le due popolazioni  $P_t$  e  $Q_t$  sono combinate insieme per formare una nuova popolazione  $R_t$  di dimensione  $2N$ .

L'intera popolazione  $R_t$  viene ordinata in funzione delle soluzioni dominanti (non-dominated sorting).

La maggiore complessità computazionale legata a quest'operazione è giustificata dal controllo generale dei dominanti tra le soluzioni figlie e le soluzioni genitriche che si ottengono. Una volta individuate le soluzioni dominanti, vengono determinati, uno alla volta, differenti fronti di soluzioni dominanti e viene creata una nuova popolazione di dimensione  $N$ . Tale nuova popolazione viene popolata a partire dalle soluzioni del fronte migliore e così via fino al fronte peggiore.

$R_t$  ha dimensione  $2N$  e la nuova popolazione, analogamente alla popolazione iniziale, deve avere dimensione  $N$ . Come mostrato in Fig.10, vengono eliminate le soluzioni che risiedono nella parte più affollata del fronte (Crowding distance sorting), ottenendo la popolazione  $P_{t+1}$ .

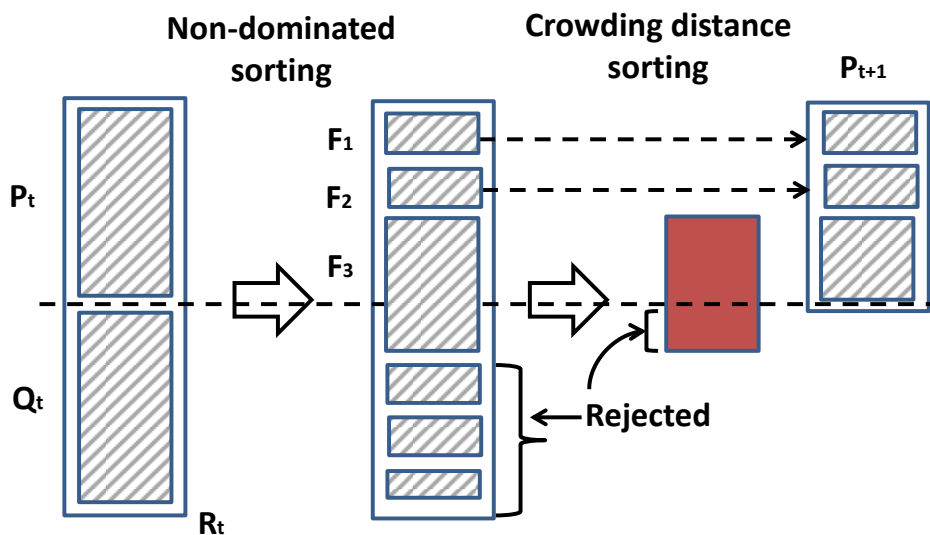


Figura 10. NSGA II: schema procedura [11].

## 5 Modelli elettro-termici per la progettazione SMPPT

Il progettista deve prestare particolare attenzione, fin dalle fasi iniziali della progettazione del convertitore, a quelle che sono le problematiche elettro-termiche dei componenti elettronici utilizzati, onde evitare situazioni operative critiche dei circuiti elettronici. In particolare, nel caso delle applicazioni fotovoltaiche, agli stress termici che generalmente caratterizzano i dispositivi elettronici, bisogna aggiungere l'influenza delle condizioni operative continuamente variabili e i gradienti termici ciclici tipici di queste applicazioni. Questi fattori devono opportunamente essere tenuti in conto, giacché risultano fortemente influenti sulle prestazioni energetiche e sull'affidabilità del convertitore SMPPT. Non modellare correttamente la dipendenza dei parametri dei componenti elettronici, significa, pertanto, pervenire ad un'erronea valutazione del comportamento "energetico" del convertitore SMPPT con conseguenze negative in termini di numero e frequenza di malfunzionamenti e/o danneggiamenti.

A tal fine, nel corso dell'attività di ricerca, l'influenza dei fenomeni termici è stata portata in conto, come detto, mediante lo sviluppo ed implementazione di un'apposita subroutine "Electro-Thermal design", la cui struttura viene schematizzata in Fig. 11.

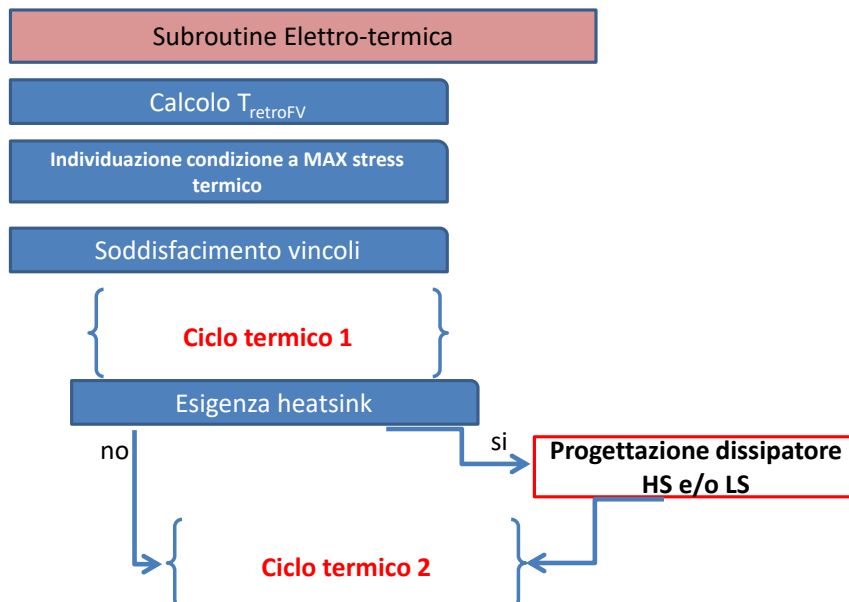


Figura 11. Rappresentazione schematica subroutine elettro-termica.

Come accennato precedentemente, viene calcolata, per ciascuna condizione operativa, la temperatura presente sul retro del modulo/generatore fotovoltaico (Eq.2). Tale temperatura rappresenta un parametro di progetto significativo, in quanto capace di portare congiuntamente in conto l'effetto della temperatura e del soleggiamento sui parametri caratteristici del convertitore.

$$T_{retroFV} = T_{genFV} - \frac{G}{G_0} \Delta T \quad (2)$$

dove:

-G è l'irraggiamento [W/m<sup>2</sup>]

-G<sub>0</sub> è l'irraggiamento di 1000 W/m<sup>2</sup>

-ΔT parametro dipendente dal tipo di generatore fotovoltaico [°C]



In seguito alla valutazione della  $T_{\text{retroFV}}$ , la subroutine individua, fra tutte le condizioni operative selezionate, la  $T_{\text{retroFV\_MAX}}$  che è rappresentativa della condizione di maggiore stress termico per i componenti del convertitore.

A questo punto, conoscendo la condizione più gravosa, l'algoritmo si occupa della verifica dei rate e dei vincoli di progetto per ciascuno dei componenti elettronici, scelti in maniera random all'interno dei database.

E' bene sottolineare che la condizione di funzionamento più critica per il convertitore viene utilizzata per la verifica del soddisfacimento dei requisiti di progetto e per l'eventuale progettazione dei dissipatori di calore. Tale condizione, come precedentemente evidenziato, non è sufficiente al conseguimento del design di un convertitore SMPPT "ottimo", in quanto l'individuazione di un set di dispositivi in grado di garantire buone prestazioni in questa particolare condizione, non necessariamente assicura un funzionamento soddisfacente in tutte le altre condizioni.

A titolo di esempio sono, di seguito, esplicitati i vincoli progettuali per un convertitore SMPPT di tipo boost.

#### Vincoli progettuali per i componenti magnetici

Durante l'esecuzione del programma, il primo componente elettronico da verificare è l'induttore. Le topologie circuitali considerate sono di tipo transformerless, di conseguenza, gli induttori sono i componenti magnetici inseriti nel relativo database.

Nella progettazione "tradizionale" di convertitori DC-DC, il ripple della corrente rappresenta una specifica di progetto che permette il dimensionamento dell'induttore. Nel caso della progettazione di un convertitore SMPPT, le condizioni ambientali variabili si traducono in un ripple di corrente anch'esso di ampiezza variabile. Occorre, quindi, calcolare il ripple di corrente dell'induttore, scelto casualmente dal tool, nelle diverse condizioni di funzionamento, mediante la seguente equazione.

$$\Delta i_{Lpp} = \frac{V \cdot D}{f_s \cdot L} \quad (3)$$

dove V è la tensione, D è il duty cycle,  $f_s$  è la frequenza di switching e L è l'induttanza.

E' possibile, poi, valutare la corrente massima di induttore a partire dal valore del ripple e dalla corrente del generatore fotovoltaico (Eq.4).

$$I_{MAX} = I_{FV} + \max\left(\frac{\Delta i_{Lpp}}{2}\right) \quad (4)$$

Bisogna, a questo punto, verificare che, anche nella condizione di funzionamento più stringente, la corrente di saturazione dell'induttore, indicata dal costruttore e riportata nel database, sia superiore alla  $I_{MAX}$  con un margine di sicurezza  $\alpha$ .

$$I_{sat} > \alpha I_{MAX} \quad (5)$$

Vincoli progettuali per i componenti switching

La “feasibility” dei componenti switching selezionati in maniera random dal tool può essere verificata controllando il soddisfacimento dei due seguenti vincoli.

- la tensione di rate di ciascun MOSFET deve essere superiore a quella massima cui il componente può lavorare nel circuito con un margine di sicurezza  $\alpha_V$ :

$$V_{DS} > \alpha_V V \tag{6}$$

- la corrente di rate del MOSFET deve superare la massima corrente di lavoro del componente con un margine di sicurezza  $\alpha_I$ :

$$I_{MOS} > \alpha_I \cdot (\max(I) + \Delta i_{max}) \tag{7}$$

Vincoli progettuali per i componenti capacitivi

In maniera analoga ai componenti magnetici e switching, anche per i componenti capacitivi devono essere verificati alcuni vincoli.

Il condensatore in ingresso e uscita dal convertitore sono componenti feasible per il progetto se risultano soddisfatte le seguenti specifiche:

- il ripple della tensione  $\Delta v$  deve essere inferiore al massimo ripple (Eq.8) ottenuto nelle diverse condizioni di funzionamento considerate:

$$\Delta v < \beta \frac{ID}{Cf_s} \tag{8}$$

dove I è la corrente, D è il duty,  $f_s$  è la frequenza di switching e C è la capacità del condensatore,  $\beta$  è il margine di sicurezza.

- la tensione di rate del condensatore  $V_C$  deve superare la massima tensione di lavoro V del componente con un margine di sicurezza  $\gamma$ :

$$V_C > \gamma V \tag{9}$$

- il condensatore deve essere scelto in modo che il valore efficace della corrente di rate  $I_{RMS}$  sia maggiore della più grande corrente efficace  $I_{RMSMAX}$  che lo attraversa nelle condizioni operative considerate:

$$I_{RMS} > I_{RMSMAX} \tag{10}$$

Nel caso in cui il singolo condensatore scelto soddisfi i primi due vincoli, ma non il terzo, il tool di progettazione individua una combinazione serie/parallelo di condensatori identici in grado di rispettare il requisito sulla massima corrente efficace.

Il soddisfacimento dei vincoli riportati assicura, con un certo margine di sicurezza, il rispetto dei rate di ciascun componente del convertitore SMPPT. Qualora, invece, anche uno solo dei vincoli relativi a un dispositivo non sia soddisfatto, il tool RET procede con una nuova scelta casuale nel database e con la successiva verifica dei vincoli fino all’individuazione di un set di componenti feasible.

## 5.1 Ciclo termico per componenti magnetici, switching e capacitivi

A valle del calcolo della  $T_{\text{retroFV\_MAX}}$ , rappresentativa della situazione più gravosa dal punto di vista termico per il convertitore, viene eseguito un primo ciclo termico, mediante il quale viene studiato il comportamento dei componenti elettronici in tali condizioni operative.

Consideriamo, in primis, i componenti switching, che sono molto sensibili ai fenomeni termici [4], ed hanno un ruolo determinante ai fini del corretto funzionamento del convertitore. A ciò bisogna aggiungere che l'aliquota maggiore delle potenza dissipata in un convertitore DC-DC è legata alle perdite per conduzione e commutazione dei dispositivi switching presenti nel circuito.

Nel dettaglio, i dispositivi switching utilizzati nei convertitori di nostro interesse sono di tipo MOSFET. Il costruttore inserisce, nel datasheet, i valori dei principali parametri e le curve che si ottengono alla temperatura di 25°C. Nelle seguenti figure sono indicati, a titolo di esempio, i valori della resistenza Drain-Source  $R_{\text{DSon}}$  e della tensione di soglia  $V_{\text{th}}$  del MOSFET, rispettivamente a 25°C e alla  $T_{\text{retroFV\_MAX}}$  di 80°C, nel caso dell'OptiMOS®-T Power-Transistor IPD70N10S3-12 della Infineon Technologies [5].

Dall'analisi dei grafici è possibile notare un incremento della  $R_{\text{DSon}}$  del 40% e una diminuzione della  $V_{\text{th}}$  del 15%.

Ciò significa che, se in maniera semplicistica, considerassimo le sole perdite per effetto Joule nel MOSFET, si verificherebbe un incremento delle stesse del 40% rispetto alla stessa valutazione effettuata utilizzando il valore del parametro fornito nel datasheet. In realtà, l'incremento è maggiore perché, nel modello complessivo del convertitore sviluppato, le non idealità di uno dei dispositivi sono correlate anche a quelle degli altri componenti, per cui l'aumento della  $R_{\text{DSon}}$  andrà ad inficiare anche il comportamento e le perdite degli altri dispositivi del circuito con ricadute negative sul rendimento complessivo del convertitore.

In riferimento al decremento della  $V_{\text{th}}$ , questo fenomeno provoca l'accensione del dispositivo ad una tensione inferiore a quella dichiarata nel datasheet. Tale valore deve necessariamente essere noto al progettista per regolare opportunamente i tempi di accensione e spegnimento dei diversi dispositivi switching onde evitare danneggiamenti a causa di fenomeni di shoot through.

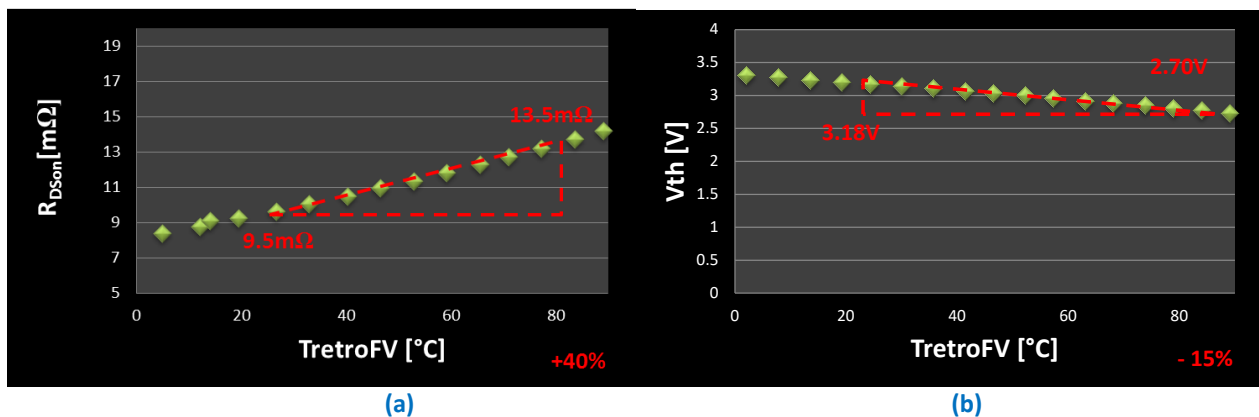


Figura 12.(a) Grafico  $R_{\text{DSon}}$ ;(b) Grafico  $V_{\text{th}}$  del MOSFET in funzione della temperatura.

Ai fini di uno studio accurato, oltre a quanto riportato in precedenza, è necessario specificare che la temperatura e, soprattutto, le sue variazioni influenzano la mobilità dei portatori di carica dei dispositivi MOSFET. La variazione della mobilità, a seguito di una variazione di temperatura, causa un incremento della resistenza con ulteriore aumento della temperatura del componente elettronico.

A ciò bisogna aggiungere che le capacità che caratterizzano il MOSFET risentono dell'effetto termico. In particolare, le capacità dell'ossido di silicio  $\text{SiO}_2$  sottostante la gate sono caratterizzate da un coefficiente termico compreso tra i 10 e i 20 ppm, mentre la capacità di Miller dipende, solo in misura minima, dalla temperatura.

La criticità della corretta determinazione di modelli elettro-termici di tali dispositivi è legata all'esiguità delle informazioni reperibili mediante il datasheet fornito dal costruttore e alla necessità di non incrementare ulteriormente la complessità dell'algoritmo di progettazione.

I grafici presenti nel datasheet dei MOSFET ci permettono di portare in conto essenzialmente l'effetto della temperatura sulla  $R_{DSon}$ , sulla  $V_{th}$  e, talvolta, sulla transconduttanza  $g_{fs}$ . La metodologia applicata è stata quella di valutare, a partire dalle curve disponibili, rispettivamente  $dR_{DS}/dt$ ,  $dV_{th}/dt$  e  $dg_{fs}/dt$  e di inserirli all'interno del database dei MOSFET.

In questo modo, a valle della scelta random del componente, all'interno del ciclo termico, l'algoritmo può determinare il valore dei tre parametri per qualsiasi temperatura, mediante un processo di affinamento iterativo. Uno schema esplicativo viene riportato in Fig.13.

Inizialmente la temperatura di giunzione del MOSFET viene posta pari a 25°C, vengono acquisiti i parametri del dispositivo a tale temperatura dal database e vengono calcolate le perdite di potenza  $P_{MOSloss}$ .

Viene, poi, aggiornata la temperatura di giunzione calcolando la  $T_{j\_FV\_MAX}$  a partire dalle perdite e dalla  $T_{retroFV\_MAX}$ . La  $T_{j\_FV\_MAX}$  è confrontata con la massima temperatura di giunzione indicata dal costruttore, in genere, pari a 175°C. Qualora la  $T_{j\_FV\_MAX}$  calcolata supera la  $T_{j\_MAX}$ , è necessario l'introduzione di un opportuno dissipatore (heatsink) per il MOSFET. In tal caso, l'algoritmo di progettazione provvede al design del convertitore fornendo il valore della resistenza termica dissipatore ambiente  $R_{thda}$  necessaria a garantire il funzionamento del dispositivo ad una temperatura massima pari all'80% di  $T_{j\_MAX}$ .

Nel caso in cui non fosse, invece, necessario il dissipatore, la subroutine "Electro-Thermal design" effettua l'aggiornamento dei parametri mediante le seguenti equazioni e ricalcola il valore di potenza dissipata.

$$R_{DSon}(T_{j\_FV\_MAX}) = R_{DS_{25^{\circ}C}} \left[ 1 + \frac{dR_{DS}}{dT} (T_{j\_FV\_MAX} - 25^{\circ}C) \right] \quad (11)$$

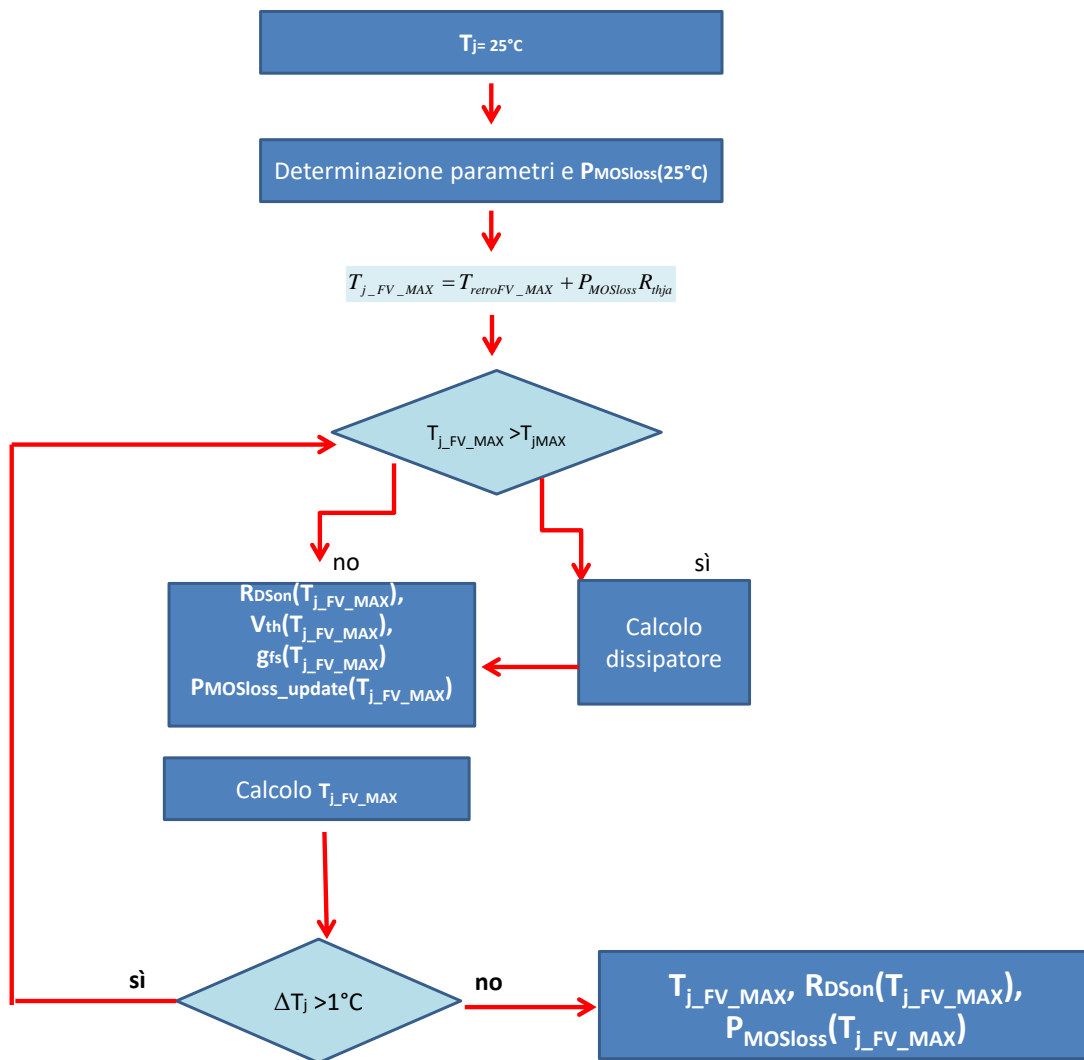
$$V_{th}(T_{j\_FV\_MAX}) = V_{th_{25^{\circ}C}} \left[ 1 + \frac{dV_{th}}{dT} (T_{j\_FV\_MAX} - 25^{\circ}C) \right] \quad (12)$$

$$g_{fs}(T_{j\_FV\_MAX}) = g_{fs_{25^{\circ}C}} \left[ 1 + \frac{dg_{fs}}{dT} (T_{j\_FV\_MAX} - 25^{\circ}C) \right] \quad (13)$$

dove:

- $R_{DSon}$  è la resistenza Drain-Source del MOSFET
- $R_{DS_{25^{\circ}C}}$  è la resistenza Drain-Source del MOSFET ad una temperatura ambiente di 25°C
- $V_{th}$  è la tensione di soglia del MOSFET
- $V_{th_{25^{\circ}C}}$  è la tensione di soglia del MOSFET ad una temperatura ambiente di 25°C
- $g_{fs_{25^{\circ}C}}$  è la transconduttanza del MOSFET ad una temperatura ambiente di 25°C

E' possibile, in tal modo, calcolare nuovamente la temperatura di giunzione. Iterando tale procedimento si perviene ad una valutazione accurata dei parametri, delle perdite e della temperatura del dispositivo e dell'eventuale dissipatore ove necessario.



**Figura 13. Rappresentazione schematica ciclo termico a Tretro\_FV\_MAX.**

A valle della verifica della necessità di utilizzare dissipatori di calore per evitare malfunzionamenti e/o danneggiamenti ai componenti elettronici e al convertitore nella sua totalità, il tool esegue un secondo ciclo termico mediante il quale vengono valutate le prestazioni del convertitore, dotato di eventuali dissipatori, in ognuna delle condizioni di funzionamento indicate dal progettista.

Il procedimento adottato, per ciascuna condizione di lavoro, è sempre quello di affinare la valutazione dei parametri e delle grandezze in esame mediante processi iterativi. La procedura adottata per la valutazione dei parametri e delle grandezze dei convertitori switching, di tipo MOSFET, utilizzati nei convertitori SMPPT, è mostrata in Fig.13. In realtà, processi simili vengono contemporaneamente eseguiti per tutti i dispositivi del convertitore in esame.

In riferimento ai componenti magnetici, un incremento della temperatura provoca una vibrazione degli atomi che determina, a sua volta, variazioni del comportamento magnetico del materiale dovute a direzioni “casuali” dei momenti magnetici. In particolare, i materiali ferromagnetici e quelli ferrimagnetici manifestano una spontanea magnetizzazione a una temperatura inferiore alla temperatura di Curie  $T_c$ . In caso di temperature superiori a  $T_c$ , i momenti magnetici sono orientati casualmente e i materiali diventano paramagnetici. Il valore della  $T_c$  dipende dallo specifico materiale utilizzato.

Nel dettaglio, le proprietà magnetiche influenzate dall'effetto della temperatura sono l'intensità di campo magnetico, la permeabilità magnetica, la forza coercitiva e la resistività e la resistenza degli avvolgimenti in rame. La complessità della modellazione elettro-termica e la relativa implementazione software è determinata dalla dipendenza tra le grandezze menzionate e la temperatura. Materiali magnetici diversi sono, infatti, caratterizzati da dipendenze diverse [8], anche opposte, dalla temperatura, come si evince dalle seguenti figure ( Figg.14 e 15).

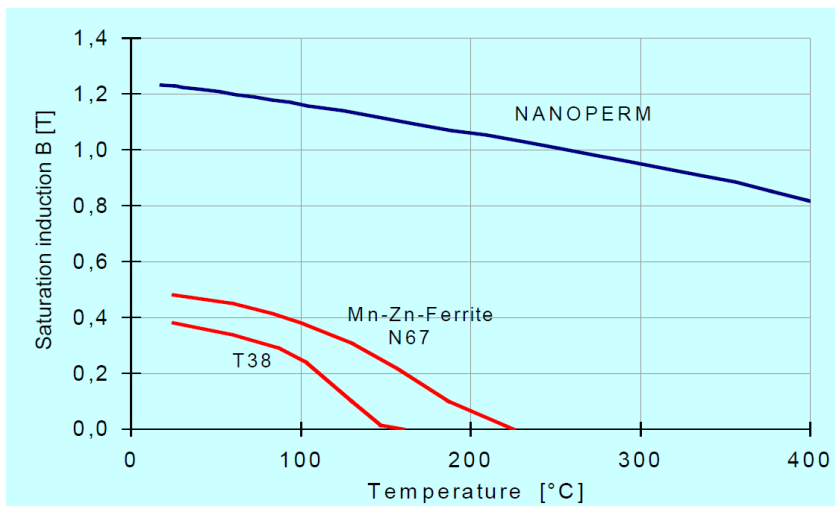


Figura 14. Induzione magnetica B magnetica ferrite/nanocristallo (Magnetec).

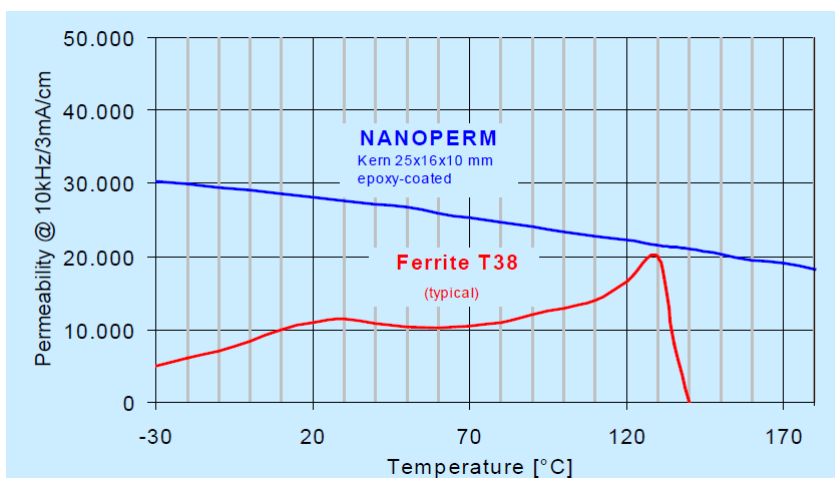


Figura 15. Permeabilità magnetica ferrite/nanocristallo (Magnetec).

Un'altra difficoltà che si incontra nello sviluppo del modello [9] è legata alla difficoltà di reperire tutte le informazioni necessarie dai datasheet messi a disposizione dai costruttori.

Bisogna, infatti, tener presente che non esiste una standardizzazione nella compilazione dei datasheet dei componenti, per cui ogni costruttore fornisce informazioni (dati, curve, etc.) differenti. Nel caso di progettazione "custom" di un induttore a partire dal nucleo commerciale, è possibile reperire alcune delle curve necessarie per studiare la sua dipendenza dalla temperatura. Molto spesso, i costruttori forniscono le curve della permeabilità magnetica in funzione della temperatura da cui è possibile estrapolare le informazioni utili per le condizioni termiche di interesse (Fig. 16).

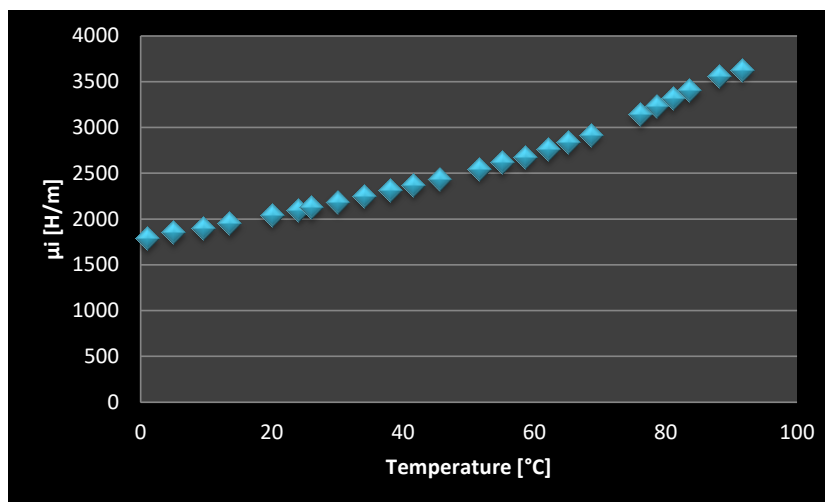


Figura 16. Grafico  $\mu_i$  vs Temperature (Ferroxcube).

Qualora, invece, si proceda con un componente commerciale già progettato, le informazioni specifiche sul nucleo e sugli avvolgimenti utilizzati sono del tutto esigue e non si prestano ad una modellizzazione di dettaglio del componente magnetico.

Nel caso della specifica applicazione dei convertitori SMPPT, il materiale magnetico prevalentemente utilizzato è la ferrite in quanto, alle frequenze di switching e ai valori tipici di  $B_{MAX}$ , essa garantisce buone prestazioni [7].

L'idea alla base dello sviluppo del tool RET è quello di avere a disposizione database di componenti commerciali utilizzabili per il progetto. Si è, quindi, proceduto ad acquisire, dai data sheet, i valori dei parametri degli induttori commerciali di interesse.

In particolare, la subroutine di progettazione "Electro-Thermal design" del tool RET necessita dei valori dell'Equivalent Series Resistance (ESR) e del temperature rise  $T_r$  rispetto a 25°C, cui vengono forniti i rating di corrente del componente [6].

Avendo a disposizione tali informazioni è possibile calcolare il valore della temperatura (Eq.14) a cui effettivamente lavora il componente elettronico e la ESR, a tale temperatura operativa, mediante l'Eq. 15.

$$T_L = T_{retroFV} + T_r * 0,00385 * (234,5 + T_{retroFV}) \quad (14)$$

$$R_L(T) = R_{L,25^\circ C} [1 + \alpha(T_L - 25^\circ C)] \quad (15)$$

Se, infatti, la temperatura operativa è superiore a 25°C, la resistenza degli avvolgimenti è maggiore di quella fornita nel datasheet. Non portare in conto questo incremento della ESR, significa sottostimare le perdite per conduzione del dispositivo e pervenire, quindi, ad una valutazione errata del rendimento del convertitore SMPPT. E', inoltre, opportuno considerare che l'incremento delle perdite, comporta, a sua volta, un aumento della temperatura del componente stesso.

In maniera analoga al caso dei componenti switching (Fig.13), è necessario implementare un opportuno ciclo termico per la valutazione corretta della ESR e della temperatura operativa del componente magnetico. All'avvio del ciclo termico la temperatura dell'induttore è posta pari a 25°C e, conoscendo il valore dei parametri a tale temperatura di riferimento, vengono calcolate le perdite. Viene, poi, aggiornato il valore della  $T_L$  mediante l'Eq. 14, considerando che l'induttore è all'interno della scatola di giunzione posizionata sul retro del modulo/generatore fotovoltaico. E' necessario, quindi, valutare anche la ESR alla nuova  $T_L$  calcolata e aggiornare il valore della potenza dissipata. Esattamente come nel caso dei dispositivi switching, i valori delle grandezze  $R_L$ ,  $T_L$  e delle perdite dell'induttore vengono valutati accuratamente per mezzo di un procedimento iterativo. Tale procedura viene adottata per ciascuna delle condizioni operative prese in considerazione.

I convertitori switching sono caratterizzati, oltre che da MOSFET e componenti magnetici, anche dalla presenza di elementi capacitivi [11] al fine di limitare i ripple di tensione e svolgere azione di filtraggio.

In particolare, nel progetto di un convertitore DC-DC, è necessario individuare condensatori in grado di assicurare il soddisfacimento dei vincoli sul valore RMS della corrente, sulla tensione operativa e sul ripple della tensione. Ricordiamo che l'impedenza di un condensatore può essere modellata mediante un condensatore ideale  $C_R$ , una resistenza  $R_i$ , posta in parallelo, dovuta alla resistenza dell'isolamento. Completano il modello una resistenza serie equivalente  $R_s$  che rappresenta la resistenza delle masse metalliche del dispositivo e un'induttanza serie equivalente  $L_s$  che modella, invece, l'induttanza degli elettrodi, di valore trascurabile a frequenze inferiori alla self-resonant frequency del circuito.

In dettaglio, nell'ambito delle applicazioni fotovoltaiche, la necessità di ottenere convertitori ad alta efficienza indirizza la scelta verso quelle tipologie di condensatori caratterizzati da bassi valori di resistenza serie equivalente. Contestualmente, in fase di individuazione e scelta dell'elemento capacitivo, devono essere rispettati i requisiti termici per il corretto funzionamento del componente e per l'affidabilità complessiva del convertitore SMPPT.

In tale ambito trovano largo impiego i condensatori elettrolitici e quelli in film.

I dispositivi elettrolitici garantiscono un soddisfacente trade-off tra capacità e ingombro, ne sono disponibili tipologie fino a 600VDC a basso costo. Si tratta di dispositivi che risentono, in maniera minore rispetto ai dispositivi switching, della dipendenza della capacità e della resistenza serie dalla temperatura, come mostrato in Figg-17-18. Un parametro determinante è la "useful lifetime" dei condensatori.

Nel dettaglio, la "useful lifetime" dipende dal case del dispositivo, dal ripple di corrente e dalla temperatura. Considerando, a titolo di esempio, il condensatore 136 RVI della Vishay BCcomponents [10] da 220 $\mu$ F, esso è caratterizzato da una useful life di 10000 ore ad una temperatura di 105°C.

Il costruttore fornisce anche informazioni relative alla "useful lifetime" del componente a temperature inferiori e per diversi valori del ripple di corrente mediante la rappresentazione riportata in Fig.19.

Si può osservare che, in una condizione di worst case per il condensatore, in cui il dispositivo lavora permanentemente a 70°C, la sua "useful lifetime" sarà di circa 40000 ore. Tale valore risulta poco significativo per la specifica applicazione di interesse, giacché, negli ambiti considerati, il componente non si troverà mai a funzionare con una temperatura costantemente pari a 70°C.

D'altra parte, il grafico della Fig.19 ci permette anche di evidenziare che, qualora si riesca a far funzionare il condensatore ad una temperatura minore o al più uguale a 55°C, la sua useful life raggiunge le 300000 ore pari circa a 30 anni di funzionamento continuo.

Un'alternativa ai componenti elettrolitici è rappresentata dai condensatori in film caratterizzati da valori di  $R_i$  anche decine di volte più piccoli di quelli di un condensatore elettrolitico, avente stesso rapporto Capacità-Tensione, da ripple di corrente circa nove volte maggiori e da useful-life anche quattro volte superiore. D'altro canto, i dispositivi elettrolitici hanno un ingombro dieci volte più piccolo di quelli in film e un costo di gran lunga più basso. La scelta è, quindi, sempre un compromesso tra esigenze contrastanti. Utilizzando il metodo evolutivo, il progettista non effettua alcuna scelta a priori, ma individua, attraverso il tool RET, i componenti più adatti per le soluzioni più performanti. Resta, comunque, da sottolineare che l'aspetto economico dei condensatori in film incide notevolmente sul costo complessivo del convertitore.



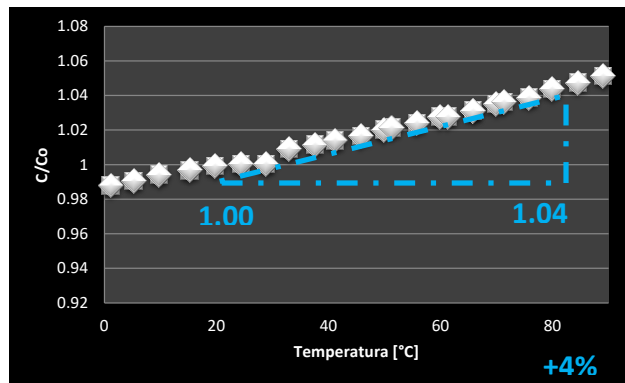


Figura 17. Grafico C/Co vs Temperature (Vishay).

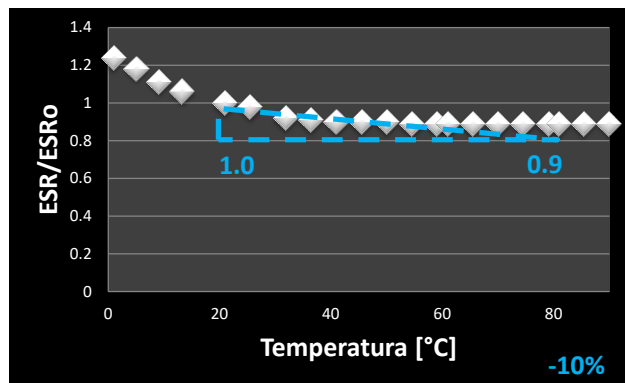


Figura 18. Grafico ESR/ ESR o vs Temperature (Vishay).

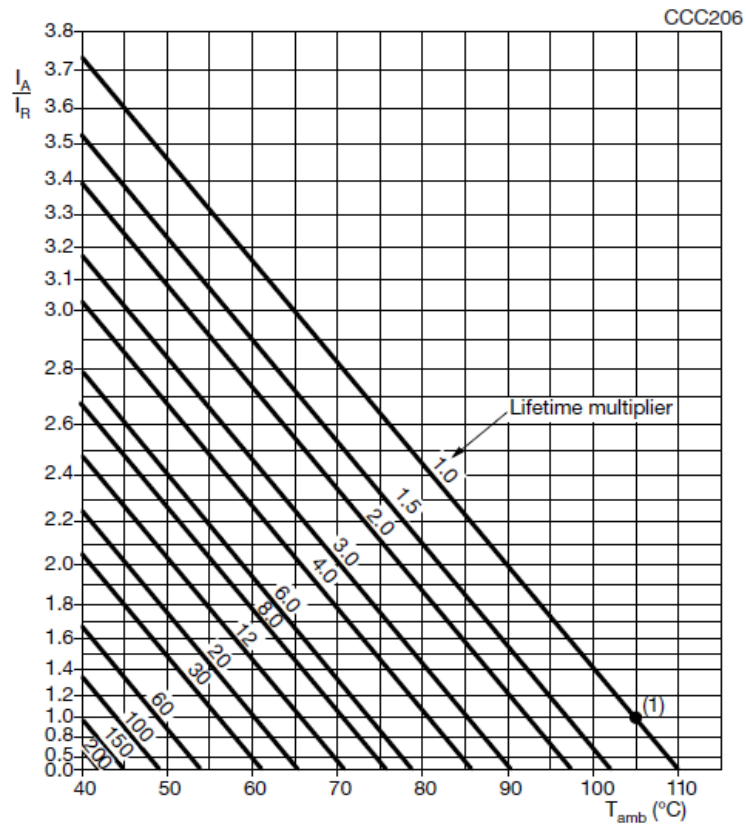


Figura 19. Grafico Useful Lifetime Elettrolitici vs Temperature (Vishay).

Ritornando al ciclo termico, nel tool realizzato, vengono tenute in conto le dipendenze e le variazioni che i parametri dei dispositivi subiscono nelle diverse condizioni operative.

In questo modo, al termine della subroutine "Electro-Thermal design", sono noti i valori della funzione di merito  $\eta_{\text{SMPPPT}}$  e i parametri caratteristici dei dissipatori di calore, se necessari, come schematicamente riportato in Fig.7.

## 6 Standard e procedure per la valutazione affidabilistica

L'analisi dei diversi Reliability Prediction model disponibili ha permesso di studiare gli standard utilizzati in ambito militare e industriale. Bisogna tener presente che tali modelli non contemplano esplicitamente i contesti operativi e i relativi dati di funzionamento, in campo o in laboratorio considerati in quest'attività di ricerca. A riguardo è stata definita e sviluppata la procedura e la subroutine dedicata "Reliable-Thermal design", schematicamente rappresentata nella seguente figura, per la valutazione dell'affidabilità di un convertitore SMPPT.

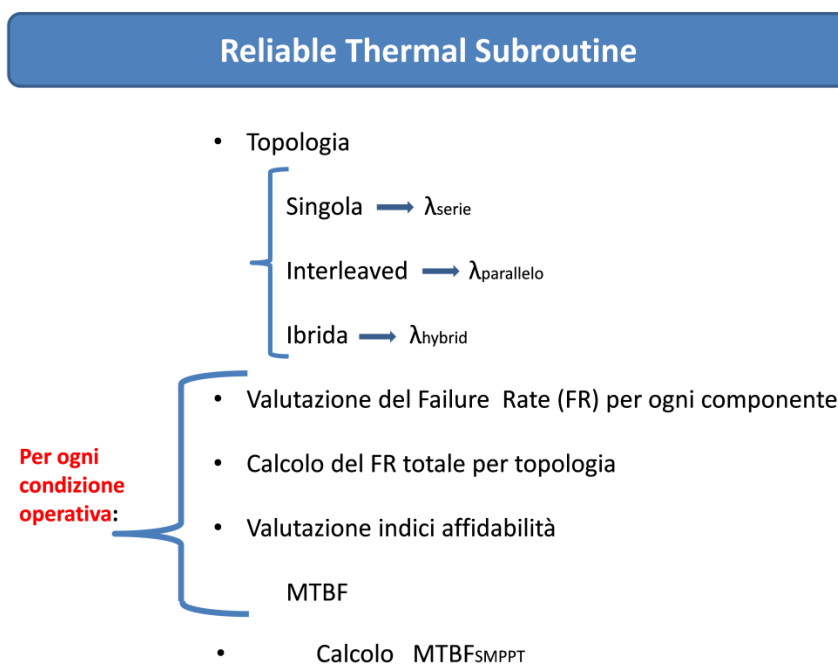


Figura 20. Schema sintetico Reliable-Thermal subroutine.

Il tool avvia la procedura riportata schematicamente in Fig.20, acquisendo informazioni sulla topologia del convertitore selezionata dal progettista. Il software classifica, infatti, le topologie come singole, interleaved e ibride. In tal modo, a secondo della struttura del convertitore e della topologia di connessioni tra i dispositivi utilizzati, viene definita la formula per il calcolo del failure rate del convertitore. Si procede con la valutazione del tasso di guasto di ciascun componente elettronico per ciascuna condizione operativa esplicitata in termini di  $T_{\text{retroFv}}$ . In dettaglio, tra gli standard analizzati, il RIAC Handbook 217Plus [16-20] è stato ritenuto particolarmente idoneo per il calcolo dell'affidabilità di un sistema funzionante e operante in condizioni continuamente variabili come quelli di interesse. Tale modello, essendo di estrazione militare, fornisce valutazioni stringenti delle prestazioni di un dispositivo in riferimento agli ambiti applicativi critici cui è destinato.

E' bene ricordare che l'approccio seguito dal modello RIAC 217Plus per quantificare il failure rate dei componenti si basa sulla combinazione di termini additivi. Ciascun termine rappresenta una condizione di funzionamento (operating, non operating, cycling) in cui possono verificarsi determinati meccanismi di guasto. Questi ultimi sono legati agli stress che il dispositivo subisce e vengono rappresentati mediante termini moltiplicativi di tipo  $\pi$ .

Uno dei fattori maggiormente influenti sulla valutazione di affidabilità è rappresentato dalla temperatura. Come evidenziato nella formula RIAC del failure rate di un dispositivo MOSFET, riportata nell'Eq.16, l'influenza dello stress termico sul comportamento del dispositivo viene considerato per ciascuna delle modalità (operating, non operating, cycling) considerate.

$$\lambda_{MOS} = \pi_G (\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TO} \tau_s + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} + \lambda_{TCB} \pi_{CR} \pi_{DT}) + \lambda_{SJB} \tau_{SJDT} + \lambda_{EOS} \quad (16)$$

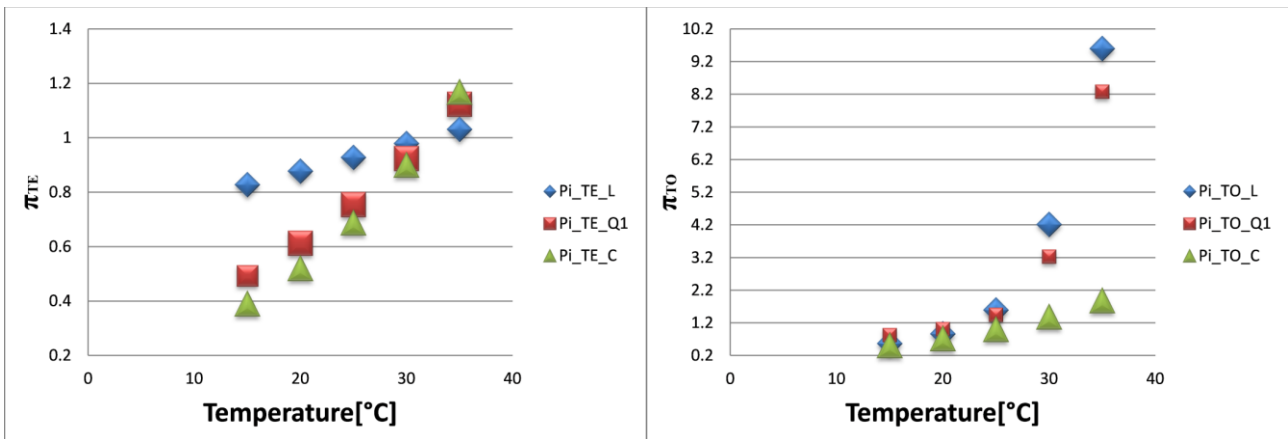
dove:

$\lambda_{OB}$	tasso di guasto base in condizioni operative
$\lambda_{EB}$	tasso di guasto base, fattore ambientale
$\lambda_{TCB}$	tasso di guasto base, Temperature Cycling
$\lambda_{SJB}$	tasso di guasto base, saldature
$\lambda_{EOS}$	tasso di guasto, OverStress Elettrici
$\pi_{DCO}$	fattore per Duty Cycle, condizioni operative
$\pi_{TO}$	fattore effetto termico, condizioni operative
$\pi_{DCN}$	fattore per Duty Cycle, condizioni non operative
$\pi_{TE}$	effetto termico, fattore ambientale
$\pi_{CR}$	fattore per Cycling Rate
$\pi_{DT}$	fattore per delta Temperatura
$\pi_{SJDT}$	fattore per variazioni termiche dei punti di saldatura.

Tale osservazione può essere ripetuta per ciascuna tipologia di dispositivi presenti nel convertitore.

Al fine di comprendere quanto il fattore termico incida sulla reliability dei dispositivi utilizzati in convertitori SMPPT, sono riportati, in Fig.21, i grafici di  $\pi_{TE}$  e  $\pi_{TO}$  in funzione della temperatura.

Si osserva che i dispositivi switching e quelli magnetici risultano più sensibili ai fenomeni termici degli elementi capacitivi e come l'effetto della temperatura è particolarmente accentuato nel caso di componenti elettronici in operating mode. E', quindi, opportuno ragionare, anche in questo caso, su valori di temperatura precisi, come quelli calcolati nella precedente subroutine nel caso dei  $T_{retroFV}$ .



(a) Grafico  $\pi_{TE}$  vs Temperature; (b) Grafico  $\pi_{TO}$  vs Temperature.

Ritornando alle fasi operative della subroutine “Reliable-Thermal design”, riportate in Fig.20, si evidenzia che il tool effettua l’opportuna combinazione dei singoli failure rate calcolati al fine di quantificare il tasso di guasto del convertitore in esame.

A partire dal  $\lambda_{converter}$  si passa, poi, alla fase di valutazione del Mean Time Between Failure (MTBF) del convertitore SMPPT nella singola condizione di funzionamento. In seguito, si procede, poi, con il calcolo del MTBF<sub>SMPPT</sub> “ponderato” (Eq. 17) come figura di merito rappresentativa del funzionamento del convertitore nelle diverse condizioni operative.

$$MTBF_{SMPPT} = \beta_1 MTBF_1 + \beta_2 MTBF_2 + \dots + \beta_N MTBF_N \quad (17)$$

dove:

-MTBF<sub>1</sub>, MTBF<sub>2</sub>,..., MTBF<sub>N</sub> sono i valori di affidabilità del convertitore SMPPT calcolati in corrispondenza delle N condizioni operative significative

- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$  sono i “pesi” che indicano la frequenza con cui ciascuna delle condizioni di funzionamento considerate si verifica.

Al termine, si ottiene, quindi, il valore di MTBF<sub>SMPPT</sub> del singolo individuo della popolazione. Come schematicamente riportato nella seguente figura, il tool RET fornisce le funzioni di merito, calcolate nelle precedenti subroutine (MTBF<sub>SMPPT</sub>,  $\eta_{SMPPT}$ ,  $p_{SMPPT}$ ), all’algoritmo di ottimizzazione che le utilizzerà per discriminare le soluzioni dominanti da quelle dominate.

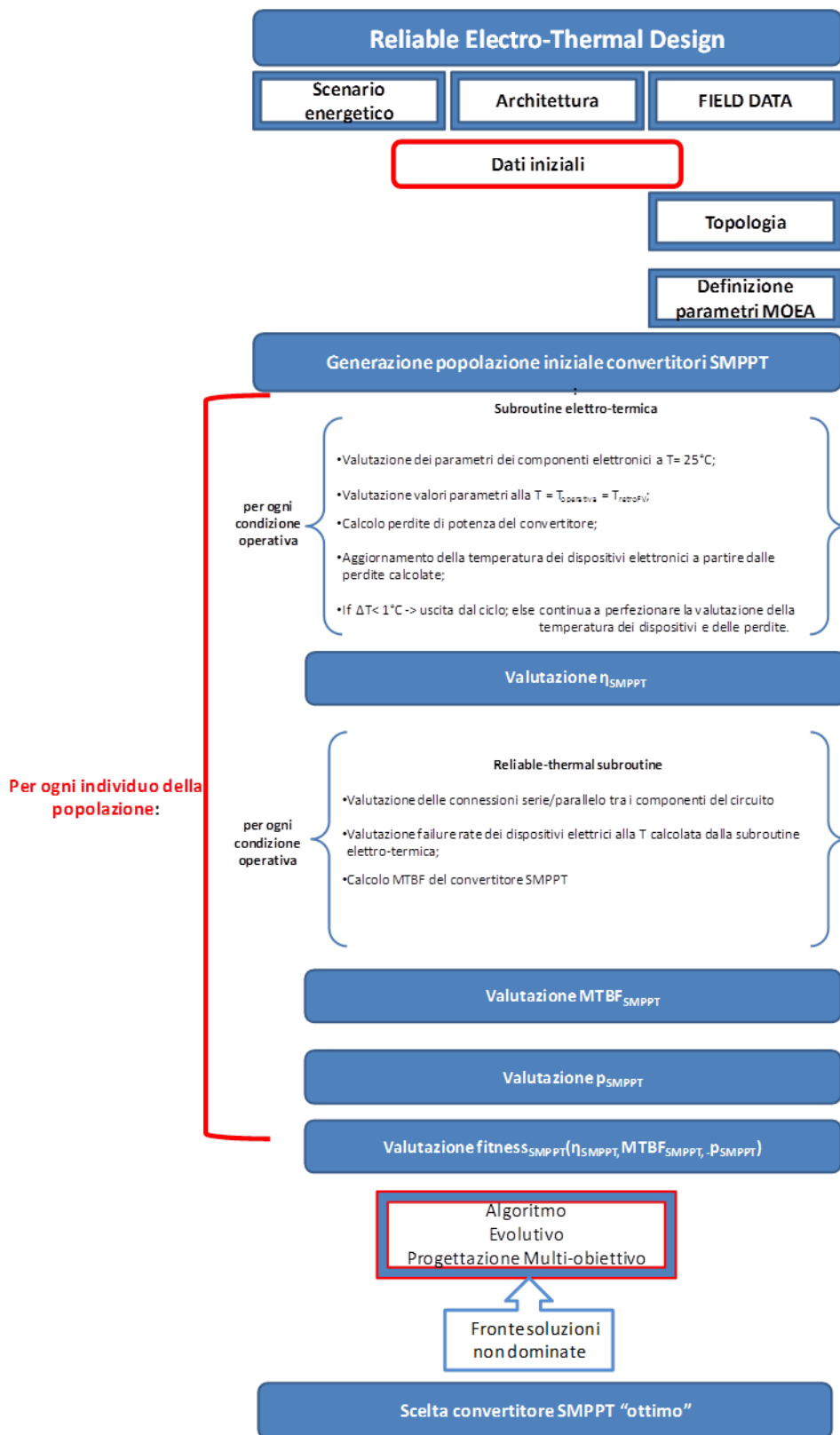


Figura 22. Schema sintetico del tool RET.

## 7 Visualizzazione delle soluzioni di progetto mediante GUI

Al termine dell'algoritmo di ottimizzazione, la GUI realizzata procede alla visualizzazione (Figg. 23-24) delle soluzioni dominate e dominanti ottenute.

Esse vengono rappresentate mediante tre grafici differenti. Il fronte di Pareto viene, infatti, visualizzato sia nello spazio tridimensionale delle soluzioni (Affidabilità, Efficienza, Costo), sia mediante rappresentazione bidimensionale con i grafici costo-affidabilità e costo-efficienza. Dato che il numero delle soluzioni può essere elevato, tutti i grafici possono essere ruotati e zoomati per consentire una maggiore facilità di lettura dei risultati

Ogni soluzione è contraddistinta da un numero in modo da agevolare l'identificazione dei relativi componenti elettronici mediante la rappresentazione tabellare a video o la creazione di un apposito file su richiesta.

All'interno dell'area di rappresentazione dei risultati è presente, in basso a sinistra, una sezione identificata come «parameters section» nella quale, durante il successivo upgrade della GUI, saranno riportati i parametri caratteristici dell'algoritmo di ottimizzazione selezionato (dimensione popolazione, percentuale di mutazioni, numero di generazioni, etc).

Nella seguente figura vengono mostrati i risultati ottenuti in seguito all'esecuzione del software RET scegliendo, dapprima, l'algoritmo SPEA-II per l'ottimizzazione e, successivamente, l'algoritmo NSGA-II, con riferimento ad uno specifico caso studio. Nel caso in esame lo scenario energetico selezionato dal progettista consiste in una installazione fotovoltaica grid connected da 5,5kW<sub>p</sub>. Tale impianto è costituito da moduli fotovoltaici da 225W, modello 1STH-225P della Solitech.

L'architettura è caratterizzata da convertitori SMPPT di tipo distribuito e la topologia è di tipo Synchronous boost. Le condizioni ambientali considerate fanno riferimento ad un profilo di tipo nuvoloso.

Il tool RET, a partire dai database dei componenti commerciali, seleziona in modo random i dispositivi per la topologia scelta ed avvia lo scambio di dati e parametri tra l'algoritmo di ottimizzazione e quello di progettazione al fine di verificare, per ciascun elemento della popolazione, il soddisfacimento dei vincoli di progetto e la dipendenza dei dispositivi dalla temperatura. L'esecuzione della subroutine "Electro-Thermal design" consente l'eventuale dimensionamento del dissipatore di calore per i dispositivi switching del convertitore e ne valuta il rendimento ponderato  $\eta_{SMPPT}$ .

A seguire, la subroutine "Reliable-Thermal design" effettua la valutazione della struttura e del tipo di connessioni che caratterizzano la topologia scelta, calcola i singoli failure rate e, poi, valuta il MTBF del convertitore per ciascuna delle condizioni di funzionamento considerate.

La fase successiva prevede il calcolo del prezzo del convertitore. Quando questo processo è stato ultimato e le tre funzioni di merito sono state calcolate per tutti gli individui della popolazione iniziale, esse vengono trasferite all'algoritmo di ottimizzazione, che attraverso i passaggi precedentemente descritti, perviene al fronte delle soluzioni dominanti. Ciascuna di queste soluzioni rappresenta un trade-off tra le specifiche richieste in termini di efficienza, affidabilità e prezzo. Ogni soluzione garantisce un determinato livello prestazionale, privilegiando uno dei requisiti rispetto agli altri due o assicurando una condizione equilibrata e di miglior compromesso tra i diversi requisiti. Nelle seguenti figure sono rappresentati i risultati ottenuti, attraverso il tool RET, per i due algoritmi di ottimizzazione considerati.

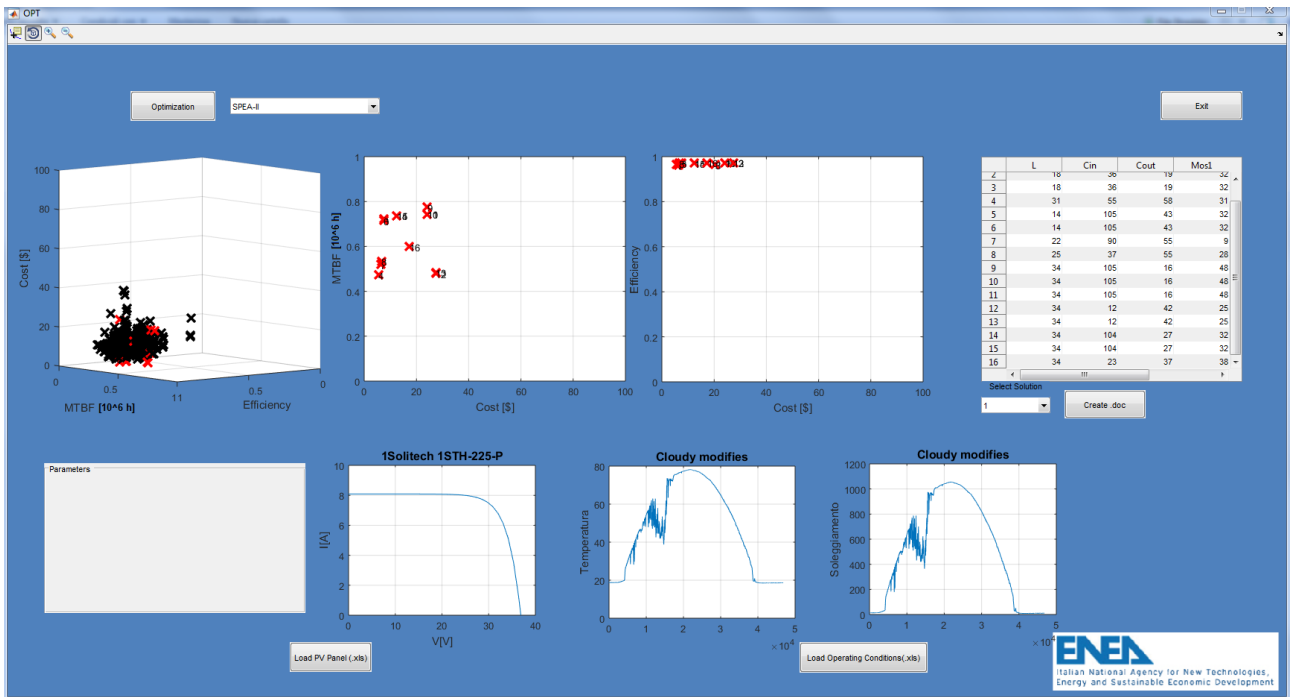


Figura 23.RET rappresentazione primi risultati SPEA-II.

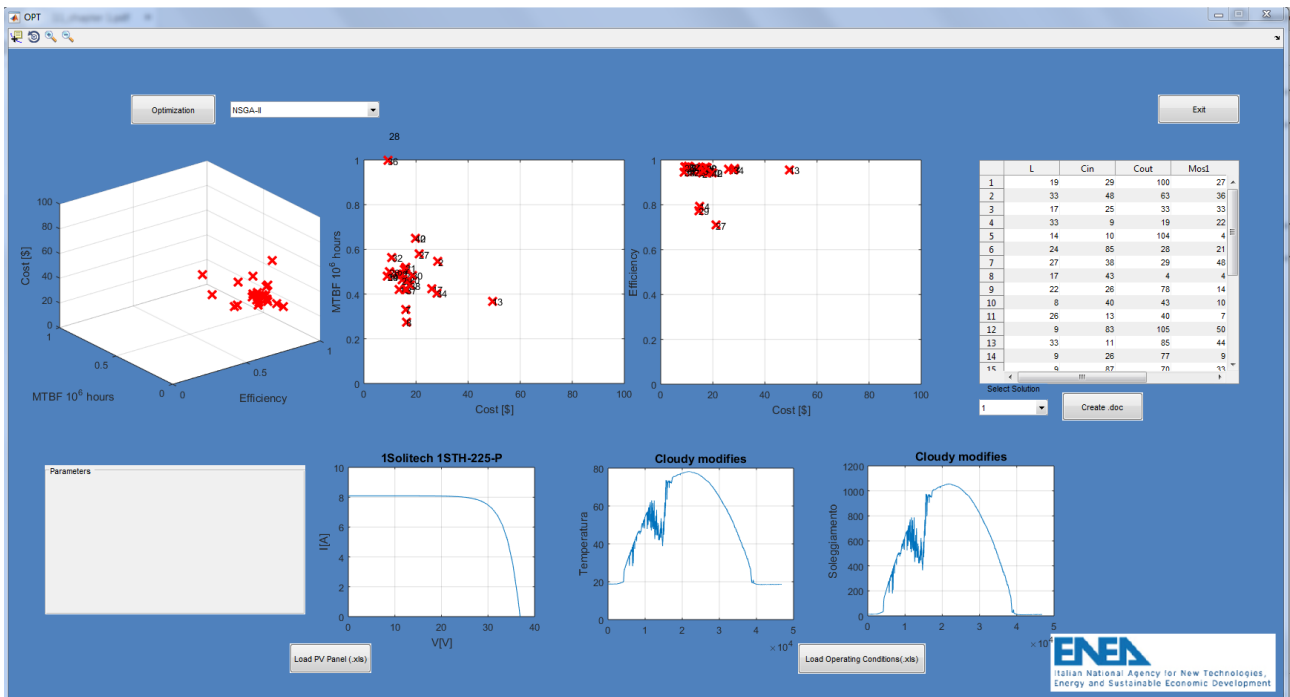


Figura 24.RET rappresentazione primi risultati NSGA-II.

Le seguenti figure mostrano le soluzioni ottenute nel caso di algoritmo SPEA-II.



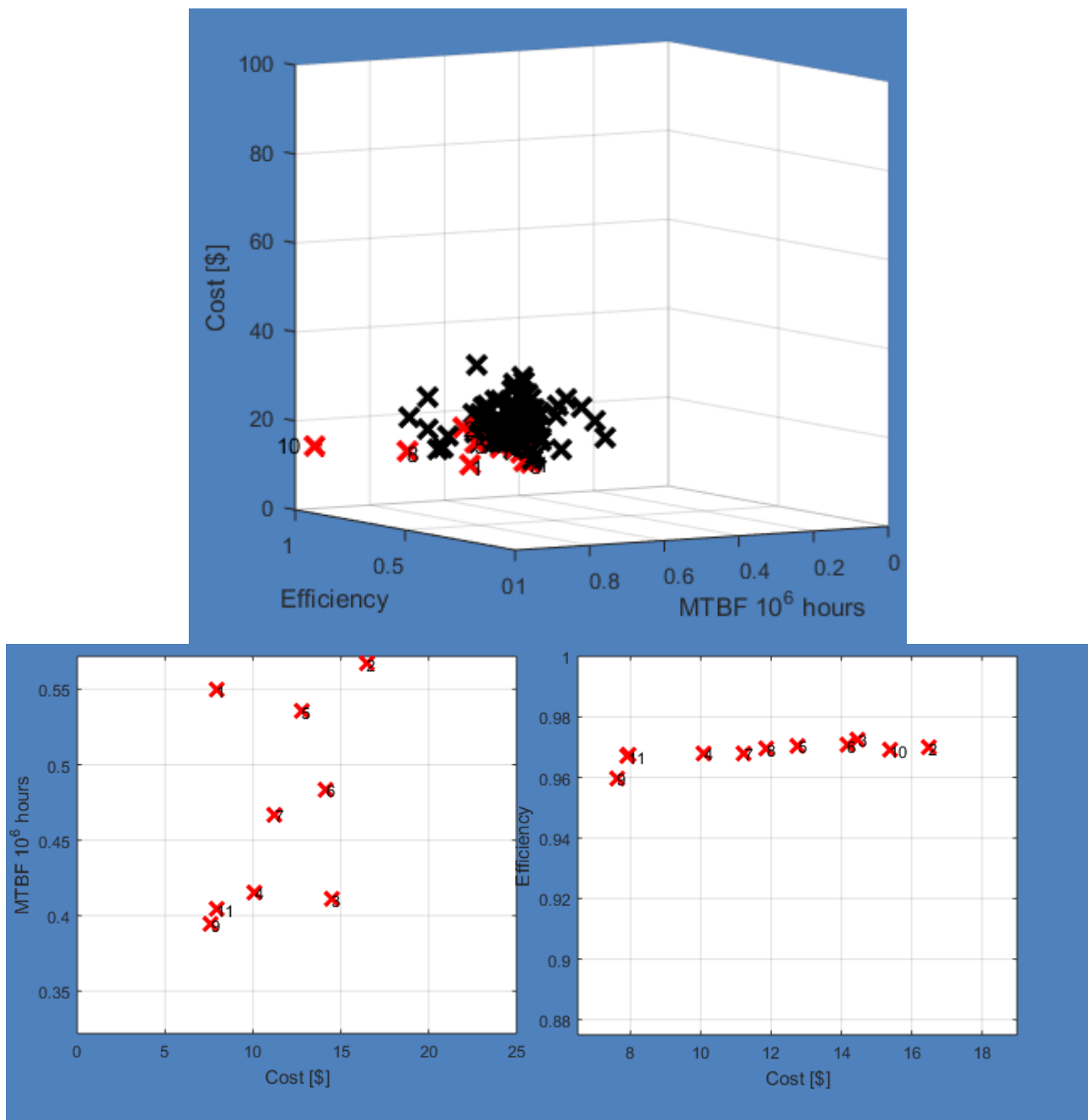
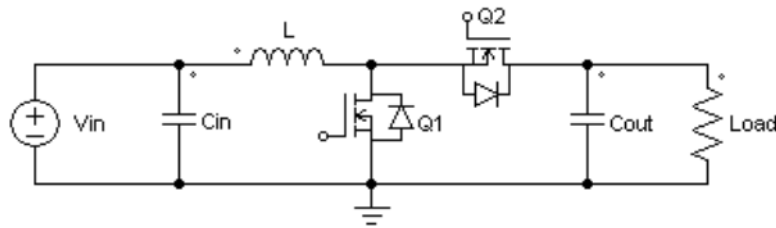


Figura 25. Dettaglio soluzioni SPEA-II.

Il grafico tridimensionale rappresenta sia le soluzioni dominanti (in rosso) sia quelle dominate (in nero). Le rappresentazioni in 2D forniscono dettagli quantitativi sui livelli prestazionali delle soluzioni individuate. Da questi primi risultati si evince che il fronte di Pareto contempla soluzioni caratterizzate da un'efficienza nel range 96,0-97,1%, da un MTBF compreso tra  $0,39 \cdot 10^6$  ore e  $0,57 \cdot 10^6$  ore e un prezzo del power stage inferiore ai 20 euro.

In seguito alla determinazione dei fronti delle soluzioni, il progettista, analizzando il ventaglio delle migliori soluzioni ed essendo a conoscenza di quale specifica privilegiare, sceglie il set di componenti elettronici per ottenere un convertitore SMPPT dalle prestazioni "ottime". In questo caso, il progettista potrebbe ritenere "ottima" la soluzione n°6 con un'efficienza del 97%, un MTBF di  $0,48 \cdot 10^6$  ore e un prezzo di circa 14 euro. Tale convertitore SMPPT di tipo Synchronous boost (Fig.26) risulta costituito da un condensatore del filtro d'ingresso di 470  $\mu$ F, un induttore da 47  $\mu$ H e un condensatore in uscita da 68  $\mu$ F. Il MOSFET Low Side selezionato è il dispositivo SiR846DP (100V-60A) della Vishay, mentre l'High Side MOSFET è il componente

FDP047AN08A0 (75V-80A) della On Semiconductor, rispettivamente caratterizzati da un  $R_{Dson}$  di 7,8 mOhm e 4,7mOhm a 25°C.



**Figura 26. Synchronous boost converter.**

Nel prosieguo dell'attività di ricerca saranno condotte simulazioni circuitali al fine di validare il progetto ottenuto e di verificarne le prestazioni nelle diverse condizioni operative considerate.

## 8 Conclusioni

Nel presente documento vengono presentate le attività svolte durante il secondo anno dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA.

La progettazione ottimizzata di convertitori SMPPT dedicati a generatori fotovoltaici per l'impiego in contesti energetici, quali installazioni grid-connected e stand-alone, micro-grid e Net Zero Energy Building, può essere effettuata mediante il tool informatico RET. Durante il precedente PAR sono stati analizzati diversi tipi di algoritmi evolutivi al fine di comprenderne funzionalità, caratteristiche, potenzialità e criticità. Nell'annualità in corso l'attenzione è stata concentrata sull'implementazione di due algoritmi evolutivi per la fase di ottimizzazione mediante RET: si tratta, in particolare, degli algoritmi SPEA-II e NSGA-II che rappresentano i metodi evolutivi maggiormente utilizzati nell'ambito delle tecniche e strategie multi-obiettivo.

E' stato affrontato, anche, lo studio della sensibilità dei componenti elettronici ai fenomeni termici. In particolare, è stata implementata la subroutine "Electro-Thermal design" che, a partire dalla conoscenza dei componenti elettronici utilizzati per una specifica topologia di convertitore e delle condizioni operative, determina, mediante un processo iterativo, i valori delle temperature di lavoro, dei parametri caratteristici e delle perdite dei dispositivi. Si ottengono, in questo modo, valutazioni quantitative che consentono di calcolare il rendimento "pesato"  $\eta_{SMPPT}$  per il convertitore SMPPT nella sua interezza.

E' stata, inoltre, sviluppata ed implementata anche la subroutine "Reliable-Thermal design" che consente il calcolo dei failure rate dei sottosistemi costituenti il convertitore considerato, fino alla combinazione degli stessi per ottenere il  $MTBF_{SMPPT}$  complessivo del convertitore

Le funzioni di merito  $\eta_{SMPPT}$  e  $MTBF_{SMPPT}$ , insieme al prezzo del convertitore  $p_{SMPPT}$ , rappresentano le informazioni necessarie per l'esecuzione dell'algoritmo di ottimizzazione che, a partire dalla popolazione iniziale, fornisce il fronte di Pareto delle soluzioni non dominate. E', infine, l'intervento del progettista a decidere quale sia la soluzione ottima tra quelle del fronte. In ultimo, è stato presentato il caso studio relativo all'individuazione del convertitore Synchronous boost "ottimo", per un'applicazione fotovoltaica da 5,5 kW<sub>p</sub>, mediante l'utilizzo del tool RET e l'impiego dell'algoritmo SPEA-II per l'ottimizzazione multi-obiettivo.

Nel corso della terza annualità di ricerca saranno effettuate simulazioni circuitali al fine di validare i modelli utilizzati e sarà completato lo sviluppo della piattaforma di progettazione RET, includendo tutti gli scenari energetici contemplati.

il tool RET sarà anche corredato con componenti, parametri e modelli di dispositivi switching basati su nuovi materiali (carburo di silicio, etc.), anche sulle base dei risultati delle attività di ricerca condotte, nell'ambito del PAR, dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, delle Infrastrutture e dell'Energia Sostenibile (DIIES) dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria. Sarà, quindi, possibile utilizzare la piattaforma RET anche per la progettazione "ottima" di convertitori SMPPT che utilizzano dispositivi switching basati su materiali e tecnologie innovative.

## 9 Riferimenti bibliografici

1. C. Cecati, H. A. Khalid, M. Tinari, G. Adinolfi, G. Graditi, "DC nanogrid for renewable sources with modular DC/DC LLC converter building block", IET Power Electronics, Volume 10, Issue 5, April 2017, NY.
2. G. Graditi, S. Ferlito, G. Adinolfi, "Comparison of photovoltaic plant power production prediction methods by using a large measured dataset", Renewable energy Journal, Volume 90, May 2016, NY.
3. H. Mejbri, K. Ammous, H. Morel, A. Ammous, "Optimal design of power converter using multi-objective genetic algorithm", International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), Volume 5, Issue 2, April 2012.
4. M. März, "Thermal Modeling of Power Electronic Systems", Infineon Technologies AG, Munich.
5. Infineon Technologies, "OptiMOS®-T Power-Transistor IPD70N10S3-12", <https://www.infineon.com/>.
6. Coilcraft, "Current and Temperature Ratings, Document 361-1", 2008, <http://www.coilcraft.com/>.
7. Ferroxcube, "Datasheet 3C90" <http://www.ferroxcube.com>.
8. MAGNETEC, [www.magnetec.de](http://www.magnetec.de), Techn. Product Information "Comparison NANOPERM Ferrite", 2005.
9. Hilal, "Magnetic components modeling including thermal effects for DC-DC converters virtual prototyping", Document, 2014.
10. Vishay, "Datasheet 136 RVI Aluminum Electrolytic Capacitors Radial Very Low Impedance", <http://www.vishay.com>.
11. M. Catelani, L. Ciani, R. Singuaroli, A. Mannucci, "Electrolytic Capacitor Lifetime Prediction in Ground Mobile Applications", 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety, June 26-27, 2014, Warsaw, Poland.
12. K. Deb, "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms", John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA ©2001, ISBN:047187339X.
13. H. Visairo, M.A. Medina, J.M Ramirez, "Use of Evolutionary Algorithms for Design Optimization of Power Converters", 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers, 27 - 29 Feb 2012 Mexico, vol.1, pp .268-272, 2012.
14. E. Zitzler, M. Laumanns, L. Thiele, "SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm", Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems Conference, 19-21 September 2001, vol.1, pp. 1-21, 2001.
15. G. Lesinski, "Application of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA2) Approach to Rail Repair Investments", Department of System Engineering United States Military Academy-West Point, 2016, NY.

16. C. Groşan, D.Dumitrescu, "A comparison of multiobjective evolutionary algorithms", Acta Universitatis Apulensis Document, Mathematics – Informatics,2002.
17. Handbook of 217 "Plus™ Reliability Prediction Models", Dec. 2014, Quanterion Solutions, New York.
18. M. Held, and K. Fritz, "Comparison and evaluation of newest failure rate prediction models: FIDES and RIAC 217Plus", Microelectronics Reliability, Volume 49 Issue 1, 2009,NY.
19. D. Nicholls, "An Introduction to the RIAC 17Plus™ Component Failure Rate Models", Journal of the Reliability Information Analysis Center, First Quarter 2007, NY.
20. D. Nicholls, "The 217Plus™ Capacitor and Diode Failure Rate Models", Journal of the Reliability Information Analysis Center, Second Quarter 2007, NY.

## 10 Indice delle figure

Figura 1. Rappresentazione sintetica delle fasi di progetto mediante RET.....	8
Figura 2. Sezione “Impostazioni iniziali” della procedura di progettazione SMPPT.....	9
Figura 3. Struttura dell’esecuzione degli algoritmi di ottimizzazione e progettazione.....	10
Figura 4. Interfaccia GUI scelta algoritmo di ottimizzazione multi-obiettivo.....	11
Figura 5. SPEA II: Inizializzazione della popolazione.....	11
Figura 6. SPEA II: Creazione archivio iniziale.....	12
Figura 7. Schema fasi dell’algoritmo di progettazione.....	12
Figura 8. SPEA II: Individuazione individui dominati.....	13
Figura 9. SPEA II: Creazione mating pool e operazioni di cross-over e mutazione degli individui.....	14
Figura 10. NSGA II: schema procedura [11].....	15
Figura 11. Rappresentazione schematica subroutine elettro-termica.....	16
Figura 12. (a) Grafico RDson; (b) Grafico Vth del MOSFET in funzione della temperatura.....	19
Figura 13. Rappresentazione schematica ciclo termico a Tretro_FV_MAX.....	21
Figura 14. Induzione magnetica B magnetica ferrite/nanocristallo (Magnetec).....	22
Figura 15. Permeabilità magnetica ferrite/nanocristallo (Magnetec).....	22
Figura 16. Grafico $\mu_i$ vs Temperature (Ferroxcube).....	23
Figura 17. Grafico C/Co vs Temperature (Vishay).....	25
Figura 18. Grafico ESR/ ESR o vs Temperature (Vishay).....	25
Figura 19. Grafico Useful Lifetime Elettrolitici vs Temperature (Vishay).....	25
Figura 20. Schema sintetico Reliable-Thermal subroutine.....	27
Figura 21. (a) Grafico $\pi_{TE}$ vs Temperature; (b) Grafico $\pi_{TO}$ vs Temperature.....	29
Figura 22. Schema sintetico del tool RET.....	30
Figura 23. RET rappresentazione primi risultati SPEA-II.....	32
Figura 24. RET rappresentazione primi risultati NSGA-II.....	32
Figura 25. Dettaglio soluzioni SPEA-II.....	33
Figura 26. Synchronous boost converter.....	34