



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi LSA preliminare applicata al sottosistema fotovoltaico dello Smart Building F40

Fabio Leccese, Enrico Petritoli



ANALISI LSA PRELIMINARE APPLICATA AL SOTTOSISTEMA FOTOVOLTAICO DELLO SMART BUILDING F40

Fabio Leccese, Enrico Petritoli (Università Roma Tre)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package 1: Local Energy District

Linea di attività: 15 - Analisi affidabilistica di Smart Building e supporto al consolidamento della sezione front-end del PELL

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Smart Energy in Sistemi Pubblici: analisi di affidabilità e qualificazione dei dati per ridurre le incertezze di sistema"*

Responsabile scientifico ENEA: Francesco Pieroni

Responsabile scientifico Università degli Studi "Roma Tre": Prof.re Fabio Leccese

Indice

INDICE	3
SOMMARIO	5
1 INTRODUZIONE	7
1.1 ANALISI DI SUPPORTO LOGISTICO: GENERALITÀ E PARTICOLARIZZAZIONE DEL NOSTRO CASE STUDY	7
1.2 LSA: ATTIVITÀ E PRESTAZIONI	7
1.3 GLI OBIETTIVI DELLA LSA	8
1.3.1 <i>Obiettivi di gestione logistica</i>	8
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	9
2.1 ANALISI DI SUPPORTO LOGISTICO OPERATIVA	9
2.1.1 <i>Analisi di Affidabilità</i>	9
2.1.2 <i>Disponibilità</i>	9
2.1.3 <i>Analisi dei Guasti e di Criticità (FMECA)</i>	10
2.2 SINGLE OBJECTIVE OPTIMIZATION E MULTI OBJECTIVE OPTIMIZATION	10
2.2.1 <i>Definizioni</i>	10
2.3 OTTIMIZZAZIONE	11
2.3.1 <i>Proprietà della MOOP</i>	11
2.3.2 <i>Soluzione della MOOP</i>	11
2.4 DESCRIZIONE EDIFICIO F40	13
2.4.1 <i>L'edificio F40</i>	14
2.4.2 <i>Aree funzionali</i>	14
2.5 DESCRIZIONE SISTEMA FOTOVOLTAICO	16
2.5.1 <i>Introduzione</i>	17
2.5.2 <i>Principio Di Funzionamento</i>	17
2.5.3 <i>Componentistica Dell' Impianto Fotovoltaico</i>	17
2.6 ANALISI DI AFFIDABILITÀ DEL SISTEMA	18
2.6.1 <i>Generalità</i>	18
2.6.2 <i>Obiettivi Dello Studio Affidabilistico</i>	18
2.6.3 <i>Stress del Componente</i>	19
2.6.4 <i>Terminologia</i>	19
2.6.5 <i>Tipi di guasti</i>	20
2.6.6 <i>Il MIL-HDBK-217F</i>	20
2.6.7 <i>Parts Count Reliability Prediction</i>	21
2.6.8 <i>Affidabilità dei sistemi</i>	21
2.6.9 <i>Affidabilità del sistema in serie</i>	23
2.6.10 <i>Affidabilità dei sistemi in Parallelo (A Funzionamento Permanente)</i>	24
2.6.11 <i>Sistemi Parallelo a Funzionamento Sequenziale</i>	25
2.7 TABELLA DEI RISULTATI	28
2.8 DISPONIBILITÀ (AVAILABILITY) DEL SISTEMA	29
2.8.1 <i>Introduzione</i>	29
2.8.2 <i>Definizione di Disponibilità</i>	29
2.8.3 <i>Disponibilità a regime</i>	29
2.8.4 <i>Composizione del Down Time</i>	30
2.9 DATI DI DISPONIBILITÀ	34
2.10 ANALISI DEI GUASTI E DI CRITICITÀ (FMECA)	35
2.10.1 <i>Criteri</i>	35
2.10.2 <i>Assunzioni</i>	35
2.10.3 <i>Formato delle tabelle</i>	36
2.10.4 <i>Tabelle FMECA</i>	37
3 CONCLUSIONI	54
3.1 AFFIDABILITÀ	54

3.2	DISPONIBILITÀ.....	54
3.3	FMECA.....	54
4	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	55
4.1	DOCUMENTI APPLICABILI	55
4.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	55
4.3	BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE	55
4.4	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	58
APPENDICE: LABORATORIO DI MISURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI "ROMA TRE": CURRICULUM SCIENTIFICO.....		60

Sommario

L'attività è finalizzata all'individuazione di tecniche mirate ad un utilizzo razionale dell'energia elettrica che sono divenute, al giorno d'oggi, importanti quanto la produzione dell'energia stessa. Questa fase è focalizzata sull'applicazione delle discipline della Qualità a sistemi complessi di primo livello delle Smart Cities ed in particolare ai sistemi di Smart Lighting per quanto riguarda la problematica logistica della quantizzazione numerica dell'affidabilità e della manutenibilità (e dei relativi margini di tolleranza) che impattano sulla disponibilità del sistema.

L'involucro edilizio, al cui interno si svolgono la maggior parte delle attività umane e dove l'uomo trascorre il maggior tempo della sua vita, può essere individuato come uno dei principali fattori di attenuazione del consumo di risorse energetiche.

Il problema è di estrema urgenza ed indifferibile, quasi una emergenza per le società ad intenso sviluppo tecnologico, se consideriamo che il patrimonio immobiliare esistente è stato realizzato in epoche storiche ove non esisteva alcun regolamento che imponeva l'adozione di componenti edilizi in grado di incidere sulla limitazione dei consumi energetici, chiedendo di mantenere al contempo un adeguato grado di comfort. Vediamo, allora, quali possono essere gli interventi che rientrano nell'ambito di un possibile programma di efficientamento energetico che investe un involucro edilizio.

1. Come intervento prioritario, la coibentazione delle superfici opache rivolte all'esterno, delle superfici trasparenti, dei solai rivolti su cantine e portici o direttamente su terrapieno ed infine del sottotetto, consentono un risparmio energetico in riscaldamento invernale e nel raffrescamento estivo degli ambienti, a vantaggio del comfort abitativo complessivo.
2. La sostituzione di lampade convenzionali con lampade a risparmio energetico con tecnologia a LED, con un consumo ridotto di due terzi.
3. Introduzione di apparecchi con alto grado di rendimento, quali gli elettrodomestici.
4. Incidere sugli interventi organizzativi che consentono di modificare alcune abitudini quotidiane (uso degli elettrodomestici solo di giorno, interdetto l'uso di ascensore durante la notte, limitare il ricorso a turni notturni per le imprese, etc.)
5. Produzione di energia elettrica in modo autonomo per sopperire ai consumi, installazione di impianto fotovoltaico connesso eventualmente ad accumulo elettrico per gli orari notturni.
6. Uso di pompa di calore per riscaldamento e raffrescamento, utilizzando l'energia auto prodotta.

Oggetto della ricerca è il sistema fotovoltaico dell'edificio sperimentale F40 posto nel Centro di Ricerca ENEA della Casaccia che è già da tempo al centro di diversi studi volti all'efficientamento energetico, ovvero all'ottimizzazione delle risorse, anche finanziarie, e riduzione delle perdite. Lo scopo dichiarato è quello di mettere a punto materiali e strategie volte al duplice scopo di poter disporre di tecnologia per retrofittare edifici già esistenti (caso molto frequente nel nostro Paese) e di disporre di architetture ed esperienze da inserire nell'ambito di progettazione ex novo di edifici.

L'analisi, in particolare, riguarda l'applicazione delle discipline della Qualità (Analisi RAMS: analisi di affidabilità, manutenibilità, disponibilità e sicurezza; è un acronimo che deriva dalla composizione di quattro parole inglesi: Reliability, Availability, Maintainability and Safety) a sistemi di generazione elettrica fotovoltaica per quanto riguarda la problematica logistica della quantizzazione numerica dell'affidabilità e della manutenibilità (e dei relativi margini di tolleranza) che impattano sulla disponibilità del sistema.

L'analisi applicabile al sistema fotovoltaico è di due sottotipi, il primo prettamente affidabilistico, il secondo di tipo logico/funzionale.

La prima, detta “analisi di affidabilità”, è mirata a stabilire non solo la figura di affidabilità del sistema (ovvero l’intervallo tra due guasti) ma ad individuare quale siano i componenti o sottosistemi più prone al guasto.

La seconda è l’analisi di tipo FMECA (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis - Analisi dei modi, degli effetti e della criticità dei guasti) riusciamo invece a stabilire, tramite successioni logiche di funzionamento, l’effetto di un eventuale guasto al livello di sottosistema o di componente al fine di mitigarne la gravità. Queste metodologie, al momento, raramente sono applicate a sistemi complessi come questi e promettono risultati interessanti.

L’output delle due diverse metodologie si concretizzano in una analisi affidabilistica in cui viene misurata l’occorrenza di guasto delle singole parti (valutandone opportunamente l’incertezza), sistemi e sottosistemi, al fine di evidenziarne gli elementi dalla vita utile più breve e per aiutare la modulazione dei pezzi di ricambio. Il secondo output, l’analisi FMECA, evidenzia le criticità architettoniche (*single point failures*) e suggerisce metodi di mitigazione del rischio di malfunzionamento.

1 Introduzione

1.1 Analisi di supporto logistico: generalità e particolarizzazione del nostro case study

L'Analisi di Supporto Logistico è un processo che fa parte del concetto molto più ampio di logistica integrata, vale a dire, il processo gestionale che governa l'intero flusso di materiali e informazioni, dal loro punto di origine al consumatore/utilizzo finale.

Se tradizionalmente si ragionava in termini di unità organizzative separate affidando ad ogni comparto tecnico la gestione di una ben definita attività, ad esempio, suddividendo in maniera inequivocabile i settori adibiti all'approvvigionamento da quelli per l'elaborazione degli ordini o lo stoccaggio dai trasporti, oggi, una visione così nettamente ripartita è superata in favore di un approccio trasversale e complessivo.

Non più distinta nelle sue singole funzioni, con il concetto di *logistica integrata* si intende un processo articolato dove tutte le attività gestionali risultano interdipendenti e fra loro correlate.

Come detto, l'LSA (*Logistic Support Analysis*) è considerata formalmente un sottoinsieme dell'ILS (*Integrated Logistic Support*): quest'ultima appunto ha la responsabilità dello sviluppo delle informazioni tecniche e dell'ambiente di supporto che verrà utilizzato poi per supportare un prodotto (o sistema) nel corso di tutto il ciclo di vita previsto.

Le diverse discipline presenti nella branca del supporto logistico (per es.: produzione e gestione della documentazione tecnica, gestione dei pezzi di ricambio, delle attrezzature di supporto, addestramento del personale) richiedono una forte integrazione ed armonizzazione.

Le principali discipline infatti sono:

- Interfaccia di progettazione
- Fornire supporto logistico
- Apparati di test e controllo
- Gestione dei dati tecnici e/o documentazione tecnica
- Gestione personale e manodopera
- Supporto IT / software
- *Facilities*
- Pianificazione della manutenzione e/o manutenzione programmata
- Imballaggio, trattamento, stoccaggio e trasporto (PHST - *Packing Handling Storage & Transporting*)
- Addestramento e sistemi di addestramento.

Il programma LSA è la principale fonte di dati tecnici per la pianificazione e la gestione dell'ILS. In particolare l'LSA viene quindi utilizzato per:

- Collegare il design del prodotto e i requisiti ILS ai livelli richiesti di disponibilità (*Availability*) del sistema e definire dettagliatamente i requisiti degli elementi di supporto logistico.
- Durante tutto il ciclo di acquisizione dati, è utilizzato per valutare e modificare la progettazione del prodotto e stabilire e aggiornare i requisiti degli elementi del supporto logistico
- E' fonte importante di dati relativi alla progettazione per determinare e integrare tutti i requisiti di supporto logistico, è necessario per analizzare concetti di progettazione, operativi e di supporto alternativi e per condurre *trade-off* tra progettazione e vari elementi di supporto logistico e per la pianificazione e le decisioni sulle risorse dell'ILS.

1.2 LSA: Attività e prestazioni

Il processo LSA include l'applicazione di metodi quantitativi per:

- la determinazione iniziale e la definizione dei criteri logistici come input alla progettazione del sistema

- la valutazione di varie alternative di progettazione
- l'identificazione e la fornitura di elementi di supporto logistico
- la valutazione finale della capacità di supporto del sistema durante l'esercizio operativo.

Il programma LSA fondamentale si basa sul concetto di definizione del prodotto integrato e può essere basato sui seguenti elementi principali:

- Un piano del programma LSA che identifica tutte le attività LSA richieste che, a loro volta, devono essere eseguite al fine di influenzare la progettazione per la supportabilità e determina le risorse logistiche appropriate.
- Una pianificazione che identifichi i tempi dei requisiti LSA. I programmi LSA sono definiti in base alle esigenze della fase del progetto per essere reciprocamente vantaggiosi e ci aiuta ad altri requisiti del progetto.
- L'assegnazione delle responsabilità per l'esecuzione delle attività LSA alla progettazione, supportabilità e personale ILS qualificato per l'attività.
- La gestione efficace di una vasta gamma di discipline ILS, di progettazione e di supportabilità.

1.3 *Gli Obiettivi della LSA*

1.3.1 *Obiettivi di gestione logistica*

L'integrazione della logistica e della supportabilità nell'organizzazione del programma di sviluppo prodotto integrato assicura che:

- Il design rifletta la valutazione dei dati di test, valuti le alternative di supportabilità e le valutazioni di compromesso
- I requisiti siano dettagliati nelle specifiche
- La pianificazione delle risorse logistiche che venga regolata secondo necessità
- Siano soddisfatte le soglie di disponibilità e prontezza operativa
- L'articolo sia supportato nell'ambiente operativo previsto
- Gli ambienti operativi siano accuratamente valutati
- Il sistema di supporto raggiunga le prestazioni previste.

Un obiettivo del programma logistico è appunto identificare e risolvere i problemi di rischio tecnico di supportabilità in anticipo, prima di iniziare la produzione e l'implementazione del prodotto.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Analisi di Supporto Logistico operativa

L'Analisi di Supporto Logistico, applicata in particolare al sistema, ha i seguenti compiti:

- La caratterizzazione del sistema e del suo *environment*.
- Influenzare lo sviluppo ulteriore (feedback) del sistema per realizzare e garantire le caratteristiche necessarie del sistema (nel nostro caso una fornitura di servizi multipli)
- Determinare il personale necessario ed ottimizzare le risorse (logistiche, tecniche, di budget).

Gli Input per l'LSA sono:

- Documentazione tecnica (Data package), come ad esempio i documenti di ingegneria meccanica ed elettrica (diagrammi circuitali, PCB, cablaggi interno e schemi di montaggio).
- Dati inerenti i Materiali e Processi: informazioni sulle parti sia d'acquisto che costruite, tempi e modalità di procurement delle parti.
- I prezzi di tutte le parti e i costi di tutti i servizi (ed eventuali rilavorazioni).
- Se necessario, aggiuntivi richiedibili sono relativi a utensili speciali per la produzione, strumentazioni e fasi di test, risoluzione dei problemi e per la riparazione, informazioni sullo smontaggio ed il montaggio.
- In ultimo (ma non per importanza) le risultanze dalle seguenti
 - Analisi di affidabilità (MTBF)
 - Analisi dei guasti e di criticità (FMECA).

2.1.1 Analisi di Affidabilità

Per "affidabilità" si intende quella parte della statistica che studia le leggi di guasto di componenti, macchine e sistemi. L'analisi dell'affidabilità del sistema "Smart Building" è necessaria al fine di stimare od ottimizzare:

- La durata di vita (del componente o del sottosistema) tramite il calcolo del tasso di guasto
- La disponibilità operativa del sistema
- Il costo del ciclo di vita

Per tasso di guasto (failure rate λ) si intende la probabilità che il componente o sistema, che abbia funzionato fino ad un istante prefissato, si guasti nel periodo di tempo (ora, giorno) immediatamente successivo. Il tasso di guasto, di fatto, è una misura del rischio immediato di guasto di un componente o sistema che ha già "vissuto" per un determinato tempo. Da questo si trae il tempo medio di funzionamento tra due guasti successivi chiamato:

MTBF (Mean Time Between Failures)

Poiché il sistema "Smart Building" di fatto deve assicurare un servizio (o una serie di servizi) al cittadino, è necessario che sia garantita quindi la massima Disponibilità del servizio stesso.

2.1.2 Disponibilità

La Disponibilità (Availability) si definisce come rapporto tra il tempo per cui il componente o sistema può funzionare ed il tempo totale per cui è richiesto il servizio:

$$Availability = \frac{UpTime}{UpTime + DownTime}$$

- Nel caso in cui sia prevalente o richiesto il costo del guasto “in sé” (sostituzione di componenti, danni, ecc.) è più significativa l'affidabilità
- Nel caso in cui sia prevalente o richiesto il costo “connesso” col guasto (mancata produzione, mancato servizio, ...) è più significativa la disponibilità.

2.1.3 Analisi dei Guasti e di Criticità (FMECA)

L'analisi FMECA (acronimo dell'inglese Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis - Analisi dei modi, degli effetti e della criticità dei guasti) è una estensione della FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), in aggiunta alla quale include un'analisi di criticità usata per valutare, mediante opportuni diagrammi, la gravità delle conseguenze di un guasto correlata con la probabilità del suo verificarsi.

Ha i seguenti obiettivi:

- b) Individuare le aree critiche del sistema (componenti o sottosistemi)
- c) Individuare i componenti critici il cui guasto può avere conseguenze gravi (danneggiamenti, sicurezza, funzionalità)
- d) Fornire indicazioni per sviluppare programmi di manutenzione preventiva.

Si attua in accordo a questi passi:

- i. Scomposizione del sistema nelle sue parti funzionali e preparazione di una griglia di valutazione della criticità
- ii. Identificazione ed analisi dei modi tipici di guasto di ogni singola parte
- iii. Valutazione della gravità degli effetti del guasto e della frequenza
- iv. Ricerca delle cause e dei sintomi premonitori (segnale precursore) dei guasti
- v. Formulazione di un piano di intervento preventivo o migliorativo.

2.2 Single Objective OPTimization e Multi Objective OPTimization

2.2.1 Definizioni

Ciò che distingue la MOOP (*Multi Objective OPTimization*) dalla SOOP (*Single Objective OPTimization*) non è solamente il numero di obiettivi presenti nel problema. Nella MOOP si opera in due spazi multidimensionali: lo spazio degli obiettivi, e lo spazio delle decisioni o spazio di ricerca, presente anche nella SOOP: lo spazio degli obiettivi rappresenta tutti i possibili valori che ciascuna funzione obiettivo può assumere. La dimensione di tale spazio dipende dal numero di funzioni da cui è costituito.

Lo spazio delle decisioni è costituito da tutti i possibili valori che le variabili di decisione possono assumere. La dimensione di tale spazio dipenderà dal numero di variabili di decisione presenti nel problema. In assenza di vincoli (bound) sulle variabili di decisione, lo spazio delle decisioni è illimitato e l'ottimizzazione è detta non vincolata.

La corrispondenza tra i due spazi non è biunivoca, ovvero non vi è unicità di corrispondenza tra i due insiemi, ed inoltre essi sono legati da relazioni spesso non lineari. Il mapping dunque non è banale. Risulta evidente come, per ottenere un insieme di soluzioni uniformemente diversificato, non è sufficiente scegliere una distribuzione uniforme delle variabili nello spazio delle decisioni.

2.3 Ottimizzazione

Un problema di ottimizzazione può essere definito come il problema di trovare la “migliore soluzione possibile” di un problema, il quale può avere diversi modi di risoluzione. L’approccio seguito nella ricerca della soluzione di un problema di ottimizzazione richiede di impostare in modo rigoroso il problema, definendo formalmente il significato dei termini che costituiscono la soluzione migliore possibile, andando dunque a specificare esattamente cosa può essere intesa come soluzione, quali tra queste sono possibili, o ammissibile, e fra le molteplici soluzioni ammissibili quale è la migliore.

Il metodo per la formulazione e la soluzione di un problema di ottimizzazione è noto come “Metodo delle Cinque Fasi”:

1. Raccolta dati: vengono raccolte tutte le informazioni ritenute utili alla migliore soluzione del problema;
2. Identificazione del problema: viene descritto il problema in un linguaggio naturale, identificando cosa si vuole decidere e gli aspetti rilevanti da tenere in considerazione; in un certo senso in questa fase viene prefigurata la struttura della possibile soluzione senza ancora definire tutti i dettagli.
3. Formulazione del problema: il problema identificato nella fase precedente viene descritto in termini matematici (modello di ottimizzazione). Per fare tutto ciò bisogna andare a definire tre elementi fondamentali che sono:
 - i. Variabili: due sono i tipi di grandezze rilevanti, esogene ed endogene, le prime, che comunemente sono i parametri ovvero i dati raccolti nella prima fase, le seconde sono le così chiamate variabili di decisione, alle quali l’assegnazione di un valore corrisponde una soluzione del problema.
 - ii. Vincoli: sono i legami che esistono tra le varie variabili di decisione del problema, risolvere il problema rispettandoli significa trovare una soluzione ammissibile del problema.
 - iii. Funzione obiettivo: esplicita il criterio di valutazione di una soluzione.
4. Soluzione del problema: si determina una soluzione ottima del problema, oppure si stabilisce che il problema è “inammissibile” o “illimitato”.
5. Validazione: si verifica che la soluzione ottenuta sia ammissibile e ottimale.

2.3.1 Proprietà della MOOP

L’ottimizzazione multi-obiettivo, o MOOP (Multi Objective OPTimization), è una tecnica che permette di trovare soluzioni a problemi caratterizzati da molteplici obiettivi, i cosiddetti Multi Objective Problem (MOP).

I primi studi sui MOP iniziarono nella seconda metà del '900 e proseguirono con grandi sviluppi fino ai giorni nostri. La rilevanza di questo tipo di approccio sta nel fatto che la maggior parte dei problemi reali non può essere ricondotta ad un SOP (Single Objective Problem) a causa dell’elevato numero di aspetti di cui dobbiamo tenere conto. Aspetti che nella maggior parte dei casi sono in contrasto tra loro.

2.3.2 Soluzione della MOOP

Nella risoluzione di un MOP sfruttiamo due tipi di approcci differenti:

- Approccio basato sulle preferenze;
- Approccio ideale.

L’approccio basato sulle preferenze sfrutta le informazioni preliminari, come l’ordine di preferenza degli obiettivi, e quindi consente di dare un peso alle funzioni obiettivo riconducendo un MOP ad un SOP. Tale approccio risulta poco efficace in quanto dipende fortemente dai pesi attribuiti alle funzioni obiettivo. Uno stesso MOP, risolto con lo stesso metodo ma con pesi diversi, può dare risultati notevolmente differenti. La

scelta dei pesi infatti è puramente soggettiva. Inoltre, pur avendo ben chiaro l'ordine di preferenza degli obiettivi, non è immediato quantificare numericamente un fattore che indichi con precisione quanto un obiettivo sia più importante di un altro. Al contrario, l'approccio ideale, non si basa su alcun tipo di preferenza iniziale ma, nella prima fase, mira a trovare il più alto numero di soluzioni differenti. Successivamente vengono sfruttate le eventuali preferenze per selezionare la migliore. Come approccio risulta più efficace del precedente in quanto le soluzioni ricavate non sono condizionate da preferenze personali.

Formalmente un MOP è definito come:

Min/Max $f_m(X)$ $m = 1, 2, \dots, M$

$$\begin{cases} g_j(X) \geq 0 & j = 1, 2, \dots, J \\ h_k(x) = 0 & k = 1, 2, \dots, K \\ LB_i \leq X_i \leq UB_i & i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Dove:

- M è il numero degli obiettivi;
- J è il numero dei vincoli;
- K è il numero dei vincoli di uguaglianza;
- n è il numero di variabili di decisione;
- LB è il limite inferiore, lower bound, delle variabili di decisione.
- UB è il limite superiore, upper bound, delle variabili di decisione.

Vale a dire che la risoluzione di un MOP consiste nel minimizzare o nel massimizzare le M funzioni obiettivo dipendenti ciascuna da un vettore x le cui componenti (x_1, x_2, \dots, x_n) rappresentano le variabili di decisione, limitate da dai bound LB_i e UB_i .

Lo spazio delle decisioni è n-dimensionale mentre lo spazio degli obiettivi è M-dimensionale. I MOP come i SOP sono caratterizzati da due proprietà fondamentali:

- Linearità: un MOP è lineare se tutti gli obiettivi ed i vincoli sono lineari.
- Convessità: un MOP è convesso se tutti gli obiettivi ed i vincoli sono convessi.

Per comprendere meglio la proprietà di convessità bisogna definire la convessità per una funzione:

$$\begin{aligned} &\text{una funzione } f: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R} \text{ è convessa se } \forall x^{(1)}, x^{(2)} \in \mathcal{R}^n, \\ &f(\lambda x^{(1)} + (1-\lambda)x^{(2)}) \leq \lambda f(x^{(1)}) + (1-\lambda)f(x^{(2)}) \quad \forall 0 \leq \lambda \leq 1 \end{aligned}$$

La proprietà di convessità è fondamentale in quanto molti metodi di ottimizzazione per i MOP falliscono di fronte a problemi non convessi. È importante notare che la proprietà di convessità vale tanto per lo spazio delle decisioni quanto per quello degli obiettivi.

Nella risoluzione della MOOP, esistono approcci diversi che possono portare a soluzioni notevolmente differenti.

- Metodo a priori: è un metodo basato sulle preferenze iniziali. Sfrutta cioè le informazioni, quali conoscenza della priorità di un obiettivo sugli altri o di un range di valori che si desidera ottenere, prima di effettuare il processo di ottimizzazione. La maggior parte dei MOP classici si basa su questo metodo. Ogni soluzione ottenuta appartiene al fronte di Pareto, tuttavia il metodo a priori non è efficiente per problemi non convessi o caratterizzati da forti non linearità.
- Metodo a posteriori: si basa sul principio dell'approccio ideale. Infatti solo dopo aver effettuato la procedura di ottimizzazione ed aver ottenuto un insieme di soluzioni, vengono sfruttate le informazioni per selezionare la soluzione migliore. È un metodo robusto rispetto ai cambiamenti dei parametri del problema.
- Metodo progressivo: sfrutta le informazioni in tempo reale durante l'esecuzione dell'ottimizzazione. È un approccio efficace per indirizzare, senza influenzare troppo, il processo.

2.4 Descrizione Edificio F40



Figura 1 - Edificio F40 veduta aerea.

2.4.1 L'edificio F40

L'edificio F40 si presenta come un fabbricato a stecca con tre piani fuori terra ed uno seminterrato, connesso, dal lato maggiore, ad un secondo fabbricato più basso. A livello architettonico l'edificio si caratterizza per un'unica stratigrafia di involucro opaco verticale ed una sola tipologia di infissi vetrati. Mentre l'edificio principale ospita uffici, CED e laboratori, il secondo fabbricato è prettamente occupato da laboratori (vedi Fig. 1).

L'edificio si struttura su 3 piani fuori terra più un seminterrato. Lo studio tiene in considerazione i soli piani fuori terra. La distribuzione, come indicato in Fig. 2, vede la maggior parte della superficie al piano terra occupata da laboratori, circa la metà della superficie al primo piano occupata da uffici e il secondo piano dedicato completamente ad uso ufficio. In tutti i piani le aree distributive coprono più del 25% della superficie utile.

2.4.2 Aree funzionali

Nella tabella seguente sono sintetizzati i dati geometrici dell'edificio:

Piano	Superficie utile riscaldata [m ²]	Altezza interna [m]	Volume utile riscaldata [m ³]
<i>PT</i>	570	3,2	1824,0
<i>P1</i>	774	3,2	2476,8
<i>P2</i>	765	3,2	2448,0
Totale	2109		6748,8

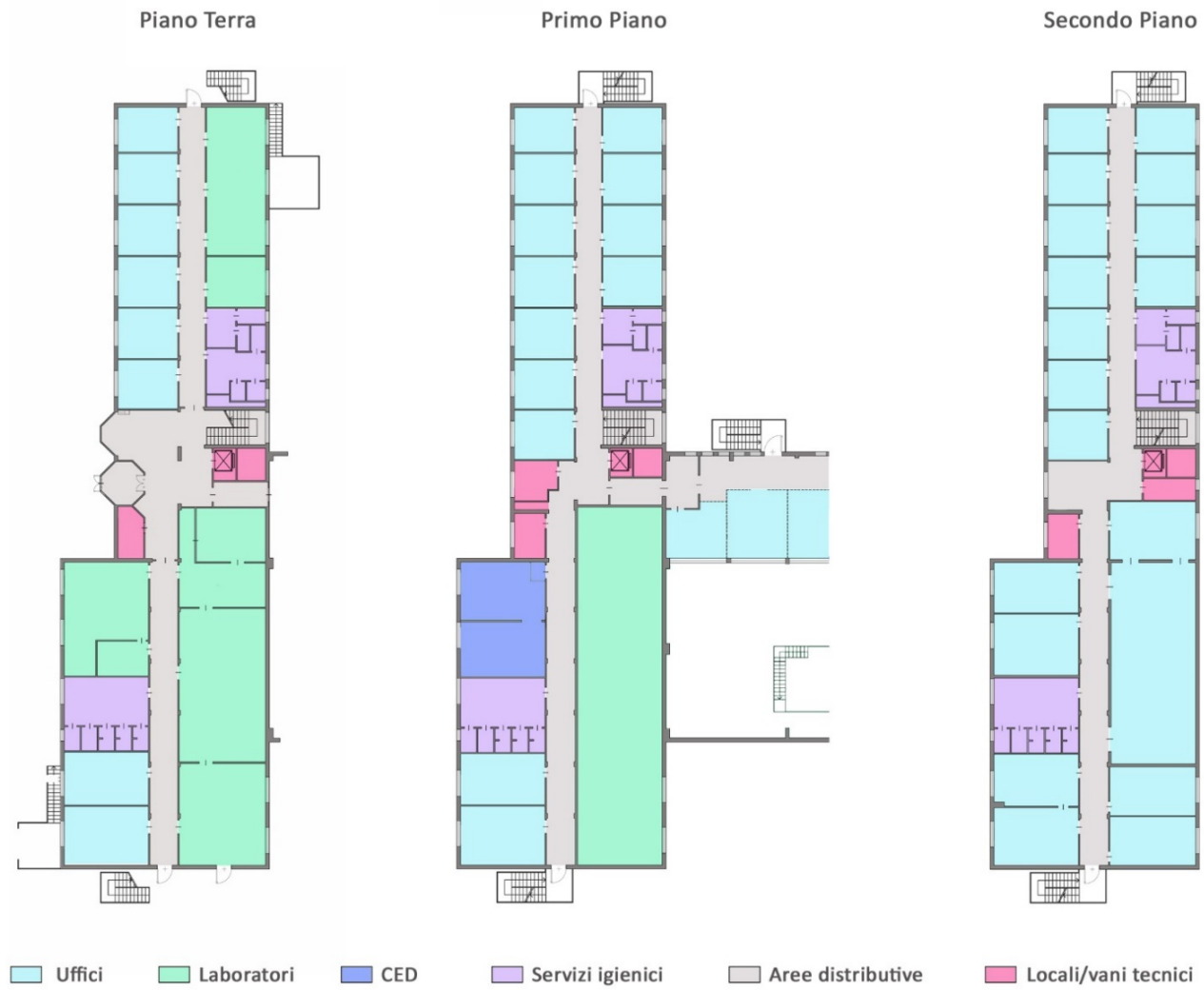


Figura 2 - Distribuzione delle funzioni all'interno dell'edificio.

2.5 Descrizione sistema Fotovoltaico

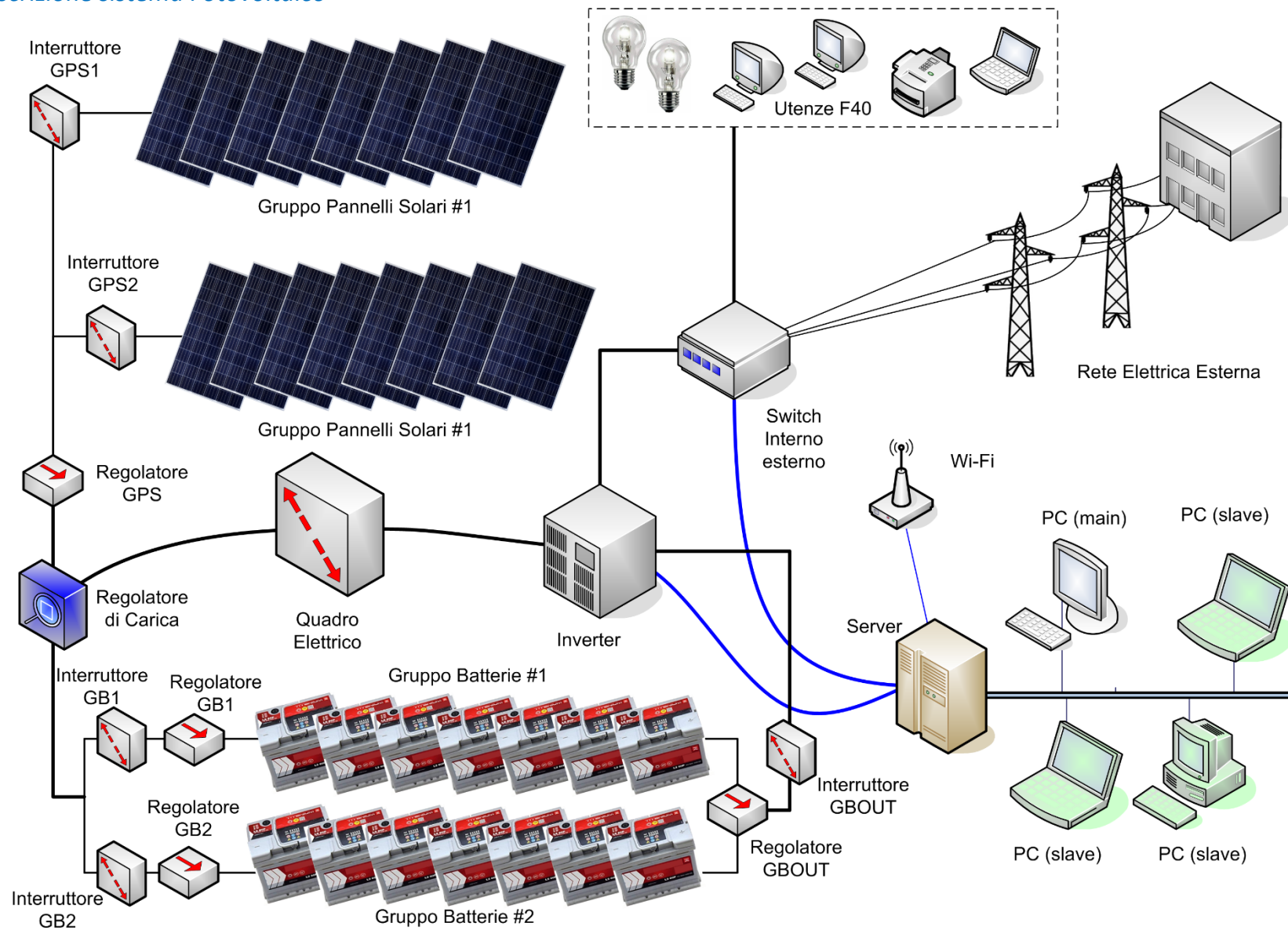


Figura 3 - Distribuzione delle funzioni all'interno dell'edificio.

2.5.1 Introduzione

Sfruttare l'energia solare è un tema sempre più frequente ed attuale in questo periodo. Il perché è presto detto: l'inquinamento mondiale sta aumentando sempre più alla faccia del protocollo di Kyoto. I gas serra sono sempre più presenti e le mutazioni climatiche mostrano alcuni effetti devastanti.

Per risolvere il problema dell'inquinamento è di fondamentale importanza adottare delle strategie e molte possono provenire dall'energia solare. Una di queste è sicuramente il fotovoltaico, ossia quella tecnologia che permette di trasformare l'energia solare in energia elettrica.

2.5.2 Principio Di Funzionamento

L'effetto fotovoltaico consiste nel trasformare l'energia solare in elettricità. Questo processo è possibile grazie a specifiche proprietà fisiche di alcuni particolari elementi.

L'elemento base della tecnologia fotovoltaica è la cella che, tra le varie caratteristiche, può essere monocristallina o policristallina: il nostro sistema sarà basato su una tecnologia di questo secondo tipo. Con l'esposizione alla luce la cella produce energia elettrica in corrente continua che poi successivamente verrà trasformata in corrente alternata per poter essere utilizzata nei normali impianti elettrici domestici.

La cella fotovoltaica è sostanzialmente formata dal silicio che si presenta di colore nero o blu a seconda della loro formazione policristallino o monocristallino, di dimensioni variabili dai 10 ai 12 cm. Ma analizziamoli nel dettaglio.

Silicio Monocristallino: la cella formata dal silicio monocristallino è realizzata da un wafer la cui struttura è omogenea (monocristallino) e costituita da un singolo cristallo di silicio che garantisce la massima conducibilità dovuta al perfetto allineamento degli atomi di silicio allo stato puro.

Silicio Policristallino: in cui il wafer non è strutturalmente omogeneo ma organizzato in grani localmente ordinati; si ottiene riciclando componenti elettronici scartati che vengono rifiutati per ottenere una composizione cristallina compatta: le celle di un modulo policristallino o multi cristallino sono costituite da un insieme di più cristalli di silicio. Il rendimento di un modulo policristallino si aggira intorno al 12% - 14% e le celle sono di colore blu intenso di forma quadrata.

I moduli in silicio mono o policristallini rappresentano la maggior parte del mercato. Sono tecnologie costruttivamente simili e prevedono che ogni cella fotovoltaica sia collegata in superficie da una griglia di materiale che canalizza gli elettroni. Ogni singola cella viene connessa alle altre mediante fili metallici che, attraversando la cella, formano opportune serie e paralleli elettrici.

Assemblando un tot numero di celle, si ottiene il modulo. Un tot numero di moduli collegati in serie + e - formano il pannello, un tot numero di pannelli collegati in parallelo formano il nostro impianto fotovoltaico. Adesso la domanda è: "monocristallino o policristallino?" Se vogliamo essere ulteriormente precisi il mono converte meglio la luce diffusa, non è necessario quella diretta del sole. Al contrario, il policristallino è più indicato in zone del centro-sud Italia dove il sole è maggiormente presente nell'arco dell'intera giornata.

2.5.3 Componentistica dell' Impianto Fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico per poter funzionare correttamente ha bisogno dell'installazione di diversa componentistica. Le parti che costituiscono un impianto fotovoltaico sono le seguenti: pannello fotovoltaico, cablaggi, quadro elettrico e inverter.

Per i dettagli dei componenti si rimanda all'analisi di affidabilità e alle tabelle FMECA.

2.6 Analisi di affidabilità Del Sistema

2.6.1 Generalità

La domanda che viene spesso rivolta agli "affidabilisti" è: "cos'è che rende un sistema affidabile e come fai a sapere quanto sia affidabile?" La risposta è spesso piuttosto complessa: non un solo aspetto del processo di sviluppo rende un prodotto affidabile, ma una vasta combinazione di elementi come un buon design del prodotto, la metodologia di approccio adottata, un buon sviluppo ed un buon controllo dei processi e la qualità costante nella produzione.

2.6.2 Obiettivi Dello Studio Affidabilistico

Gli obiettivi di affidabilità nell'industria dei componenti elettronici sono caratterizzati con la curva tradizionale della "vasca da bagno" mostrata nella figura sotto. Questa curva mostra il tasso di guasto dei prodotti rispetto al tempo ed è composta a sua volta da tre curve individuali relative alla frequenza di guasto costante, mortalità infantile ed invecchiamento.

La figura mostra appunto che la curva segue una forma classica di vasca (anche se questa è una generalizzazione). La curva è composta da tre regioni distinte: la vita precoce, la vita utile e l'usura. Ogni regione è caratterizzata separatamente con potenziali guasti classificati come guasti di qualità, fallimenti casuali e guasti di usura rispettivamente. I guasti precoci di vita possono essere correlati al processo, come ad esempio i difetti indotti, e sarebbero caratterizzati da una diminuzione del tasso di fallimento. I guasti all'usura, d'altra parte, sono limitazioni di processo intrinseche e generalmente ben caratterizzate prima della liberazione del processo.

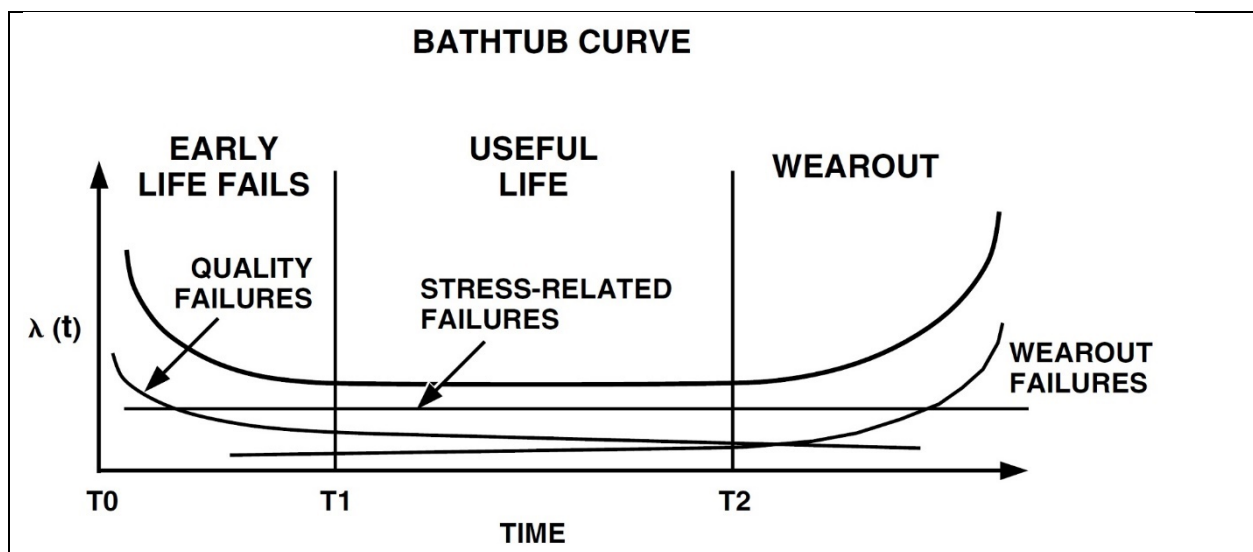


Figura 4 - Curva a Vasca da Bagno

Questi guasti sarebbero dovuti all'usura dell'ossido, all'elettromigrazione e agli effetti di elettroni caldi, tutti che limitano la durata del prodotto. In genere, hanno un tasso di fallimento crescente.

I guasti casuali si verificano per una serie di motivi e di solito rappresentano solo un numero molto ridotto di guasti. Sono caratterizzati da un tasso di rottura costante. La forma ideale alla curva è avere un periodo di vita utile molto lungo e una scarsa quantità di difetti di qualità.

2.6.3 Stress del Componente

Un componente elettronico può subire una serie di sollecitazioni durante la sua vita, per cui i test di stress per l'affidabilità sono stati progettati per valutare gli effetti di questi stress nel tempo.

Un componente elettronico verrà assemblato su una scheda a circuito stampato utilizzando sollecitazioni termiche e messo in un sistema per l'utilizzo in ambienti militari o commerciali dove sarà completata la sua vita utile. Durante la sua vita, il dispositivo sopporta temperature, umidità e sollecitazioni elettriche. Pertanto, i test di affidabilità devono comprendere i tipi di affidabilità che sottolineano il funzionamento del dispositivo in modo che il test sia significativo e di valutare la capacità del prodotto di resistere a tali sollecitazioni.

A causa dei diversi tipi di guasti che possono verificarsi, molti test possono essere applicati ad un prodotto. Generalmente, sono separati in prove elettriche, termiche ed ambientali, che sono state sviluppate e raffinate per un periodo di tempo. Per determinare i tassi di guasto dei prodotti, è importante capire come questi test siano correlati alle condizioni operative standard in condizioni di prova accelerate.

2.6.4 Terminologia

I termini di base dell'affidabilità sono:

Inaffidabilità (Unreliability) $F(t)$: esprime la percentuale di una popolazione che è soggetta a guasto nel tempo (t):

$$F(t) = r/n$$

dove r è il numero di elementi in errore ed n è la popolazione totale.

Affidabilità (Reliability) $R(t)$: esprime la percentuale di una popolazione che sarà buona durante il tempo (t)

$$R(t) = (n-r)/n$$

Failure Density $f(t)$: esprime la percentuale di una popolazione che avrà fallito per unità di tempo nel tempo (t).

$$f(t, t + \Delta t) = \Delta r/n$$

Tasso di guasto (Failure Rate) $\lambda(t)$: esprime la percentuale di una popolazione che è stata buona fino al tempo t e fallirà durante l'unità di tempo successiva.

$$\lambda(t, t + \Delta t) = \Delta r/(n-r)$$

Altri termini includono il tempo medio di guasto (MTTF o MTBF) e la vita utile.

MTBF è il periodo di tempo in cui una parte significativa della popolazione avrà fallito. Nel caso di una distribuzione esponenziale con un tasso di rottura costante, circa il 63% della popolazione avrà fallito dal

$$MTBF = 1/\lambda$$

La distribuzione esponenziale viene applicata ad un tasso di rottura costante e viene determinata dal solo λ , dove λ è il tasso di guasto.

Matematicamente è semplice affrontare ed esprimere il periodo di vita utile della curva di vasca con un tasso di rottura costante. Di conseguenza, viene utilizzato per la distribuzione della frequenza di guasto nei test di campionamento della frequenza di fallimento. Quella esponenziale è anche la distribuzione più importante nel campo dell'affidabilità. Per essa possiamo riportare le seguenti, mostrate graficamente nella figura 10 presente nella pagina successiva:

Funzione di distribuzione della probabilità (Probability Distribution Function):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ (con } 0 \leq t < \infty)$$

Funzione di distribuzione cumulativa (Cumulative Distribution Function):

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Tasso di guasto (*Failure Rate*):

$$\lambda(t) = \lambda$$

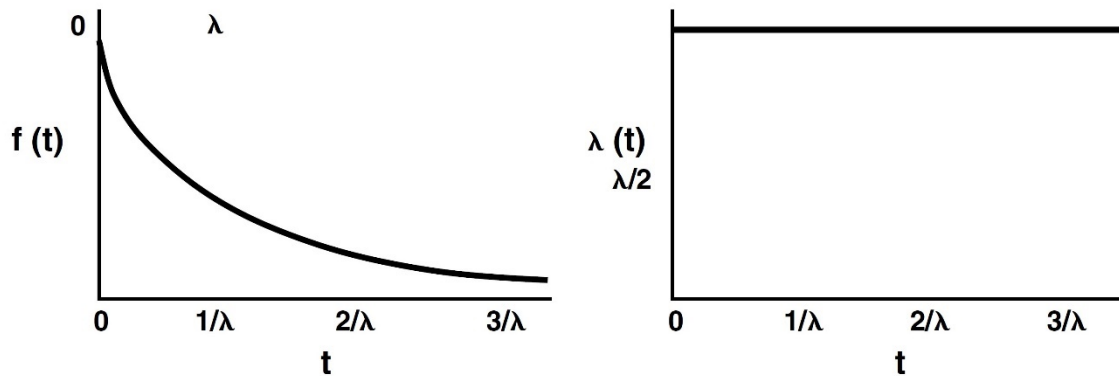


Figura 5 - Distribuzione del Failure rate

2.6.5 Tipi di guasti

Durante il funzionamento si possono verificare guasti di due tipi:

- a) Guasti permanenti: dovuti ad esempio alla manifestazione di difetti presenti in fase di produzione o anche dovute a invecchiamento (esempio elettromigrazione) o radiazioni che corrompono il reticolo cristallino o altri fenomeni ad effetto permanente.
- b) Guasti transitori: ad esempio SEU (*Single Event Upset* nelle memorie) dovuti all'effetto di radiazioni ovvero alla iniezione di cariche nel substrato che possono causare l'inversione del valore memorizzato su elementi di memorie. Effetti temporanei possono anche causare metastabilità.

I guasti transitori possono essere riparati se rilevati anche automaticamente: in generale, per le memorie si preferisce ricorrere a tecniche di ripristino come lo scrubbing o il semplice refresh.

2.6.6 Il MIL-HDBK-217F

Il documento MIL-HDBK-217F contiene i modelli ed i coefficienti necessari per il calcolo del tasso di guasto $\lambda(t)$.

Ci sono fondamentalmente due metodi per calcolare il tasso di guasto. Il primo, detto "Part Stress Analysis", permette di calcolare il λ conoscendo i parametri di stress del singolo componente come, ad esempio, la tensione di lavoro, la temperatura, la potenza dissipata, il tipo di elemento considerato (qualificato o commerciale), ecc. Per ottenere l'affidabilità di un circuito intero si esegue la somma delle singole affidabilità non dimenticando di considerare anche l'affidabilità del circuito stampato (oppure dell'ibrido), delle saldature e dei connettori.

Il secondo metodo, detto "Parts Count", consiste nell'assegnare dei tassi di guasto medi a tutti i componenti di uno stesso tipo (resistenze, condensatori, transistor, ecc.). Anche in questo caso, per un circuito intero, si usa una somma.

Nella trattazione successiva tratteremo il secondo metodo.

2.6.7 Parts Count Reliability Prediction

Questo metodo è utilizzabile durante la prima fase del progetto oppure per l'integrazione di preventivi. La limitazione è dovuta al fatto che per questo tipo di analisi non è richiesta la conoscenza dettagliata delle condizioni di lavoro dei singoli componenti. Le informazioni richieste per questo tipo di analisi sono:

1. Tipi generici di componenti utilizzati e quantità (resistenze, condensatori, ecc.);
2. Livello di qualifica dei componenti (Classe S, 883, COTS, ecc.);
3. Ambiente in cui deve lavorare l'apparecchio.

La relazione che permette di calcolare il tasso di guasto dell'apparecchiatura è la seguente:

$$\lambda_{equip} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot (\lambda_g \cdot \pi_Q)_i$$

dove:

λ_{equip}	= Tasso di guasto totale dell'apparecchiatura;
λ_g	= Tasso di guasto del generico i-esimo componente;
π_Q	= Fattore di qualità del generico i-esimo componente;
N_i	= Quantità della generica i-esima parte;
n	= numero delle categorie di parti generiche all'interno dell'apparecchiatura.

L'equazione è valida se l'apparecchiatura è tutta utilizzata nello stesso ambiente. Se parti diverse dello stesso apparecchio sono utilizzate in ambienti diversi, occorre ricavare dei distinti λ_{equip} (uno per ciascuna parte nei diversi ambienti) e poi farne la somma.

I parametri utilizzati per la "Parts Count" (PC) possono anche differire da quelli forniti per la "Part Stress Analysis" (PSA).

Per alcuni componenti (ad es. i microcircuiti) vengono aggiunti ulteriori coefficienti non indicati nella equazione di sopra. Nelle tabelle fornite mancano alcuni elementi (tipo i microcircuiti ibridi) perché non è possibile fornire un parametro medio essendo elementi totalmente dipendenti dall'effettiva realizzazione. Per questo tipo di elementi è necessario fare un'indagine più approfondita e fornire tutti i parametri richiesti dalla "Part Stress Analysis". I tassi di guasto dati dalle tabelle semplificate fanno uso di valori medi; nel caso che questi valori si discostino troppo dai valori veri o presunti, è possibile sostituire il λ generico con quello più approfondito della PSA. Le tabelle per la "Parts Count" sono tratte dal documento MIL-HDBK-217F / Rev2.

2.6.8 Affidabilità dei sistemi

Finora si è parlato dell'affidabilità di un elemento senza preoccuparsi della sua complessità. Si analizzano ora le relazioni che legano l'affidabilità di un sistema complesso a quella dei singoli componenti. Detto in termini matematici si vuole esprimere la relazione:

$$R_{sys} = f[R_1(t), R_2(t), R_3(t), R_4(t), R_5(t), \dots R_N(t),]$$

dove R_s , rappresenta l'affidabilità del sistema e R_j con $j=1, \dots, n$ quella dei singoli componenti. La conoscenza delle leggi con cui le affidabilità dei singoli elementi componenti concorrono a formare quelle dei sistemi è importante per:

- Dedurre le caratteristiche di sicurezza di funzionamento di un insieme sulla scorta dei dati storici di guasto delle parti che lo compongono.
- Trarre indicazioni utili per impostare una politica di manutenzione preventiva attraverso la conoscenza dell'effetto prodotto dall'intervento su di un certo elemento, sulle caratteristiche del sistema nel suo complesso.

- Analizzare le cause di mal funzionamento di un elemento e prevedere le azioni correttive più efficaci.
- Progettare un sistema con caratteristiche ottimali di affidabilità, mediante duplicazioni di alcune funzioni (v. sistemi ridondanti).

Ora l'affidabilità di un sistema non è altro che la probabilità di ricorrenza dell'evento "non guasto", che a sua volta risulta dalla combinazione di più eventi semplici. Pertanto le regole di combinazione delle affidabilità coincidono con le regole generali di combinazione delle probabilità di eventi qualsiasi.

Le parti componenti di un sistema possono comportarsi, dal punto di vista affidabilistico, in maniera indipendente o meno, ossia il verificarsi di un guasto di una parte costituisce un evento casuale statisticamente indipendente (o meno) dal verificarsi di un guasto in un'altra parte; cioè il verificarsi di un guasto in una parte non altera la probabilità di occorrenza di guasto in un'altra parte. Nel caso in cui le parti di un sistema si comportino in modo indipendente, la loro affidabilità può venire definita analiticamente a partire da quella dei singoli componenti. Ciò non è possibile quando il guasto di un singolo componente può influenzare la probabilità di accadimento del guasto su un altro componente costituente il sistema.

D'altra parte è sempre possibile soddisfare questa ipotesi, pur di non spingere oltre un certo limite la suddivisione del sistema nei componenti che la costituiscono, in modo da considerare il sistema costituito da blocchi tra loro indipendenti.

Il funzionamento di un sistema dal punto di vista dell'affidabilità viene graficamente rappresentato mediante schemi a blocchi opportunamente interconnessi, in cui ogni blocco rappresenta un sottosistema o un componente. Questi schemi non trovano in generale corrispondenza nello schema funzionale di un impianto: infatti essi rappresentano graficamente la dipendenza logica dell'evento "guasto del sistema" dall'evento "guasto di un certo componente", il che non è in generale in corrispondenza con la dislocazione fisica e la funzione svolta dai singoli componenti.

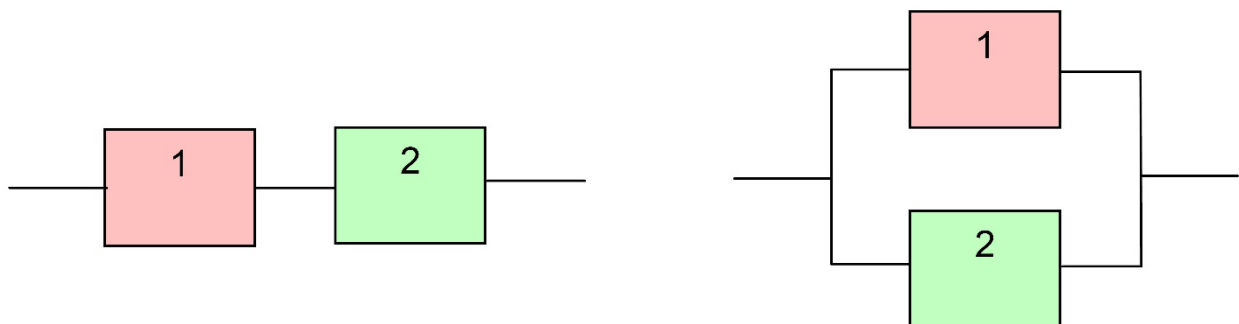


Figura 6 - schema logico "Serie" e schema "Parallelo" per uno stesso sistema fisico

In definitiva, si potrà dire che, se un elemento di impianto risulta rappresentato "in parallelo" nello schema logico, un suo guasto non provoca il fuori servizio dell'intero sistema; mentre l'opposto accade nel caso della rappresentazione "in serie", in cui invece il guasto del singolo componente comporta il guasto dell'intero sistema. La rappresentazione serie o parallelo, che è una rappresentazione puramente logica del sistema e non coincide generalmente con lo schema funzionale, varia per un medesimo sistema in funzione del guasto considerato.

I due schemi logici rappresentati, serie e parallelo, costituiscono gli schemi fondamentali tramite i quali analizzare i sistemi complessi; un sistema complesso può essere infatti ricondotto ad una combinazione di sottosistemi elementari serie o parallelo, ed è su questi che verrà quindi focalizzata nel seguito l'attenzione.

2.6.9 Affidabilità del sistema in serie

In un sistema “serie” ovvero un sistema che non è ridondato e situa tutte le sue sub unità in sequenza sia logica che funzionale, tutte le componenti devono funzionare affinché il sistema completo funzioni ovvero un sistema di n componenti viene considerato serie rispetto ad un determinato evento guasto, quando l’evento guasto si verifica nel momento in cui almeno un componente del sistema è guasto. La schematizzazione logica di un sistema siffatto viene riportata.



Figura 7 - schematizzazione del sistema serie

Dal momento che l’affidabilità del sistema esprime la probabilità che il sistema sia in condizioni di buon funzionamento al generico istante, se si suppongono i guasti dei singoli componenti tra loro indipendenti, l’affidabilità del sistema di n componenti in serie è data dal prodotto delle affidabilità dei singoli componenti, ossia:

$$R_{sys} = \prod_{i=1}^N R_i = \prod_{i=1}^N e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^N \int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda_{sys}(t) dt}$$

da cui si ha che il rateo di guasto del sistema è uguale alla somma dei ratei di guasto dei singoli componenti:

$$\lambda_{sys}(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(t)$$

Se si suppone che tutti i componenti del sistema si trovino nel periodo di vita utile e che dunque siano caratterizzati da un rateo di guasto costante, anche il rateo di guasto del sistema sarà costante:

$$\lambda_{sys}(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) = cost$$

e quindi, sostituendo nell’espressione appena ricavata, si ottiene:

$$R_{sys} = e^{-\int_0^t \lambda_{sys}(t) dt} = e^{-\lambda_{sys}(t)} = e^{-\sum_{i=1}^N \lambda_i(t)}$$

che rappresenta l’espressione dell’affidabilità per un sistema serie di n componenti nel periodo di vita utile.

Per quanto riguarda l’espressione del MTBF si ha:

$$MTBF_i = \frac{1}{\lambda_i}$$

Si ha quindi:

$$MTBF_{sys} = \frac{1}{\lambda_{sys}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{MTBF_i}}$$

2.6.10 Affidabilità dei sistemi in Parallelo (A Funzionamento Permanente)

Un sistema di n componenti viene considerato parallelo a funzionamento permanente rispetto ad un determinato evento guasto, quando l'evento guasto si verifica nel momento in cui tutti i componenti o un certo numero di componenti del sistema sono guasti, posto che tutti i componenti sono in funzione contemporaneamente. La schematizzazione logica di un sistema siffatto viene riportata in Figura 8.

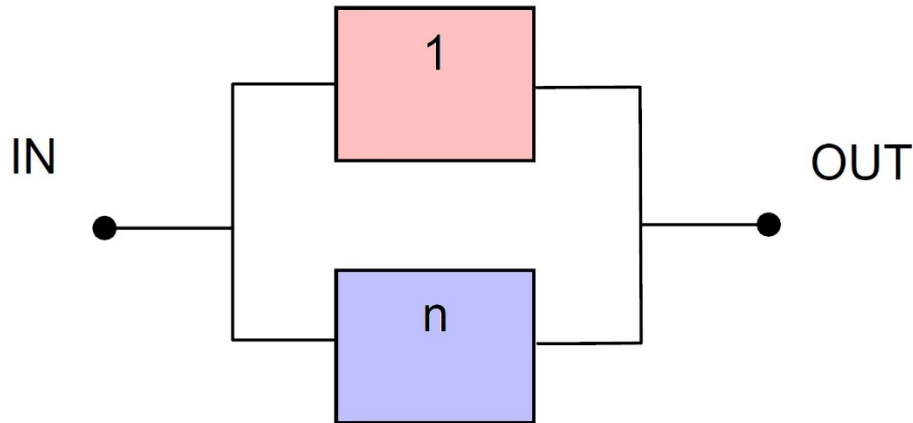


Figura 8 - schematizzazione di un sistema in parallelo a funzionamento permanente

Il sistema si dice in ridondanza semplice nel caso in cui il sistema è guasto nel momento in cui tutti i componenti sono guasti, mentre è in ridondanza multipla quando il funzionamento del sistema è garantito dal funzionamento di almeno due componenti.

Nel caso di un sistema parallelo a funzionamento permanente in ridondanza semplice, il calcolo dell'affidabilità viene effettuato partendo dalla *guastabilità* $F_{sys}(t)$ del sistema, ed osservando che il sistema è guasto al generico istante se tutti i componenti del sistema sono guasti a quell'istante; quindi:

$$F_{sys}(t) = \prod_{i=1}^N F_i(t) = \prod_{i=1}^N (1 - R_i(t)) = \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt})$$

Da cui

$$R_{sys}(t) = 1 - F_{sys}(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt})$$

Se si suppone che tutti i componenti si trovino nel periodo di vita utile e che i ratei di guasto siano tra loro tutti uguali, ossia:

$$\lambda_1(t) = \lambda_2(t) = \lambda_3(t) = \dots = \lambda_N(t) = cost$$

si ottiene:

$$R_{sys}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^N$$

Sviluppando col binomio di Newton

$$R_{sys}(t) = 1 - \left(1 - \binom{N}{1} e^{-\lambda t} + \binom{N}{2} e^{-2\lambda t} - \binom{N}{3} e^{-3\lambda t} + \dots \right)$$

ovvero

$$R_{sys}(t) = N e^{-\lambda t} - \frac{N(N-1)}{2!} e^{-2\lambda t} + \frac{N(N-1)(N-2)}{3!} e^{-3\lambda t} - \dots$$

Per quanto riguarda l'MTBF, si ha:

$$\begin{aligned}
 MTBF_{sys} &= \int_0^{\infty} R_{sys}(t) dt = \int_0^{\infty} \left(N e^{-\lambda t} - \frac{N(N-1)}{2!} e^{-2\lambda t} + \frac{N(N-1)(N-2)}{3!} e^{-3\lambda t} - \dots \right) dt = \\
 MTBF_{sys} &= \left[-\frac{N}{\lambda} e^{-\lambda_{sys}t} \right]_0^{\infty} - \left[-\frac{N(N-1)}{2!} \frac{1}{2\lambda} e^{-2\lambda t} \right]_0^{\infty} + \left[-\frac{N(N-1)(N-2)}{3!} \frac{1}{3\lambda} e^{-3\lambda t} \right]_0^{\infty} - \dots = \\
 MTBF_{sys} &= \frac{N}{\lambda} - \frac{N(N-1)}{2!} \frac{1}{2\lambda} + \frac{N(N-1)(N-2)}{3!} \frac{1}{3\lambda} - \dots
 \end{aligned}$$

Che rappresenta l'espressione generale per il MTBF nel caso di n componenti in parallelo in ridondanza semplice.

Nel caso ad esempio di un sistema costituito da due soli componenti

$$MTBF_2 = \frac{2}{\lambda} - \frac{2(2-1)}{2!} \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2\lambda}$$

ossia superiore del 50% rispetto al componente preso singolarmente.

2.6.11 Sistemi Parallelo a Funzionamento Sequenziale

I sistemi in parallelo a funzionamento sequenziale si differenziano rispetto al caso visto precedentemente dal momento che, mentre nel caso di sistemi a funzionamento permanente gli n componenti funzionano tutti contemporaneamente, nel caso di funzionamento sequenziale funziona sempre un solo componente alla volta. Nel momento in cui si verifica un guasto sul componente in funzione in quel momento, un commutatore permette di mettere in funzionamento un componente che si trovava precedentemente in condizioni di stand by.

Lo schema logico del sistema, nel caso di due componenti, è mostrato nella figura sottostante.

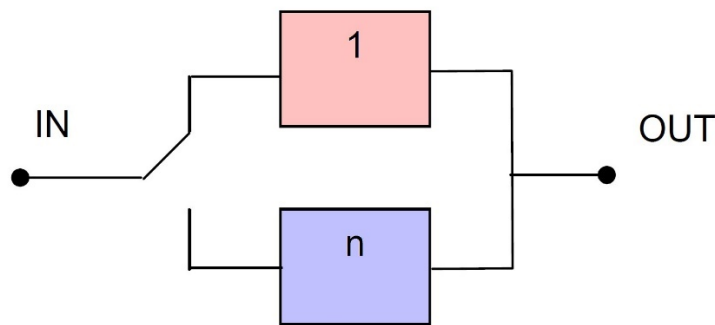


Figura 9 - Schema logico di un sistema in parallelo di due componenti a funzionamento sequenziale

Il calcolo dell'affidabilità viene inizialmente fatto per il sistema a due componenti, estendendo quindi il discorso al caso generale di sistema ad n componenti. In entrambi i casi si ritiene l'affidabilità del commutatore unitaria. Nel caso di due soli componenti, il sistema funziona all'istante generico t, se funziona il componente 1, oppure, noto che si sia guastato il componente 1 all'istante generico t, con $0 < \tau < t$, il componente 2, che è entrato in funzione all'istante τ , funziona all'istante t. Quindi:

$$R_{sys}(t) = R_1(t) + \int_0^t F_1(\tau) \cdot R_1(t - \tau) \cdot d\tau$$

$$R_{sys}(t) = e^{-\lambda t} + \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda t} \cdot e^{-\lambda(t-\tau)} \cdot d\tau$$

$$R_{sys}(t) = e^{-\lambda t} + \lambda \cdot \int_0^t e^{(-\lambda\tau + \lambda t + \lambda\tau)} \cdot d\tau$$

$$R_{sys}(t) = e^{-\lambda t} + \lambda \cdot \int_0^t e^{\lambda t} d\tau$$

Dove si sono supposti i ratei di guasto costanti ed uguali tra di loro.

Dal momento che t è fisso mentre la variabile è τ , la quantità all'interno dell'integrale è costante e quindi si ottiene:

$$R_{sys}(t) = e^{-\lambda t} + \lambda \cdot e^{-\lambda t} \cdot t$$

$$R_{sys}(t) = e^{-\lambda t} + (1 + \lambda t)$$

che rappresenta l'espressione dell'affidabilità per un sistema di due elementi in parallelo a funzionamento sequenziale.

Allo stesso risultato si poteva arrivare attraverso la seguente osservazione: il sistema in questione, per le ipotesi fatte, funziona all'istante t se nell'intervallo $[0, \dots, t]$ non si sono verificati guasti o, al massimo si è verificato un solo guasto. Ritenendo la probabilità di guasto di un componente distribuita *poissonianamente* per le ipotesi di costanza del rateo di guasto, si ha allora:

$$R_{sys}(t) = P(0) + P(1)$$

$$R_{sys}(t) = \frac{(\lambda t)^0}{0!} \cdot e^{-\lambda t} + \frac{(\lambda t)^1}{1!} \cdot e^{-\lambda t}$$

$$R_{sys}(t) = e^{-\lambda t} \cdot (1 + \lambda t)$$

L'espressione dell'affidabilità per un sistema ad n componenti in parallelo a funzionamento sequenziale può essere allora semplicemente ricavata come probabilità di avere al massimo n-1 guasti nell'intervallo $[0, \dots, t]$, ossia:

$$R_{sys}(t) = P(0) + P(1) + \dots + P(N - 1)$$

$$R_{sys}(t) = \frac{(\lambda t)^0}{0!} \cdot e^{-\lambda t} + \frac{(\lambda t)^1}{1!} \cdot e^{-\lambda t} + \dots + \frac{(\lambda t)^{N-1}}{(N-1)!} \cdot e^{-\lambda t}$$

$$R_{sys}(t) = e^{-\lambda t} \cdot \left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{N-1}}{(N-1)!} \right)$$

Se il numero di componenti tende all'infinito, la serie

$$\left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{N-1}}{(N-1)!} \right)$$

Tende a $e^{-\lambda t}$ e quindi l'affidabilità del sistema, all'aumentare del numero dei componenti, tende all'unità. Per quanto riguarda infine il valore del MTBF si ha:

$$\begin{aligned}
 MTBF_{sysN} &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot \left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{N-1}}{(N-1)!} \right) dt \\
 MTBF_{sysN} &= \left[-\frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(\lambda t)^k}{k!} \right]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} \left[-\frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \left(\sum_{k=0}^{N-1} \frac{(\lambda t)^k}{k!} \cdot k\lambda \right) \right] dt \\
 MTBF_{sysN} &= \frac{1}{\lambda} - \int_0^{\infty} \left[-\frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \left(\sum_{k=0}^{N-1} \frac{(\lambda t)^k}{k!} \cdot k\lambda \right) \right] dt \\
 MTBF_{sysN} &= \frac{1}{\lambda} + \int_0^{\infty} \left[e^{-\lambda t} \cdot \left(\sum_{k=0}^{N-1} \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} \right) \right] dt \\
 MTBF_{sysN} &= \frac{1}{\lambda} + \int_0^{\infty} \left[e^{-\lambda t} \cdot \left(\frac{(\lambda t)^{-1}}{(-1)!} + \sum_{k=1}^{N-1} \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} \right) \right] dt \\
 MTBF_{sysN} &= \frac{1}{\lambda} + \int_0^{\infty} \left[e^{-\lambda t} \cdot \left(\sum_{k=0}^{N-2} \frac{(\lambda t)^k}{(k)!} \right) \right] dt
 \end{aligned}$$

Ci si è quindi ricondotti all'integrale di partenza che viene nuovamente risolto per parti ottenendo il valore $1/\lambda$ ed abbassando di grado la sommatoria. In definitiva si ottiene:

$$MTBF_{sysN} = \frac{1}{\lambda} + \dots + \frac{1}{\lambda} + \int_0^{\infty} [e^{-\lambda t}] dt = \frac{N}{\lambda}$$

Quindi, ad esempio, nel caso di due componenti in parallelo a funzionamento sequenziale raddoppia, mentre si era visto che nel caso di funzionamento permanente si aveva un incremento del 50%.

2.7 Tabella dei risultati

Per il sistema, abbiamo la seguente tabella dei risultati:

Analisi affidabilità del sistema di generazione fotovoltaica dell'edificio F-40						
Descrizione	π_Q (Environment)	λ_P Singolo (F/10 ⁶ hrs)	Quantità	λ_P TOTALE (F/10 ⁶ hrs)	MTBF (hours)	Incidenza (%)
Pannello solare (Gruppo 1)	Ground, Unsheltered	3.11	10	31.10	32,154.3	23.32%
Pannello solare (Gruppo 2)	Ground, Unsheltered	3.11	10	31.10	32,154.3	23.32%
Interruttore GPS1	Ground, Fixed	2.12	1	2.12	471,698.1	1.59%
Interruttore GPS2	Ground, Fixed	2.22	1	2.22	450,450.5	1.66%
Regolatore GPS	Ground, Fixed	1.15	1	1.15	869,565.2	0.86%
Regolatore di Carica	Ground, Benign	5.11	1	5.11	195,694.7	3.83%
Quadro Elettrico	Ground, Fixed	3.78	1	3.78	264,550.3	2.83%
Interruttore GB1	Ground, Fixed	2.07	1	2.07	483,091.8	1.55%
Interruttore GB2	Ground, Fixed	2.90	1	2.90	344,827.6	2.17%
Regolatore GB1	Ground, Fixed	1.54	1	1.54	649,350.6	1.15%
Regolatore GB2	Ground, Fixed	1.59	1	1.59	628,930.8	1.19%
Inverter	Ground, Fixed	3.22	1	3.22	310,559.0	2.41%
Batteria Gruppo 1	Ground, Fixed	0.95	14	13.30	75,188.0	9.97%
Batteria Gruppo 2	Ground, Fixed	0.95	14	13.30	75,188.0	9.97%
Interruttore GBOU	Ground, Fixed	1.01	1	1.01	990,099.0	0.76%
Regolatore OUT	Ground, Fixed	1.25	1	1.25	800,000.0	0.94%
Server	Ground, Benign	2.74	1	2.74	364,963.5	2.05%
Wi-Fi	Ground, Benign	4.71	1	4.71	212,314.2	3.53%
Switch Interno/Esterno	Ground, Benign	7.90	1	7.90	126,582.3	5.92%
PC Main	Ground, Benign	1.27	1	1.27	787,401.6	0.95%
λ TOTALE =				133.38		
MTBF (R_{Total}) =				7,497.38	Ore	
				312.39	Giorni	
				11.16	Mesi	

Nella prima colonna abbiamo l'environment in cui viene considerata l'affidabilità, nella seconda colonna abbiamo il valore affidabilistico del singolo componente o sottosistema, nella terza la quantità e nella quarta, in ottemperanza al metodo del part count, il contributo complessivo dato da quella tipologia in funzione della quantità. Di seguito c'è l'MBTF complessivo relativo ordinatamente alla colonna alla sua destra. L'ultima colonna ci dà il senso percentuale di quanto incida complessivamente sulla figura di affidabilità totale.

2.8 Disponibilità (Availability) Del Sistema

Tutti gli impianti fotovoltaici corrono il rischio di guastarsi o avere un malfunzionamento sia nei periodi in cui c'è più sole, sia nei periodi in cui il maltempo crea eventi temporaleschi, provocando sbalzi di tensione sulle linee elettriche. Almeno una volta all'anno l'impianto ha un problema: stringhe di pannelli che non producono, fusibili o quadri bruciati, contatore dell'inverter in avaria e problemi alle batterie sono solo alcuni esempi. Un guasto estivo che si protrae per 15 giorni, causa una perdita di 30.000 € ad un impianto da 1 MW e 3.000 € per un impianto di 100 kW. L'esecuzione di un'attività programmata di verifica delle condizioni dell'impianto consente di prevenire danni in occasione di eventi straordinari, oppure guasti nei periodi in cui l'impianto è più sollecitato: valutare la disponibilità del sistema è necessario per apporzonare i periodi di guasto e tamponarli opportunamente.

2.8.1 Introduzione

I calcoli di affidabilità visti precedentemente sono particolarmente significativi per i componenti ed i sistemi non riparabili, ossia per quei casi in cui l'accadimento del guasto comporta la sostituzione del componente o del sistema: un caso classico di applicazione non riparabile è appunto un sistema satellitare, in quanto è posto in un environment che ne impedisce questo tipo di operazione.

Nella maggior parte dei casi impiantistici di terra però, si ha a che fare con sistemi e componenti riparabili, ossia componenti sui quali, al momento del verificarsi del guasto, possono essere apportati interventi di manutenzione atti a riportare il sistema in condizioni di buon funzionamento.

Apparecchiature e sistemi riparabili quindi nella loro vita compiono numerosi cicli; i parametri di affidabilità sono ancora calcolabili, sebbene con maggiori difficoltà matematiche, tuttavia in questo caso assume maggiore importanza un altro parametro, nel quale confluiscono due termini, che tengono conto l'uno della frequenza dei guasti e l'altro dei tempi di riparazione: questo parametro è detto disponibilità (*Availability*).

2.8.2 Definizione di Disponibilità

La disponibilità è direttamente correlata con la capacità di utilizzazione degli impianti, vista sotto l'aspetto tecnico, escludendo cioè cause di fermata di natura organizzativa generale o di politica aziendale. Alla disponibilità può essere attribuito un duplice significato: essa infatti da una parte rappresenta la percentuale di tempo di buon funzionamento del sistema produttivo, calcolata su un lungo periodo di tempo; essa è quindi espressa dal rapporto tra il tempo produttivo lordo e il tempo di utilizzo netto:

$$A = \frac{T_{UN} - T_{gm}}{T_{UN}} = \frac{T_{PL}}{T_{UN}}$$

Dall'altra parte può essere interpretata come probabilità, e precisamente come la probabilità che, in un istante di tempo generico, il sistema (riparabile) sia funzionante. Tale probabilità è in generale funzione del tempo trascorso a partire dal momento in cui il sistema è "nuovo"; il calcolo di tale funzione è possibile anche se complicato analiticamente.

2.8.3 Disponibilità a regime

In genere è però sufficiente riferirsi ad un valore "a regime" cioè quando è trascorso un certo tempo dall'istante iniziale della vita. In questo caso il valore della disponibilità è costante nel tempo ed ha lo stesso valore del rapporto percentuale del tempo di funzionamento rispetto al tempo globale. In termini analitici la disponibilità è quindi data da:

$$A = \frac{UT}{UT + DT}$$

Dove:

- UT (up-time) rappresenta il tempo in cui il sistema è realmente disponibile per il funzionamento, cioè il tempo in cui il sistema potrebbe essere in esercizio (indipendentemente dal fatto che si decida di farlo funzionare o meno) ottenuto come somma dei tempi di effettivo funzionamento e dei tempi di attesa.
- DT (down-time) rappresenta il tempo di fuori servizio imputabile a cause tecniche, quali guasti e manutenzioni, in cui quindi non vengono conteggiate le fermate per politiche organizzative del lavoro. Il tempo di fuori servizio DT di un impianto dovuto ai guasti è la risultante di numerosi fattori concorrenti.

2.8.4 Composizione del Down Time

In una prima classificazione, è possibile suddividere il tempo di fuori servizio imputabile a cause tecniche distinguendo tempi di manutenzione preventiva ed i tempi per manutenzione in seguito a guasto. In particolare, mentre nel caso di manutenzione preventiva non è possibile identificare dei tempi standard di riferimento, dal momento che le operazioni di manutenzione preventiva dipendono fortemente dall'impianto considerato. Invece, nel caso di manutenzione in seguito a guasto è possibile identificare una serie di tempi componenti, la cui somma fornisce il valore complessivo del tempo di fermata in seguito al guasto. Questi tempi sono:

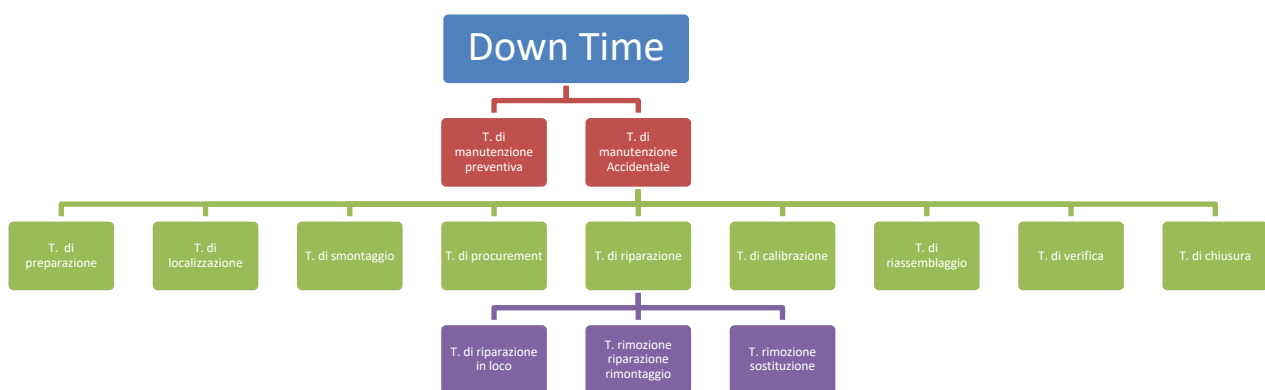


Figura 10 - Composizione del Down time

- **Il tempo di preparazione:** tempo di manutenzione necessario per ottenere le apparecchiature, gli strumenti per i controlli, i manuali di manutenzione e per la fornitura degli strumenti necessari per iniziare l'operazione di localizzazione del guasto.
- **Il tempo di localizzazione:** tempo durante il quale il guasto deve essere individuato; si fanno test ed analisi sulla macchina al fine di isolare la causa del guasto.
- **Il tempo di smontaggio:** tempo necessario per accedere alle parti guaste e decidere il da farsi (riparazione o sostituzione).
- **Il tempo di procurement:** parte di tempo di manutenzione durante la quale i pezzi di ricambio per i componenti da sostituire sono ordinati al magazzino, e da questo vengono forniti.
- **Il tempo di riparazione:** parte di tempo di manutenzione durante la quale la rottura è riparata o mediante riparazione in loco, oppure con rimozione, riparazione non in loco e ricollocazione, oppure ancora mediante rimozione e sostituzione con pezzo di ricambio.
- **Il tempo di aggiustaggio e calibrazione:** parte del tempo di manutenzione durante la quale vengono effettuate le operazioni di aggiustaggio e calibrazione del componente riparato.

- **Il tempo di riassettaggio** è quello necessario per rimontare la macchina.
- **Il tempo di verifica:** parte del tempo di manutenzione durante la quale ci si accerta che l'apparecchiatura riparata funzioni correttamente.
- **Il tempo di pulizia e chiusura** è quella parte di tempo di manutenzione necessario a riassegnare la macchina all'esercizio, in cui cioè la squadra di manutenzione allontana materiali estranei, compie operazioni di pulizia, ecc.

Ovviamente esistono numerosi fattori che influenzano la durata totale della riparazione: alcuni sono fattori di progetto, altri di natura organizzativa, altri connessi alla pratica operativa. Tra i fattori di progetto si possono elencare:

- la complessità del macchinario;
- la configurazione dei componenti;
- il peso dei componenti;
- la modularizzazione dei componenti;
- la miniaturizzazione dei componenti;
- la visibilità dei componenti;
- l'accessibilità dei componenti;
- la standardizzazione dei componenti;
- l'intercambiabilità dei componenti;
- la facilità di smontaggio dei componenti;
- la facilità di rimontaggio dei componenti.

Tra i fattori di natura organizzativa:

- l'addestramento della manodopera;
- la direzione della manodopera;
- la disponibilità (dimensionamento) delle squadre;
- l'efficienza del magazzino ricambi;
- la logistica degli impianti e dei servizi ed il grado di decentramento del servizio manutenzione;
- la disponibilità di documentazione (schede macchina, disegni ecc.).

Tra i fattori operativi infine si possono citare:

- l'abilità della manodopera;
- gli attrezzi in dotazione;
- gli strumenti di misura in dotazione;
- le procedure per la preparazione del lavoro o per interventi di emergenza.

Nel caso più generale quindi, il tempo di fuori servizio di un sistema in un certo periodo risulta dalla somma del tempo dovuto agli interventi di manutenzione preventiva o periodica e del tempo dovuto alle operazioni di manutenzione accidentale.

Se allora si indica con:

N_g il numero delle operazioni di manutenzione accidentale nel periodo esaminato.

N_p il numero delle operazioni di manutenzione preventiva nello stesso periodo.

$MTTR_g$ il tempo medio di riparazione correttiva.

$MTTR_p$ il tempo medio per le operazioni di manutenzione preventiva.

Il tempo totale di fermata è dato allora da:

$$MTTR_g \cdot N_g + MTTR_p \cdot N_p$$

I tempi di riparazione in seguito a guasto sulla stessa apparecchiatura presentano una grande variabilità in relazione alle componenti appena elencate che intervengono. Si parlerà quindi, come per i tempi di guasto, di una distribuzione di probabilità dei tempi di riparazione t_r .

La funzione di densità di probabilità che più generalmente viene usata per la descrizione del fenomeno è di tipo lognormale. L'utilizzo di tale distribuzione non ha alcun fondamento teorico, ma si vede come nella maggior parte dei casi permetta di ben fittare l'andamento dei tempi di riparazione rilevato sperimentalmente.

La funzione di densità di probabilità dei tempi di riparazione viene espressa dalla seguente relazione:

$$f(t_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot t_r} \cdot e^{-\frac{(\ln t_r - m)^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

dove m è la media dei logaritmi dei tempi di riparazione:

$$m = \frac{\sum_i \ln t_{ri}}{N}$$

e la relativa varianza è:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i (\ln t_{ri} - m)^2}{N - 1}$$

La funzione cumulata $F(t_r)$ è detta *manutenibilità* ed esprime il valore della probabilità che la riparazione venga portata a termine entro un certo tempo:

$$F(t_r) = \int_0^{t_r} f(t_r) \cdot dt_r$$

In particolare allora il tempo medio di riparazione MTTR è allora dato da

$$MTTR = \int_0^{\infty} t_r \cdot f(t_r) \cdot dt_r = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot t_r} \cdot e^{-\frac{(\ln t_r - m)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \cdot dt_r$$

Per la valutazione pratica della disponibilità dell'impianto, a causa dell'estrema aleatorietà del tempo di riparazione e del tempo di funzionamento, è necessario assumere un tempo di riferimento sufficientemente ampio. Si valutano a questo punto i tempi di funzionamento, ciascuno di durata T_i , ed i tempi di riparazione, ciascuno con durata t_i .

Il tempo complessivo di funzionamento UT è dato da:

$$UT = \sum_{i=1}^N T_i$$

Mentre il tempo complessivo di fermata per cause tecniche DT (guasto o manutenzione preventiva) sarà dato da:

$$DT = \sum_{i=1}^N t_i$$

le sommatorie sono estese agli N intervalli di Up time – Down time e, considerata la disponibilità, vale:

$$A = \frac{UT}{UT + DT} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N T_i + \sum_{i=1}^N t_i}$$

$$A = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}}$$

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

Nel caso di un'apparecchiatura complessa, il valore del MTTR può essere espresso come segue. Se si immagina che l'apparecchiatura sia costituita da n tipologie di componenti e che l'apparecchiatura venga riparata nel momento in cui uno dei componenti si guasta (caso a cui ci si può quasi sempre ricondurre, suddividendo opportunamente i componenti dell'apparecchiatura), detti C_i il numero di componenti di tipo i-esimo, con tempo di riparazione medio per il componente di tipo i-esimo pari a t_i , e detto λ_i il rateo di guasto del componente di tipo i-esimo, si ha che il MTTR in caso di solo guasto vale:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot \lambda_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n C_i \cdot \lambda_i}$$

dove il termine a denominatore rappresenta il numero di guasti per i componenti di tipo isimo. Considerando anche k_p fermate per manutenzione preventiva di durata media t_p , si ottiene infine

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot \lambda_i \cdot t_i + k_p \cdot t_p}{\sum_{i=1}^n C_i \cdot \lambda_i + k_p}$$

2.9 Dati di disponibilità

Di seguito la tabella riassuntiva che riporta la disponibilità del sistema:

	Qty	preparazione [min]	localizzazione [min]	smontaggio [min]	procurement [min]	riparazione o sostituzione [min]	aggiustaggio e calibrazione [min]	riassembaggio [min]	verifica [min]	pulizia e chiusura [min]	Tot singolo [min]	Tot gruppo		Incidenza [%]
												[min]	[h]	
Pannello solare (Gruppo 1)	10	20	50	120	40	1	0	10	10	120	371	3710	61.83	30.76%
Pannello solare (Gruppo 2)	10	20	50	120	40	1	0	10	10	120	371	3710	61.83	30.76%
Interruttore GPS1	1	26	1	12	21	1	0	12	10	9	92	92	1.53	0.76%
Interruttore GPS2	1	26	1	12	21	1	0	12	10	9	92	92	1.53	0.76%
Regolatore GPS	1	21	1	1	21	1	10	1	3	1	60	60	1.00	0.50%
Regolatore di Carica	1	28	1	1	21	1	1	1	3	1	58	58	0.97	0.48%
Quadro Elettrico	1	21	32	1	10	1	1	1	32	1	100	100	1.67	0.83%
Interruttore GB1	1	25	1	1	21	1	1	1	3	1	55	55	0.92	0.46%
Interruttore GB2	1	28	1	1	21	1	1	1	3	1	58	58	0.97	0.48%
Regolatore GB1	1	22	1	1	21	1	1	1	3	1	52	52	0.87	0.43%
Regolatore GB2	1	23	1	1	21	1	1	1	3	1	53	53	0.88	0.44%
Inverter	1	21	1	1	21	1	1	1	3	1	51	51	0.85	0.42%
Batteria Gruppo 1	14	25	42	10	21	1	1	10	10	10	130	1820	30.33	15.09%
Batteria Gruppo 2	14	25	42	10	21	1	1	10	10	10	130	1820	30.33	15.09%
Interruttore GBOUT	1	21	1	1	21	1	1	1	3	1	51	51	0.85	0.42%
Regolatore OUT	1	21	1	1	21	1	1	1	3	1	51	51	0.85	0.42%
Server	1	10	1	1	21	1	0	1	40	1	76	76	1.27	0.63%
Wi-Fi	1	10	1	1	21	1	0	1	2	1	38	38	0.63	0.32%
Switch Interno/Esterno	1	10	1	1	21	1	1	1	2	1	39	39	0.65	0.32%
PC Main	1	10	1	1	21	1	0	1	40	1	76	76	1.27	0.63%

Downtime Totale	12062	201.03
------------------------	--------------	---------------

2.10 Analisi dei Guasti e di Criticità (FMECA)

2.10.1 Criteri

Nell'analisi FMECA l'intero sistema viene esaminato a livello funzionale e vengono determinati gli effetti dei guasti e dei malfunzionamenti sulle prestazioni dell'apparecchiatura. I circuiti di interfaccia delle varie unità, invece, vengono analizzati a livello di componente. Per ogni modalità di guasto, viene studiato:

- il suo effetto;
- la sua causa;
- i modi per ovviare al guasto, con particolare attenzione alle eventuali raccomandazioni per la modifica del progetto o ai metodi di prevenzione, se possibile;
- la frequenza con la quale viene osservata la modalità di guasto.

Questi risultati vengono utilizzate per:

- identificare i guasti "singolari";
- individuare elementi critici;
- identificare gli errori e le sottovalutazioni del progetto;
- verificare, per quanto possibile, che tutte le modalità di guasto critico possano essere completamente testate a livello di sottosistema in sede di assemblaggio.

2.10.2 Assunzioni

Nella successiva analisi F.M.E.A. vengono fatte le seguenti ipotesi:

- si presume il totale guasto della funzione esaminata;
- viene considerata una solo la modalità di guasto per volta (ovvero non sono presi in considerazione guasti correlati, se non come raccomandazione);
- l'analisi F.M.E.A. viene eseguita a livello di funzione e di unità, ad eccezione dei circuiti I/F che sono analizzati a livello dei componenti (ove mai sia possibile ed opportuno);
- non vengono considerate le probabilità di guasto, oggetto di analisi apposite.

Il modo di guasto presunto riportato nelle tabelle FMEA è segnalato in funzione del guasto peggiore, cioè la perdita della funzione dell'unità principale.

La categoria di criticità viene sempre assegnata prima di segnalare i modi di compensazione e, per ciascuna modalità di errore, le categorie di criticità vengono assegnate come segue:

TABELLA DELLE CATEGORIE DI CRITICITA'	
Cat.	Descrizione
1	La modalità di guasto presunta provoca presumibilmente distruzione o degrado delle funzioni di altri apparati.
2	La modalità di guasto presunta provoca il guasto totale ed irreversibile degli apparati in esame.
3	La modalità di guasto presunta provoca il degrado grave delle funzioni degli apparati in esame.
4	La modalità di guasto presunta provoca il degrado lieve delle funzioni degli apparati in esame.
5	La modalità di guasto presunta provoca il degrado minimo o trascurabile delle funzioni degli apparati in esame.

N.B.: nessun sistema interno o sottosistema è ridonato.

2.10.3 Formato delle tabelle

Le seguenti informazioni sono riportate nelle colonne della tabella seguente:

Nome	Descrizione
Numero Colonna	Numero progressivo riferito alla funzione in esame.
Item	Blocco funzionale principale nell'ambito dell'analisi, riferito allo schema a blocchi funzionali.
Descrizione e funzionamento	Descrizione del funzionamento blocco funzionale in esame.
Modalità di Guasto	Modalità di guasto presunta della funzione in esame.
Sintomi Osservabili	L'effetto osservabile (dall'esterno del sistema) della modalità di guasto.
Metodi di Prevenzione o Compensazione	Operazioni anche preventive da intraprendere per mitigare gli effetti del guasto.
Criticità	La categoria di criticità secondo la tabella di cui al punto precedente.
Raccomandazioni e commenti	Raccomandazioni per mitigare gli effetti del guasto e commenti <i>a latere</i> .

Seguono le tabelle di FMECA.

2.10.4 Tabelle FMECA

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
1	Pannello solare (Gruppo 1)	Trasforma l'energia solare in energia elettrica					
1.1			Corto Circuito	Abbassamento della tensione disponibile	Sostituzione pannello	2	
1.2			Circuito aperto	Non funzionamento del gruppo pannelli in serie	Sostituzione pannello	2	
1.3			Riduzione del rendimento elettrico	Riduzione del rendimento elettrico >50%	Se prima del 10° anno di vita, sostituire quando le prestazioni divengono marginali	3	
1.4			Riduzione del rendimento elettrico	Riduzione del rendimento elettrico >10%	Se prima del 5° anno di vita, sostituire quando le prestazioni divengono marginali	3	
1.5			Riduzione del rendimento elettrico	Riduzione del rendimento elettrico >1%	Se prima del primo anno di vita, sostituire quando le prestazioni divengono marginali	3	
2	Pannello solare (Gruppo 2)	Trasforma l'energia solare in energia elettrica					
2.1			Corto Circuito	Abbassamento della tensione disponibile	Sostituzione pannello	2	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40

N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
2.2			Circuito aperto	Non funzionamento del gruppo pannelli in serie	Sostituzione pannello	2	
2.3			Riduzione del rendimento elettrico	Riduzione del rendimento elettrico >50%	Se prima del 10° anno di vita, sostituire quando le prestazioni divengono marginali	3	
2.4			Riduzione del rendimento elettrico	Riduzione del rendimento elettrico >10%	Se prima del 5° anno di vita, sostituire quando le prestazioni divengono marginali	3	
2.5			Riduzione del rendimento elettrico	Riduzione del rendimento elettrico >1%	Se prima del primo anno di vita, sostituire quando le prestazioni divengono marginali	3	
3	Interruttore GPS1	Interruttore sezionatore: esclude dalla linea i pannelli solari del gruppo 1					
3.1			Corto Circuito	Sicurezza Regolatore GPS scattata: tutti i pannelli solari fuori linea	Sostituzione	4	
3.2			Circuito aperto	Esclusione dalla linea dei pannelli solari del gruppo 1	Sostituzione	4	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
3.3			Bloccato	Bloccato chiuso: esclusione dalla linea dei pannelli solari del gruppo 1 Bloccato aperto: impossibile inserire la linea dei pannelli solari del gruppo 1	Sostituzione	4	
4	Interruttore GPS2	Interruttore sezionatore: esclude dalla linea i pannelli solari del gruppo 2					
4.1			Corto Circuito	Sicurezza Regolatore GPS scattata: tutti i pannelli solari fuori linea	Sostituzione	4	
4.2			Circuito aperto	Esclusione dalla linea dei pannelli solari del gruppo 2	Sostituzione	4	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40

N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
4.3			Bloccato	Bloccato chiuso: esclusione dalla linea dei pannelli solari del gruppo 2 Bloccato aperto: impossibile inserire la linea dei pannelli solari del gruppo 2	Sostituzione	4	
5	Regolatore GPS	Si assicura che il flusso di corrente fluisca solo dall'array di pannelli solari al regolatore di carica. Contiene un fusibile di sicurezza (rimovibile)					
5.1			Circuito aperto	Esclusione dalla linea di tutti i pannelli solari	Sostituzione regolatore	3	
5.2			Fusibile bruciato	Esclusione dalla linea di tutti i pannelli solari	Sostituzione fusibile	3	
5.3			Corto Circuito	Scatta la sicurezza (braker) dell'Interruttore GPS1 e dell'Interruttore GPS2	Sostituzione	3	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
6	Regolatore di Carica	Regola l'energia prodotta dai pannelli e decide quando si scende sotto la soglia di start. Gestisce la quota parte di carica delle batterie. Può alimentare direttamente l'inverter					
6.1			Degradazione lieve delle prestazioni	Imprecisa carica delle batterie: gruppi lievemente sotto alimentati	Revisione	5	Controllo periodico dell'apparato
6.2			Degradazione grave delle prestazioni	Insufficiente carica delle batterie: Inverter alimentato direttamente finché c'è irraggiamento solare	Sostituzione	3	Controllo periodico dell'apparato
6.3			Guasto grave	Carica delle batterie: impossibile Inverter alimentato solo dalla potenza residua delle batterie	Sostituzione	2	Controllo periodico dell'apparato

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40

N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
7	Quadro Elettrico	Contiene interruttori sezionatori: esclude dalla linea il regolatore di carica dall'Inverter					
7.1			Corto Circuito interruttore #n	Sicurezza Regolatore di carica scattata: tutti i pannelli solari fuori linea: non è possibile alimentare l'inverter direttamente dal regolatore	Interruttore #n	3	
7.2			Circuito aperto	Tutti i pannelli solari fuori linea: non è possibile alimentare l'inverter direttamente dal regolatore	Interruttore #n	3	
7.3			Bloccato	Bloccato chiuso: non è possibile disalimentare l'inverter direttamente dal regolatore Bloccato aperto: non è possibile alimentare l'inverter direttamente dal regolatore	Interruttore #n	3	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
8	Interruttore GB1	Interruttore sezionatore: esclude dalla carica il gruppo batterie 1					
8.1			Corto Circuito	Sicurezza Regolatore GB1 scattata: il gruppo batterie 1 fuori linea	Sostituzione	4	
8.2			Circuito aperto	Esclusione dalla linea del gruppo batterie 1	Sostituzione	4	
8.3			Bloccato	Bloccato chiuso: esclusione dalla linea del gruppo batterie 1 Bloccato aperto: impossibile inserire la linea del gruppo batterie 1	Sostituzione	4	
9	Interruttore GB2	Interruttore sezionatore: esclude dalla carica il gruppo batterie 2					
9.1			Corto Circuito	Sicurezza Regolatore GB1 scattata: il gruppo batterie 2 fuori linea	Sostituzione	4	
9.2			Circuito aperto	Esclusione dalla linea del gruppo batterie 2	Sostituzione	4	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40

N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
9.3			Bloccato	Bloccato chiuso: esclusione dalla linea del gruppo batterie 2 Bloccato aperto: impossibile inserire la linea del gruppo batterie 2	Sostituzione	4	
10	Regolatore GB1	Si assicura che il flusso di corrente fluisca solo dall'array di pannelli solari al gruppo batterie GB1. Contiene un fusibile di sicurezza (rimovibile).					
10.1			Circuito aperto	Esclusione dalla linea di gruppo batterie GB1	Sostituzione regolatore	3	
10.2			Fusibile bruciato	Esclusione dalla linea di gruppo batterie GB1	Sostituzione fusibile	3	
10.3			Corto Circuito	Scatta la sicurezza (braker) dell'Interruttore GB1 Esclusione dalla linea di gruppo batterie GB1	Sostituzione	3	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
11	Regolatore GB2	Si assicura che il flusso di corrente fluisca solo dall'array di pannelli solari al gruppo batterie GB2. Contiene un fusibile di sicurezza (rimovibile).					
11.1			Circuito aperto	Esclusione dalla linea di gruppo batterie GB2	Sostituzione regolatore	3	
11.2			Fusibile bruciato	Esclusione dalla linea di gruppo batterie GB2	Sostituzione fusibile	3	
11.3			Corto Circuito	Scatta la sicurezza (braker) dell'Interruttore GB1 Esclusione dalla linea di gruppo batterie GB2	Sostituzione	3	
12	Inverter (MPPT)	Converte la corrente continua in ingresso proveniente dai pannelli solari o dalle batterie in una corrente alternata in uscita per alimentare le utenze					
12.1			Degradazione lieve delle prestazioni	Lieve degradazione della conversione di potenza	Revisione dell'apparato	5	Controllo periodico dell'apparato

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40

N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
12.2			Degradazione grave delle prestazioni	Insufficiente corrente in uscita.	Sostituzione dell'apparato	3	Controllo periodico dell'apparato
12.3			Guasto grave	Nessuna corrente in uscita	Sostituzione dell'apparato	3	Controllo periodico dell'apparato
12.4			Degradazione delle prestazioni del filtro di ripple	Alimentazione rumorosa	Revisione dell'apparato	5	Controllo periodico dell'apparato
13	Batteria Gruppo 1	Converte energia elettrica in potenziale chimico e viceversa					
13.1			Danneggiamenti o fisico	I contatti dei morsetti sono martellati sui terminali o i morsetti non sono serrati correttamente	Ispezione visiva periodica	4	
13.2			Solfatazione	Leggera patina grigio/bianca sulle piastre positive e come una lucidità non metallica sulle piastre negative.	Ispezione visiva periodica	4	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
13.3			Usura	Scarsa o ridotta capacità di mantenere la carica Autoscarica non trascurabile	Sostituzione periodica	4	
13.4			Scariche profonde (<i>deep cycle</i>)	Ridotta capacità di mantenere la carica	Settare il regolatore di carica in modo che non esaurisca completamente la carica	4	
13.5			Sovraccarico	Il regolatore non è impostato correttamente, oppure se il circuito di controllo della tensione guasto	Settare il regolatore di carica in modo che non sovraccarichi gli elementi	4	
13.6			Elemento guasto	Ridotta capacità di mantenere la carica	Sostituzione periodica	4	
14	Batteria Gruppo 2	Converte energia elettrica in potenziale chimico e viceversa					
14.1			Danneggiamenti o fisico	I contatti dei morsetti sono martellati sui terminali o i morsetti non sono serrati correttamente	Ispezione visiva periodica	4	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40

N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
14.2			Solfatazione	Leggera patina grigio/bianca sulle piastre positive e come una lucidità non metallica sulle piastre negative.	Ispezione visiva periodica	4	
14.3			Usura	Scarsa o ridotta capacità di mantenere la carica Autoscarica non trascurabile	Sostituzione periodica	4	
14.4			Scariche profonde (deep cycle)	Ridotta capacità di mantenere la carica	Settare il regolatore di carica in modo che non esaurisca completamente la carica	4	
14.5			Sovraccarico	Il regolatore non è impostato correttamente, oppure se il circuito di controllo della tensione guasto	Settare il regolatore di carica in modo che non sovraccarichi gli elementi	4	
14.6			Elemento guasto	Ridotta capacità di mantenere la carica	Sostituzione periodica	4	
15	Interruttore GBOU	Interruttore sezionatore: esclude dalla scarica entrambi i gruppi batterie					

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
15.1			Corto Circuito	Sicurezza Regolatore GBOU scattata: entrambi i gruppi batterie fuori linea	Sostituzione	4	
15.2			Circuito aperto	Esclusione dalla linea di entrambi i gruppi batterie	Sostituzione	4	
15.3			Bloccato	Bloccato chiuso: esclusione dalla linea di entrambi i gruppi batterie Bloccato aperto: impossibile inserire la linea di entrambi i gruppi batterie	Sostituzione	4	
16	Regolatore OUT	Si assicura che il flusso di corrente fluisca solo dai gruppi batterie GB1 e GB2 all'Inverter. Contiene un fusibile di sicurezza (rimovibile).					
16.1			Circuito aperto	Esclusione dalla linea dei gruppi batterie GB1 e GB2	Sostituzione regolatore	3	
16.2			Fusibile bruciato	Esclusione dalla linea dei gruppi batterie GB1 e GB2	Sostituzione fusibile	3	

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40

N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
17	Server	Assicura il controllo e la corretta gestione dei dati					
17.1		Mainboard					
17.2			Degradazione lieve delle prestazioni	Rilevazione di discontinuità casuali nel flusso dati.	Nessuno	5	Controllo periodico dell'apparato
17.3			Degradazione grave delle prestazioni	Rilevazione di discontinuità sistematiche nel flusso dati.	Nessuno	4	Controllo periodico dell'apparato
17.4			Guasto grave	Nessun dato.	Nessuno	3	Controllo periodico dell'apparato
17.5	Filtro Linea Elettrica	Filtra la rete ed elimina il <i>ripple</i>					
17.6			Degradazione delle prestazioni	Alimentazione rumorosa	Nessuno	3	Controllo periodico dell'apparato
17.7			Guasto grave	Smart Controller spento Nessuna informazione da entrambi i sensori	Nessuno	3	
17.8	Ethernet	Assicura il collegamento tra il Server e i Vari PC					

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
17.9			Degradazione delle prestazioni	Collegamento il Server e i Vari PC discontinuo Flusso dati discontinuo	Sostituire quando le prestazioni divengono marginali	3	
17.10			Guasto grave	Collegamento il Server e i Vari PC interrotto Flusso dati assente	Perdita della funzionalità	2	
18	Wi-Fi	Assicura il “cavo hertziano” tra vari sensori/trasduttori presenti su varie parti dell’impianto e il server (TBD)					
18.1			Degradazione lieve delle prestazioni	Rilevazione di discontinuità casuali nel flusso dati.	Sostituire quando le prestazioni divengono marginali	5	
18.2			Degradazione grave delle prestazioni	Rilevazione di discontinuità sistematiche nel flusso dati.	Sostituzione	4	
18.3			Guasto grave	Nessun dato.	Sostituzione	3	
19	Switch Interno / Esterno	Permette all’utenza di ricevere l’alimentazione o dal sistema fotovoltaico o dalla rete elettrica esterna (backup)					

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40

N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
19.1			Bloccato sul sistema fotovoltaico	Impossibilità di passare all'alimentazione di rete esterna	Sostituzione	3	Controllo periodico dell'apparato
19.2			Bloccato sulla linea di alimentazione esterna	Impossibilità di passare all'alimentazione del sistema fotovoltaico	Sostituzione	3	Controllo periodico dell'apparato
19.3			Circuito aperto	Utenze totalmente disalimentate	Sostituzione	3	Controllo periodico dell'apparato
20	PC Main	Assicura il controllo e la corretta gestione dei dati					
20.1		Mainboard					
20.2			Degradazione lieve delle prestazioni	Rilevazione di discontinuità casuali nel flusso dati.	Nessuno	5	Controllo periodico dell'apparato
20.3			Degradazione grave delle prestazioni	Rilevazione di discontinuità sistematiche nel flusso dati.	Nessuno	4	Controllo periodico dell'apparato
20.4			Guasto grave	Nessun dato.	Nessuno	3	Controllo periodico dell'apparato

Sistema: Impianto Fotovoltaico F40							
N°	Item / Sub-item	Descrizione e funzionamento	Modalità di Guasto	Sintomi Osservabili	Metodi di Prevenzione o Compensazione	Criticità	Raccomandazioni e commenti
20.5		Filtro Linea Elettrica					
20.6			Degradazione delle prestazioni	Alimentazione rumorosa	Nessuno	3	Controllo periodico dell'apparato
20.7			Guasto grave	Smart Controller spento Nessuna informazione da entrambi i sensori	Nessuno	3	

3 Conclusioni

È stata effettuata l'Analisi di Supporto Logistico (LSA) Analisi LSA preliminare dei componenti fondamentali del sistema fotovoltaico dello Smart Building F40.

3.1 Affidabilità

Si noti bene che nessuna parte del sistema è ridondata in senso stretto ovvero che nessun componente è stato espressamente pensato per essere posto in stand-by in attesa di poter entrare in linea sostituendo un suo omologo guasto (*cold redundancy* oppure *hot redundancy*), però, abbiamo posto per ipotesi reale che ogni linea di pannelli solari può sopportare la perdita di funzionalità di uno di essi, per cui, applicando la formula seguente:

$$R_{\text{pannelli foto1,2}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{10} \left(1 - e^{-\int_0^t \lambda_{\text{pannello foto}}(t) dt} \right)$$

Perveniamo al risultato che troviamo in tabella: formalmente poi è stato “diviso” per tutti i componenti che, invece, avrebbero un’affidabilità più bassa.

La stessa considerazione è stata fatta per la linea delle batterie

$$R_{\text{batterie1,2}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{14} \left(1 - e^{-\int_0^t \lambda_{\text{batteria}}(t) dt} \right)$$

Anche qui perveniamo al risultato che poi troviamo in tabella: formalmente poi è stato “diviso” per tutte le singole batterie che, invece, avrebbero un’affidabilità più bassa.

Quindi possiamo dire che il sistema in sé è abbastanza resiliente, poco “damage sensitive” (si veda il paragrafo “robustezza”): infatti può sopportare la perdita di elementi importanti come batterie o pannelli solari senza superare i limiti del sistema.

L’analisi del tasso di guasto del sistema complessivo ha restituito un MTBF_{TOT} del sistema pari a 7.497,38 ore il che equivale a circa 11,16 mesi di funzionamento.

3.2 Disponibilità

Nel nostro caso, non essendosi verificati disservizi reali, sono stati valutati solo i tempi di manutenzione; per stabilire l’eventuale disponibilità è stata posta come base dei tempi proprio l’MTBF precedente partendo dal principio per cui uno qualsiasi dei guasti determina il tempo di vita ponendoci, al contempo, nella condizione peggiore possibile per cui viene richiesta la manutenzione di ognuna delle parti.

E’ stata quindi stabilita una disponibilità A= 0.97388638 (corrispondente a circa 201 ore complessive nell’arco di tempo predetto ovvero il 97.38% del tempo complessivo).

3.3 FMECA

Il FMECA individua, in accordo con le due altre precedenti analisi, come principale componente critico il regolatore di carica del sistema. Il componente è, ovviamente una *single point failure*, ma anche una sua degradazione porta ad uno scadimento delle prestazioni di tutto il sistema in quanto richiederebbe ai gruppi batterie di essere gli unici fornitori di energia all’inverter senza possibilità di essere ricaricate. Il tempo di scarica, se opportunamente segnalato, potrebbe dare tempo alla squadra manutenzione di provvedere alla sua sostituzione minimizzando il tempo di *off-line* del sistema.

4 Riferimenti bibliografici

4.1 Documenti Applicabili

#	Numero Documento	Rev.	Titolo
AD01	S3000L-B6865-03000-00	1.1	International Procedure specification for Logistic Support Analysis
AD02	MIL-STD-1388	1A/4	Logistic Support Analysis
AD03	MIL-STD-1388	2B/1	DOD Requirements for a Logistic Support Analysis Record
AD04	MIL-HDBK-217	F2	Reliability Prediction of Electronic Equipment

4.2 Documenti Di Riferimento

#	Numero Documento	Rev.	Titolo
RD01	MIL-STD-1629	A	Procedures For Performing A Failure Mode, Effects, And Criticality Analysis
RD02	AD-A179 008	15/03/1985	Logistic Support Analysis Techniques Guide
RD03	Siemens White Paper	N/A	LSAR – The missing link for performance-based logistics
RD04	S3000L-B6865-03000-00	1.0	International Procedure specification for Logistic Support Analysis
RD05	ECSS-Q-30-02° ESA	1998	ESA: Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA)
RD06	JPL. PD-AD-130 NASA	13/02201	Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA)
RD07	BS 5760-5 British Standards Institute	1991	Reliability of Systems, Equipment and Components Part 5: Guide to Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA)

4.3 Bibliografia Essenziale

- [1] S. Aman, Y. Simmhan, V. K. Prasanna, University of Southern California, “Energy Management Systems: State of the Art and Emerging Trends”, rivista IEEE Communications Magazine – (s.l.) IEEE, January 2013 -1: vol 51, pp: 114-119
- [2] L.Liu, Y. liu, L. Wang, A.Zomaya, S.Hu, “Economical and Balanced Energy Usage in the Smart Home Infrastructure: A Tutorial and New Results”, IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (Volume:3, Issue: 4) pp: 556 – 570.
- [3] A framework for Cloud-based Smart Home, rivista Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2011 International Conference on (Volume:2) Date of Conference: 24-26 Dec. 2011,pp: 894 - 897
- [4] L. Gullo “The Revitalization of MIL-HDBK-217” - IEEE Reliability Society 2008 Annual Technology Report
- [5] R. Paggi, G. L. Mariotti, A. Paggi, A. Calogero, F. Leccese: “Prognostics via Physics-Based Probabilistic Simulation Approaches,” 2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), Florence, Italy, 22–23 June 2016, pp. 130-135.doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573199.
- [6] ESA Standard Document “New Reliability Prediction Methodology Aimed at Space Applications” Appendix 1 to AO/1-8811/16/NL/PS, 12 Sep 16

- [7] Wilde - "MIL-217, Bellcore/Telcordia & Other Reliability Prediction Methods for Electronic Products" [Online document] <http://wildeanalysis.co.uk/resource/mil-217-bellcoretelcordia-reliability-prediction-methods-electronic-products/>
- [8] Committee on National Statistics "Reliability Growth: Enhancing Defense System Reliability" ISBN 978-0-309-31474-9
- [9] W. Denson, "The History of Reliability Prediction," IEEE Trans. On Reliability, vol. 47, no. 3-SP, September 1998
- [10] B. Foucher, J. Boullie, B. Meslet and D. Das, "A Review of Reliability Prediction Methods for Electronic Devices, 2 Microelectron. Wearout., vol. 42, no. 8, August 2002, pp. 1155-1162.
- [11] F. Leccese, M. Cagnetti, A. Calogero, D. Trinca, S. Di Pasquale, S. Giarnetti, L. Cozzella, "A New Acquisition and Imaging System for Environmental Measurements: an Experience on the Italian Cultural Heritage," Sensors (Basel), 2014 May 23; 14(5):9290-312. doi: 10.3390/s140509290, IF: 2.245. <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/5/9290>.
- [12] Boubekri, N., 2001 "Technology Enablers For Supply Chain Management" Integrated Manufacturing Systems 12 , 394–399.
- [13] Reimann, Shawn; Amos, Jeremy; Bergquist, Erik; Cole, Jay; Phillips, Justin; Shuster, Simon, "UAV for Reliability, 19 December 2013
- [14] M. Caciotta, V. Cerqua, F. Leccese, S. Giarnetti, E. De Francesco, Ed. De Francesco, N. Scaldarella: "A First Study on Prognostic System for Electric Engines Based on Envelope Analysis," Proc. of Metrology for Aerospace, IEEE International Workshop on, Benevento, Italy, May 29-30, 2014. Pag. 362-366. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2014.6865950.
- [15] M. Pecht, D. Das and A. Ramarkrishnan, "The IEEE Standards on Reliability Program and Reliability Prediction Methods for Electronic Equipment," Microelectron. Wearout., vol. 42, 2002, pp. 1259-1266.
- [16] H. Wang, M. Liserre et al. – "Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics" - IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics, Vol. 2, No. 1, March 2014
- [17] IEEE Standard Framework for the Reliability Prediction of Hardware, IEEE Standard 1413, 2009.
- [18] R. De Francesco, E. De Francesco, F. Leccese, A. Paggi: "The ASD S3000L for the Enhancement of "in Field" Avionic Measurements," Proc. of Metrology for Aerospace, IEEE International Workshop on, Benevento, Italy, May 29-30, 2014. Pag. 174-179. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2014.6865915.
- [19] X. Perpinya, "Reliability and Safety in Railway" Rijeka, Croatia: InTech, 2012, ch. 7.
- [20] Ed. De Francesco, E. De Francesco, R. De Francesco, F. Leccese, M. Cagnetti: "A Proposal to update LSA Databases for an Operational Availability based on Autonomic Logistic," Proc. of Metrology for Aerospace, 2nd IEEE International Workshop on, Benevento, Italy, June 3-5, 2015. Pag. 38-43. ISBN: 978-1-4799-7568-6, DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2015.7180623.
- [21] M. G. Pecht and F. R. Nash, "Predicting the reliability of electronic equipment," Proc. IEEE, vol. 82, no. 7, pp. 992–1004, Jul. 1994
- [22] Physics of Failure Reliability Predictions, VMEbus International Trade Association, Standard ANSI/VITA 51.2, 2011.
- [23] R. Paggi, G.L. Mariotti, A. Paggi, F. Leccese: "Optimization of Availability Operation via simulated Prognostics," Proc. of Metrology for Aerospace, 2nd IEEE International Workshop on, Benevento, Italy, June 4-5, 2015. Pag. 44-48. ISBN: 978-1-4799-7568-6, DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2015.7180624..
- [24] Richard H. Kolbe Melissa S. Burnett "Content-Analysis Research: An Examination Of Applications With Directives For Improving Research Reliability And Objectivity" J Consum Res (1991) 18 (2): 243-250. DOI: <https://doi.org/10.1086/209256>
- [25] F. Leccese, M. Cagnetti, A. Calogero, D. Trinca, S. Di Pasquale, S. Giarnetti, L. Cozzella, "A New Acquisition and Imaging System for Environmental Measurements: an Experience on the Italian Cultural Heritage," Sensors (Basel), 2014 May 23; 14(5):9290-312. doi: 10.3390/s140509290, IF: 2.245. <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/5/9290>.
- [26] H. Wang, K. Ma, and F. Blaabjerg, "Design for reliability of power electronic systems," in Proc. 38th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Oct. 2012, pp. 33–44.

- [27] M. Krasich, “How to estimate and use MTTF/MTBF would the real MTBF please stand up?” in Proc. IEEE Annu. RAMS, Jan. 2009, pp. 353–359.
- [28] A. Gunasekaran, E.W.T. Ngai - “Information systems in supply chain integration and management”
- [29] Y. Song and B. Wang, “Survey on reliability of power electronic systems,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 1, pp. 591–604, Jan. 2013
- [30] M. Caciotta, V. Cerqua, F. Leccese, S. Giarnetti, E. De Francesco, N. Scaldarella: “A First Study on Prognostic System for Electric Engines Based on Envelope Analysis,” Proc. of Metrology for Aerospace, IEEE International Workshop on, Benevento, Italy, May 29-30, 2014. Pag. 362-366. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2014.6865950.
- [31] www.rse-web.it. D. Moneta, G. Mauri, L. Ferrarini, S. Radaelli “Analisi e progettazione di un sistema integrato di gestione dell’energia per applicazioni domotiche”.
- [32] IEC 62746-2 TR : Systems interface between customer energy management system and the power management system –Part 2: Use cases and requirements
- [33] www.energy-home.it- Energy@home Use Cases-v3.
- [34] www.gse.it – Rapporto statistico – Energia da fonti rinnovabili – Anno 2014;
Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25/10/2012 sull’efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.

4.4 *Abbreviazioni ed acronimi*

AD	Applicable Document
AOR	Annual Operating Rate
BE	Breakdown Element
BEI	Breakdown Element Identifier
BER	Breakdown Element Revision
BIT	Built in Test
BITE	Built in Test Equipment
CDR	Critical Design Review
CMS	Central Management Software
COTS	Commercial Off The Shelf
CRD	Customer Requirements Document
DEL	Data Element List
DLM	Depot Level Maintenance
DR	Demand Response
DSM	Demand side Management
DSO	Distribution System Operator
EB	Energy Box
EE	Efficienza Energetica
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
FC	Failure Cause
Fit	Failure in time
FFF	Fit Form and Function
FMA	Failure Mode Analysis
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis
FMR	Failure Mode Ratio
FTA	Fault Tree Analysis
GVI	General Visual Inspection
HMI	Human-Machine Interface
ID	Internal Document
I/F	Interface
ILS	Integrated Logistic Support
ISO	International Standards Organization
IT	Information Technology
IUA	Item Under Analysis
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
LORA	Level of Repair Analysis
LRU	Line Replaceable Unit
LSA	Logistic Support Analysis
MAC	Medium Access Control
MC	Maintenance Concept
MDT	Maintenance Down Time
MET	Mean Elapsed Time
MIL-STD	Military Standard (US DoD)
ML	Maintenance Level
MRO	Maintenance, Repair & Overhaul
MTA	Maintenance Task Analysis
MTBF	Mean Time Between Failures
MTBM	Mean Time Between Maintenance

MTTR	Mean Time to Repair
N/A	Not Applicable
o/c	Open Circuit
PBS	Product Breakdown Structure
PCB	Printed Circuit Board
PDR	Preliminary Design Review
PDM	Product Data Management
PELL	Progetto Public Energy Living Lab
PHST	Packaging, Handling, Storage and Transportation
PLC	Power Line Communication
P/N	
PN	Part Number
PNR	
RD	Reference Document
s/c	Short Circuit
SHN	Smart Homes Network
SI	Structural Item
SMA	Scheduled Maintenance Analysis
SOW	Statement of Work
SW	Software
TBC	To Be Confirmed
TBD	To Be Defined
TBI	To Be Issued
TLM	Telemetry
TSO	Trasmission System Operator – Gestore della rete
TWT	Travelling Wave Tube
WAN	Wide Area Network
WBS	Work Breakdown Structure

Appendice: Laboratorio di Misure Elettriche ed Elettroniche dell'Università degli Studi "Roma Tre": Curriculum Scientifico

Responsabile: Dott. Ing. Ph.D. RTI Fabio Leccese

Collaboratori: Dott. Enrico Petritoli (Assegnista di Ricerca), Dott.sa Mariagrazia Leccisi (Borsista)

Il laboratorio fa parte del Gruppo Nazionale delle Misure Elettriche ed Elettroniche (GMEE) i cui scopi principali sono lo studio delle misure o "metrologia", l'analisi di qualità fisiche e la realizzazione di campioni di misura con particolare attenzione allo studio dell'incertezza di misura.

In questo quadro generale, il nostro laboratorio segue da anni diverse linee di ricerca tra le quali la qualità dell'energia (power quality – dal 2004), l'analisi informativa dei segnali (dal 2002), i controlli di apparati locali e remoti ed in particolare di sistemi di risparmio energetico applicati ad illuminazione e riscaldamento (dal 2008), la sensoristica distribuita incluse le Wireless Sensor Network (dal 2008) e le analisi affidabilistiche di sistemi complessi (dal 2013) trovano ampia utilità e complementarità con le attività svolte in ENEA dal gruppo del Dott. Stefano Pizzuti.

Ciascuna linea presenta peculiarità proprie che coinvolgono non solo il campo specifico delle misure, ma anche settori ad esso correlati quali l'elettronica, l'elettrotecnica, le telecomunicazioni, l'informatica e l'automazione. Il Laboratorio progetta e sviluppa sistemi di misura avvalendosi dei software più moderni come Orcad o Protel e programmando microcontrollori di varie famiglie come Microchip o Siemens, processori ARM, avendo confidenza anche con la progettazione di FPGA. I linguaggi di programmazione più usati sono il C, la piattaforma .NET e vari linguaggi "WEB oriented".

Il nostro team, avvalendosi anche di professionalità esterne, spazia anche in altri settori come la progettazione e realizzazione di impianti di energie alternative, l'illuminotecnica, la realizzazione e gestione di database, la progettazione e realizzazione di droni per attività subacquee e terrestri.

Nel campo della Didattica abbiamo nel tempo sviluppato dei percorsi all'interno dei nostri Dipartimenti rivolti al mondo dell'ambiente e dell'energia con materie come Qualità Ambientale, Qualità dell'Energia, Elementi di Misure per l'Analisi Ambientale, Alimentazione da Fonti Rinnovabili e Strumentazione Avanzata di Misura che, nel tempo, si sono state apprezzate da un numero crescente di studenti.

Il nostro lavoro ha permesso la creazione di link importanti come quelli con gruppi di ricerca dell'ENEA, con l'Istituto di Microsistemi e Microelettronica del CNR di Roma e con il Dipartimento di Mineralogia de La Sapienza.

A testimonianza dell'esperienza maturata, si riporta una breve selezione delle pubblicazioni più recenti (dal 2012) fatte dal Laboratorio e riguardanti i temi di ricerca citati, evidenziando in giallo i lavori sviluppati insieme ad ENEA. Più a valle, l'elenco dei premi vinti e l'elenco dei progetti fatti:

1) F. Leccese: "Remote-Control System of High Efficiency and Intelligent Street Lighting Using a ZigBee Network of Devices and Sensors," Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 28, Issue: 1, 2013, Page(s): 21 – 28, DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2212215, ISSN: 0885-8977, IF: 1.353.

2) M. Caciotta, F. Leccese, S. Giarnetti, S. Di Pasquale: "Geographical monitoring of Electrical Energy Quality determination: the problems of the sensors," Journal of Communication and Computer, Vol. 10, No. 12, 31 December 2013, pp. 1566-1572, David Publishing Company, ISSN 1930-1553. DOI: 10.17265/1934-8975. http://www.davidpublishing.org/journals_info.asp?jld=1919.

3) F. Marino, A. Capozzoli, M. Grossoni, F. Lauro, F. Leccese, F. Moretti, S. Pizzuti, S. Panzieri: "Indoor Lighting Fault Detection and Diagnosis Using a Data Fusion Approach," Proc. of "Energy Quest 2014," Vol.1, pp. 83-

94, 23 -25 April, Ekaterinburg, Russia, WIT Press, ISBN: 978-1-84564-938-8, DOI: 10.2495/EQ140101. eid=2-s2.0-84897835365.

4) F. Leccese, M. Cagnetti, A. Calogero, D. Trinca, S. Di Pasquale, S. Giarnetti, L. Cozzella: "A New Acquisition and Imaging System for Environmental Measurements: an Experience on the Italian Cultural Heritage," Sensors (Basel) Special Issue on "Sensors for Cultural Heritage Diagnostics," 2014 May 23; 14(5):9290-312. doi: 10.3390/s140509290, IF: 2.245. <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/5/9290>. WOS:000337112200088, eid=2-s2.0-84901350456.

5) M. Caciotta, S. Di Pasquale, S. Giarnetti, F. Leccese, D. Trinca: "A New Multi-Platform Data Acquisition System for Power Quality Metrological Certification," Journal of Energy and Power Engineering ISSN 1934-8975, USA, Vol. 8, No. 7, July 2014, David Publishing Company. <http://www.davidpublishing.org/show.html?17255>

6) F. Leccese, M. Cagnetti, D. Trinca: "A Smart City Application: A Fully Controlled Street Lighting System Isle Based on Raspberry-Pi Card, a ZigBee Sensor Network and WiMAX" Sensors - Special Issue on "Sensors and Smart Cities," 2014, 14(12), 24408-24424; DOI: 10.3390/s141224408, IF: 2.245. <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/12/24408>. WOS:000346794300111, eid=2-s2.0-84919372229.

7) S. Giarnetti, F. Leccese, M. Caciotta: "Non Recursive Multiharmonic Least-Square Fitting for Frequency Estimation for Grid Frequency Estimation," Measurement, Volume 66, 2015, Pages 229–237, ISSN 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.02.021; DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.021> IF: 1.484. WOS:000350825500026, eid=2-s2.0-84924058427.

8) Ed. De Francesco, Ett. De Francesco, R. De Francesco, F. Leccese, M. Cagnetti: "A Proposal to update LSA Databases for an Operational Availability based on Autonomic Logistic," Proc. of Metrology for Aerospace, 2nd IEEE International Workshop on, Benevento, Italy, June 3-5, 2015. Pag. 38-43. ISBN: 978-1-4799-7568-6, DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2015.7180623. WOS:000380405000008, eid=2-s2.0-84941351478.

9) M. Camponeschi, A. Fonti, F. Leccese, G. Comodi, M. Grossoni, S. Pizzuti: "Winter Thermal Multi-Objective Optimization: a Simulation Case Study," International Journal of Engineering, Science and Innovative Technology-IJESIT, Volume 4, Issue 4, Pages 1-7, July 2015, ISSN: 2319-5967.

10) M. Peroni, F. Dolce, J. Kingston, C. Palla, A. Fanfani, F. Leccese: "Reliability study for LEO satellites to assist the selection of End Of Life disposal methods," 2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), Florence, Italy, 22–23 June 2016, pp. 141-145. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573201. eid=2-s2.0-84991833420. WOS:000389769800026.

11) R. Paggi, G. L. Mariotti, A. Paggi, A. Calogero, F. Leccese: "Prognostics via Physics-Based Probabilistic Simulation Approaches," 2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), Florence, Italy, 22–23 June 2016, pp. 130-135. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573199. eid=2-s2.0-84991785890. WOS:000389769800024.

12) E. Petritoli, F. Leccese: "Reliability and SEE Mitigation in Memories for Space Applications," 2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), Florence, Italy, 22–23 June 2016, pp. 136-140. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573200. eid=2-s2.0-84991740144. WOS:000389769800025.

13) V. Pasquali, R. Gualtieri, G. D'Alessandro, M. Granberg, D. Hazlerigg, M. Cagnetti, F. Leccese: "Monitoring and Analyzing of Circadian and Ultradian Locomotor Activity Based on Raspberry-Pi," Electronics 2016, 5(3), 58. EISSN 2079-9292. doi:10.3390/electronics5030058. WOS:000385490400007, eid=2-s2.0-84990062647.

14) F. Leccese, M. Cagnetti, S. Di Pasquale, S. Giarnetti, M. Caciotta: "A new Power Quality Instrument based on Raspberry-Pi," Electronics 2016, 5(4), 64. EISSN 2079-9292. doi: 10.3390/electronics5040064. eid=2-s2.0-84990050993.

15) S. Giarnetti, F. Leccese, M. Caciotta: "Non recursive Nonlinear Least Squares for periodic signal fitting," Measurement, Volume 103, 2017, Pages 208–216, ISSN 0263-2241.; DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.023>. eid=2-s2.0-85014142799.

- 16) F. Marino, F. Leccese, S. Pizzuti: "Adaptive Street Lighting Predictive Control," *Energy Procedia*, Volume 111, Pages 790-799, March 2017, ISSN: 1876-6102; DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.241. eid=2-s2.0-85017266946.
- 17) F. Leccese, M. Cagnetti, S. Sciuto, A. Scorza, K. Torokhtii, E. Silva: "Analysis, design, realization and test of a sensor network for aerospace applications" (2017) I2MTC 2017 - 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings, art. no. 7969946, . DOI: 10.1109/I2MTC.2017.7969946. eid=2-s2.0-85026811790. WOS:000431839600256.
- 18) V. Pasquali, G. D'Alessandro, R. Gualtieri, F. Leccese: "A new data logger based on Raspberry-Pi for Arctic Notostraca locomotion investigations" (2017) *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 110, pp. 249-256. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.07.004. eid=2-s2.0-85022218699.
- 19) F. Leccese, M. Cagnetti, S. Tuti, P. Gabriele, E. De Francesco, R. Đurović-Pejčev, A. Pecora: "Modified LEACH for Necropolis Scenario" IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Lecce, Italy, October 23-25, 2017. ISBN: 978-92-990084-0-9. eid=2-s2.0-85048990580.
- 20) E. Petritoli, F. Leccese, M. Botticelli, S. Pizzuti, F. Pieroni: "'Smart Street' Pilot Site: A RAMS Analysis for a Scale-Up configuration" (2018) 2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2018 - Proceedings, art. no. 8428338, pp. 129-133. DOI: 10.1109/METROI4.2018.8428338. eid=2-s2.0-85052530185.
- 21) E. Petritoli, F. Leccese, L. Ciani: "Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles," *Sensors* 2018, 18(9), 3171; <https://doi.org/10.3390/s18093171>. eid=2-s2.0-85053913129.
- 22) E. Petritoli, F. Leccese, S. Pizzuti, F. Pieroni: "Smart Lighting as basic building block of Smart City: an energy performance comparative case study," (2019) *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. *Measurement*, Volume 136, Pages 466-477, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.095>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118312405>. eid=2-s2.0-85059534529.
- 23) E. Petritoli, F. Leccese, M. Botticelli, S. Pizzuti, F. Pieroni: "A RAMS analysis for a precision scale-up configuration of "Smart Street" pilot site: an Industry 4.0 Case Study," (2019) *Acta IMEKO*, 8 (2), pp. 3-11. DOI: 10.21014/acta_imeko.v8i2.614. eid=2-s2.0-85070330371.
- 24) E. De Francesco, R. De Francesco, F. Leccese: "Use of the S3000L for the Optimization of Projects in order to Reduce the Risk of Obsolescence of Complex Systems," 2019 6th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), June 19-21, 2019, Turin, Italy, pp. 233-237. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869586. eid=2-s2.0-85074409926.
- 25) F. Leccese, M. Leccisi, M. Cagnetti: "Cluster Layout for an Optical Wireless Sensor Network for Aerospace Applications," 2019 6th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), June 19-21, 2019, Turin, Italy, pp. 556-561. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869643. eid=2-s2.0-85074421424.

Si segnalano i premi nazionali/internazionali vinti dal Laboratorio

- 1) 2016 – PUBLONS - The sentinels of Science Awards 2016 The top 10 percent of reviewers- Certified Sentinel of Science award recipient: As one of the top 10 per cent of researchers contributing to the peer review of the field of Chemistry
- 2) 2018 – Il Forum Nazionale Delle Misure – Sezione GMEE – Padova, 17-19 Settembre 2018: Miglior Poster per l'articolo: "Measurements of Q factor in microwave resonators: relevance of the calibration" a cura di K. Torokhtii, A. Alimenti, N. Pompeo, F. Leccese, F. Orsini, A. Scorza, S.A. Sciuto, E. Silva.
- 3) 2018 – IEEE International Workshop on Metrology for the Sea, October 08-10, Bari, Italy: Miglior Demo per il drone di nuova concezione con movimentazione a pendolo vincolato a cura di Eduardo De Francesco e Fabio Leccese.
- 4) 2019 - WEB OF SCIENCE – PUBLONS -TOP PEER REVIEWER 2019 -For placing in the top 1% of reviewers in Cross-Field on Publons global reviewer database.

Elenco di partecipazioni a progetti scientifici

Progetti Internazionali:

- 1) "PROGETTO DI GRANDE RILEVANZA ITALIA - SERBIA 2016-2018 sul tema di Agriculture and Food Technologies dal titolo **SMART MONITORING OF PESTICIDES IN FARMING AREAS**" Finanziato dal Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale. **Ruolo: Responsabile Scientifico.** Durata 3 anni.

Progetti Nazionali:

- 2) Bando PROGRAMMI DI RICERCA SCIENTIFICA DI RILEVANTE INTERESSE NAZIONALE RICHIESTA DI COFINANZIAMENTO **PRIN 2010-2011** dal titolo: **"Interazione fra minerali e biosfera: conseguenze per l'ambiente e la salute umana"**- sottosezione **"Emissioni antropogeniche di CO₂: immobilizzazione per carbonatazione e discriminazione isotopica della componente fossile e non fossile"**. PRIN 2010-2011, Area 04, Durata 36 mesi, Protocollo 2010 MKHT9B_007
- 3) Progetto **Co-Research POR FESR LAZIO 2007-2013 – Titolo SIMPLFEX** Progetti di R&S in collaborazione presentati dalle PMI del Lazio con Numero di protocollo assegnato: FILAS-CR-2011-1076 dal 09/01/2012 al 08/01/2014. **Ruolo: Responsabile Scientifico di Sede.** Durata 2 anni.
- 4) Progetto di ricerca: **"Sviluppo e implementazione di algoritmi per applicazioni di Smart Lighting"** per conto di ENEA – Roma, 2014. **Ruolo: Responsabile Scientifico.** Durata 1 anno.
- 5) Progetto di ricerca: **"Sviluppo e implementazione di indicatori di prestazione e diagnostica energetica per impianti di illuminazione pubblica"** per conto di ENEA – Roma, 2014. **Ruolo: Responsabile Scientifico.** Durata 5 mesi.

Nell'ambito del Piano Triennale della Ricerca Sistema Elettrico 2015-2017 finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) e gestito da ENEA all'interno dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA 2015-2017, attività di:

- 6) **Progettazione e sviluppo prototipale di strumenti per la gestione del PELL**, per conto di ENEA – Roma, 2015. **Ruolo: Responsabile Scientifico di Sede.**
- 7) **Analisi di affidabilità e analisi dei guasti e delle criticità (FMECA) del sistema smart street**, per conto di ENEA – Roma, 2016. **Ruolo: Responsabile Scientifico di Sede.**
- 8) **Studio affidabilistico dei componenti di una linea di illuminazione "smart" stradale pubblica operativa in contesto urbano: vantaggi e criticità**, per conto di ENEA – Roma, 2017. **Ruolo: Responsabile Scientifico di Sede.**
- 9) **Studio affidabilistico preliminare dei componenti fondamentali del sistema di termoregolazione dell'edificio F-40 ENEA (Casaccia): vantaggi e criticità**, per conto di ENEA – Roma, 2018. **Ruolo di Responsabile Scientifico di Sede.**

Progetti Conto Terzi:

- 10) Progetto di ricerca: **"Studio delle criticità delle PowerLine su Navi da guerra"** per conto della Se.Te.L. group di Roma, 2012. **Ruolo: Responsabile Scientifico.** Durata 1 mese.
- 11) Progetto di ricerca: **"Valutazione del Processo di Rivitalizzazione degli Accumulatori al Piombo-Acido e del Relativo Liquido Additivo"** per conto della Battery Equalizer Italia s.r.l. di Fiumicino, 2012, **Ruolo: Responsabile Scientifico.** Durata 3 mesi.
- 12) Progetto di ricerca: **"Evoluzioni del supporto logistico delle power line di unità navali"** per conto della Se.Te.L. group di Roma, 2013. **Ruolo: Responsabile Scientifico.** Durata 1 mese.