



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi affidabilistica e markoviana a livello di sottosistema applicata al progetto di una Smart Road Sperimentale

Fabio Leccese, Enrico Petritoli

ANALISI AFFIDABILISTICA E MARKOVIANA A LIVELLO DI SOTTOSISTEMA APPLICATA AL PROGETTO DI UNA SMART ROAD SPERIMENTALE

Fabio Leccese, Enrico Petritoli (Università degli Studi "Roma Tre")

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Local Energy District

Linea di attività: 1.45 - Consolidamento del PELL in relazione agli edifici pubblici e analisi dei dati della Smart Road

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: Dott. Francesco Pieroni.

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

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 STATO DEL PROGETTO	6
1.1.1 Generalità	6
1.2 PRIMO ANNO (2019-2020)	6
1.2.1 Attività smart building	6
1.3 SECONDO ANNO (2020-2021)	7
1.3.1 Attività Smart Road (I)	7
1.4 TERZO ANNO (ATTUALE)	7
1.4.1 Attività Smart Road (II)	7
1.4.2 Introduzione.....	8
1.4.3 Attività operativa.....	8
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	9
2.1 DESCRIZIONE DEL PROGETTO “SMART ROAD”	9
2.1.1 Opere civili principali del progetto	10
2.1.2 L'alimentazione dell'Impianto di Illuminazione	10
2.1.3 Impianto di illuminazione a LED.....	11
2.1.4 La sensoristica.....	11
2.1.5 Cablaggi	11
2.2 AFFIDABILITÀ DEI SISTEMI COMPLESSI.....	12
2.2.1 Cos'è l'Affidabilità	12
2.2.2 Scopo.....	12
2.2.3 Sollecitazioni e vita del Componente	13
2.2.4 Definizioni	13
2.2.5 Tipologie di Guasti	14
2.2.6 Metodologie e manuali di riferimento	14
2.2.7 Il manuale di riferimento: il MIL-HDBK-217F/2.....	15
2.2.8 Part Count Analysis	15
2.2.9 Parts Stress Analysis.....	16
2.2.10 I sistemi complessi dal punto di vista affidabilistico	17
2.2.11 Affidabilità del sistema in serie.....	18
2.2.12 Affidabilità dei sistemi in Parallelo (A Funzionamento Permanente)	19
2.2.13 Sistemi Parallelo a Funzionamento Sequenziale.....	21
2.2.14 Tabelle	24
2.2.15 Grafico riassuntivo.....	71
2.3 ANALISI MARKOVIANA.....	72
2.3.1 La matrice di transizione e il suo vettore di stato stazionario.....	73
2.3.2 Strategia di costruzione di un albero markoviano	74
2.3.3 Caso E01 – Illuminazione insufficiente	75
2.3.4 Caso E02 – impossibilità di gestire il flusso dati	76
2.3.5 Caso E03 – Dati “enviromentali” insufficienti	77
2.3.6 Caso E04 – Copertura video insufficiente.....	78
2.3.7 Caso E05 – mancanza di alimentazione	79
2.3.8 Tabella riassuntiva	80
3 PROVE DI LABORATORIO E RITORNI DAL CAMPO.....	81
3.1 RITORNI DAL CAMPO.....	81

3.1.1	<i>Illuminazione</i>	81
3.1.2	<i>Sistema telecamera TAI-FAI conteggio flusso veicoli</i>	82
3.1.3	<i>Sezione fotografica</i>	86
3.2	PROVE DI LABORATORIO.....	89
3.2.1	<i>Visual inspection dei componenti</i>	97
4	CONCLUSIONI.....	101
4.1	AFFIDABILITÀ.....	101
4.2	ANALISI MARKOVIANA.....	103
4.3	PROVE DI LABORATORIO E RITORNI DAL CAMPO.....	103
5	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	104
5.1	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	104
5.2	BIBLIOGRAFIA.....	104
6	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	106
	APPENDICE: LABORATORIO DI MISURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI "ROMA TRE": CURRICULUM SCIENTIFICO.....	108

Sommario

L'attività denominata Smart Road è incentrata sulla progettazione e realizzazione di una "strada intelligente" che ha lo scopo di "integrare" i veicoli elettrici a guida autonoma col sistema stradale di illuminazione pubblica. In questa architettura stradale, il veicolo elettrico è concepito come il nodo di una rete più vasta con la quale scambia informazioni sullo stato del suo "environment" (stato della strada, densità del traffico, possibili incidenti o interruzioni, meteo ecc.) oppure sullo stato stesso del veicolo.

Su questo tema, il Laboratorio di Misure Elettriche ed Elettroniche del Dipartimento di Scienze dell'Università degli Studi "Roma Tre" è stato coinvolto nel biennio 2020-2021 con una attività rivolta a produrre un'analisi di affidabilità, disponibilità, manutenibilità e sicurezza (RAMS) che accompagnasse ed integrasse quella progettuale, di competenza ENEA, per la realizzazione, presso il Centro di Ricerca ENEA-Casaccia, di una smart road prototipale. L'impostazione di questo approccio è risultata totalmente innovativa, a nostra conoscenza, rispetto a quanto rintracciabile in letteratura.

Partendo dal progetto della Smart Road, se il 2020 è stato rivolto a produrre una analisi teorica, nel 2021, pur con le limitazioni imposte dalla pandemia, la nostra attività è stata coinvolta da aspetti e considerazioni pratico-realizzative che hanno permesso di approfondire e perfezionare la nostra analisi permettendoci anche di calarla su quanto effettivamente realizzato nel sedime ENEA-Casaccia.

1 Introduzione

1.1 Stato del progetto

1.1.1 Generalità

La collaborazione tra il Laboratorio di Misure Elettriche ed Elettroniche del Dipartimento di Scienze dell'Università degli Studi "Roma Tre" e l'ENEA risale al 2014 dove fummo originariamente coinvolti su tematiche concernenti l'analisi della Qualità dell'Energia Elettrica (Power Quality). Negli anni successivi, la collaborazione è evoluta vedendoci coinvolti su ricerche di grande interesse a supporto delle quali abbiamo fornito e forniamo la nostra competenza tecnico-scientifica. Dal 2019 siamo coinvolti nell'Accordo di Programma tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA - Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – nel quale il Laboratorio è un Co-beneficiario. Il lavoro triennale partito nel 2019 è stato imperniato su tre filoni principali di ricerca di base e applicata (tecnologica) ovvero:

- a) Attività smart building ovvero applicazioni di analisi affidabilistica e qualitativa (primo anno)
- b) Attività smart road (I): analisi di affidabilità di un impianto prototipale realizzato in Casaccia (secondo anno)
- c) Attività smart road (II): collaudo e validazione dei dati (terzo anno)

In particolare nel 2020 abbiamo sviluppato una analisi teorica che ha prodotto uno studio RAMS che ha accompagnato ed integrato l'analisi progettuale di competenza ENEA. Nel 2021 abbiamo affinato l'attività già ben impostata nel 2020 perfezionandola ulteriormente. I dati recuperati successivamente alla realizzazione della smart road ci hanno permesso poi di calare l'analisi teorica sul nostro impianto dando concretezza metrologica a quanto teoricamente impostato.

1.2 Prima annualità

1.2.1 Attività smart building

Il progetto è stato finalizzato all'individuazione di tecniche mirate ad un utilizzo razionale dell'energia elettrica che sono divenute, al giorno d'oggi, più importanti della produzione dell'energia stessa.

Oggetto della ricerca è stato l'edificio sperimentale F40 posto nel Centro di Ricerca ENEA della Casaccia, 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 stato 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 poter disporre di architetture ed esperienze da inserire nell'ambito di progettazione ex novo di edifici.

L'analisi ha riguardato 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 complessi di primo livello delle Smart Building 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 è stata di due sottotipi, il primo prettamente affidabilistico, il secondo di tipo logico/funzionale.

La prima, detta "analisi di affidabilità", è stata mirata sia a stabilire la figura di affidabilità del sistema (ovvero l'intervallo tra due guasti) sia ad individuare quale siano i componenti o sottosistemi più proni 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) con la quale 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 state applicate a sistemi complessi come questi e hanno dato risultati interessanti.

L'output delle due diverse metodologie si è concretizzato in una analisi affidabilistica in cui è stata 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 per aiutare la modulazione dei pezzi di ricambio. L'analisi FMECA, ha inoltre evidenziato le criticità architetture (single point failures) e ha suggerito metodi di mitigazione del rischio di malfunzionamento.

1.3 Seconda annualità

1.3.1 Attività Smart Road (I)

L'attività denominata *smart road (I)* è stata imperniata sull'integrazione di diversi sensori col sistema stradale di illuminazione pubblica. Nella nostra architettura stradale, il singolo trasduttore è concepito come un nodo di una rete più vasta con la quale scambia informazioni sullo stato del suo environment (stato della strada, densità del traffico, possibili incidenti o interruzioni, meteo ecc.) oppure sullo stato stesso del sensore. In funzione dello stato delle sue riserve energetiche (per es. stato di carica delle batterie) è possibile predisporre le energie ed ottimizzare gli slot fisici di ricarica. Il veicolo quindi è visto come si è detto come un nodo mobile: in questo caso la smart grid complessiva non sarà più un oggetto statico ma un "tappeto" dinamico che potrà assumere una configurazione variabile.

Durante il secondo anno quindi ha predominato l'attività di analisi di dettaglio nella quale abbiamo affiancato l'attività progettuale di competenza ENEA di una smart road prototipale con uno studio RAMS i cui output sono stati l'analisi affidabilistica e l'analisi FMECA (entrambe a livello di sistema e sottosistema).

L'attività è risultata completamente innovativa in quanto, sebbene nella letteratura si parli di smart road, la realizzazione ancora pionieristica di queste strade non è mai stata accompagnata da uno studio di affidabilità. I suoi output sono stati la valutazione della disponibilità operativa dell'impianto e l'individuazione dei sistemi o componenti più critici per valutarne la loro eventuale ridondanza.

Inoltre la valutazione della sensibilità e della sensitività del sistema è stata oggetto della nostra indagine.

1.4 Terza annualità

1.4.1 Attività Smart Road (II)

L'attività del terzo anno si può articolare su tre punti principali:

- a) Perfezionamento del modello teorico impostato l'anno passato

- b) Recupero di informazioni attraverso sperimentazione e ritorni dal campo ottenuti anche in laboratorio
- c) Validazione del modello e dei dati teorici con raffinazione del metodo di calcolo calandolo nel caso di studio realizzato

1.4.2 Introduzione

Il nostro studio è stato condotto sulla base del progetto di realizzazione fornitoci da ENEA e gli output della nostra indagine sono stati sia l'analisi affidabilistica che l'analisi markoviana svolte entrambe a livello di sottosistema e di componente.

I dati raffinati provengono dall'analisi in laboratorio tramite prove di vita utile accelerate nel laboratorio di Misure Elettriche ed Elettroniche del Dipartimento di Scienze dell'Università degli Studi "Roma Tre": questo ci ha permesso di fare una serie di test e misurazioni sui vari componenti del sistema e che hanno poi fornito i cosiddetti "ritorni dal campo" ovvero i dati reali che hanno portato alla correzione dei dati teorici.

1.4.3 Attività operativa

Per implementare lo studio abbiamo applicato le discipline della Qualità e, in particolare, l'analisi di affidabilità al sistema di alimentazione della *Smart road* esaminato dal punto di vista della problematica logistica della quantizzazione numerica dell'affidabilità (e dei relativi margini di tolleranza) che hanno impattato sulla disponibilità del sistema.

L'analisi applicata al sistema è stata di due sottotipi, il primo prettamente affidabilistico, il secondo di tipo markoviana.

La prima, detta "analisi di affidabilità", mira sia a stabilire la figura di affidabilità del sistema (ovvero l'intervallo tra due guasti) sia ad individuare quale siano i componenti o i sottosistemi più prone al guasto.

La seconda è l'analisi di tipo markoviano con la quale siamo riusciti invece a stabilire, tramite successioni logiche di funzionamento, l'effetto di eventuali guasti correlati al livello di componente o di sottosistema al fine di mitigarne la gravità.

Il primo output delle due diverse metodologie si è concretizzato in una analisi affidabilistica in cui è stata misurata l'occorrenza di guasto delle singole parti (valutandone opportunamente l'incertezza), dei sistemi e dei sottosistemi, al fine di evidenziare gli elementi dalla vita utile più breve per aiutare la modulazione dei pezzi di ricambio. Il secondo output, l'analisi markoviana, ha evidenziato le criticità architettoniche (*single point failures*) e ha suggerito metodi di mitigazione del rischio di malfunzionamento. Rispetto però all'analisi FMECA, l'analisi markoviana ci ha consentito di valutare i guasti composti del sistema.

In ultimo ma non per importanza è stata inserita una parte riguardante le prove di laboratorio e i ritorni dal campo. Le prove di laboratorio consistono in un'analisi dei componenti e da una *reverse engineering* di tutti gli equipaggiamenti, apparati e sottosistemi. Per ritorni dal campo s'intende la serie di esperienze che si traggono dalla messa in funzione del sistema.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Descrizione del progetto “Smart Road”

Al fine di chiarire la nostra attività, per comodità del lettore riportiamo una brevissima sintesi puramente descrittiva del progetto della “smart road” in capo ad ENEA. Questo paragrafo non riporta il progetto della “smart road” e non ha lo scopo di commentarlo, ma vuole mostrare i tratti essenziali del progetto utili ai fini della nostra elaborazione. Il progetto e la descrizione dei componenti che riportiamo succintamente nei successivi sotto paragrafi (da 3.2.1 a 3.2.5) sono rintracciabili nei documenti di progetto a noi forniti e richiamati nei Documenti di Riferimento (paragrafo 5.1) che fissano la configurazione di progetto al 28 aprile 2020 da cui discende la nostra analisi (si veda report RdS/PTR(2020)/024). Ai fini della nostra analisi, la realizzazione della smart road non è essenziale ma, per le nostre attività e la nostra relazione del 2020 così come per la prima parte del nostro elaborato di questo anno, ci siamo basati esclusivamente sul progetto fornitoci. Infatti, i rallentamenti nella realizzazione della smart road dovuti alla pandemia non ci hanno permesso di raccogliere informazioni dall’impianto reale fino a quando questo non è stato effettivamente realizzato. Ciò però non è stato visto come una situazione negativa, ma ci ha permesso di affinare ulteriormente l’analisi teorica. Quando la smart road è stata poi realizzata, le informazioni tratte dall’impianto ci hanno permesso sia di validare la nostra analisi teorica sia di centrarla sul particolare caso di studio.

Nel sedime del Centro Ricerche ENEA “Casaccia” si sarebbe dovuto realizzare una “Smart Road” cioè, come già accennato, una “strada intelligente” che consenta “l’integrazione” di veicoli elettrici a guida autonoma col sistema stradale di illuminazione pubblica. La figura 1 mostra la planimetria esterna del progetto “Smart Road” all’interno del C.R. Casaccia. Ai nostri fini, gli aspetti di ingegneria civile del progetto (scavi, trincee, pozzetti, plinti, ecc.), anche se succintamente richiamati a beneficio del lettore, non sono rilevanti, al contrario, hanno importanza quelli elettrotecnici ed in particolare i componenti elettrotecnici usati rintracciabili sul computo metrico. Da un punto vista elettrico, il progetto prevede la posa e messa in opera di 18 pali per l’illuminazione della strada alimentati da filo elettrico

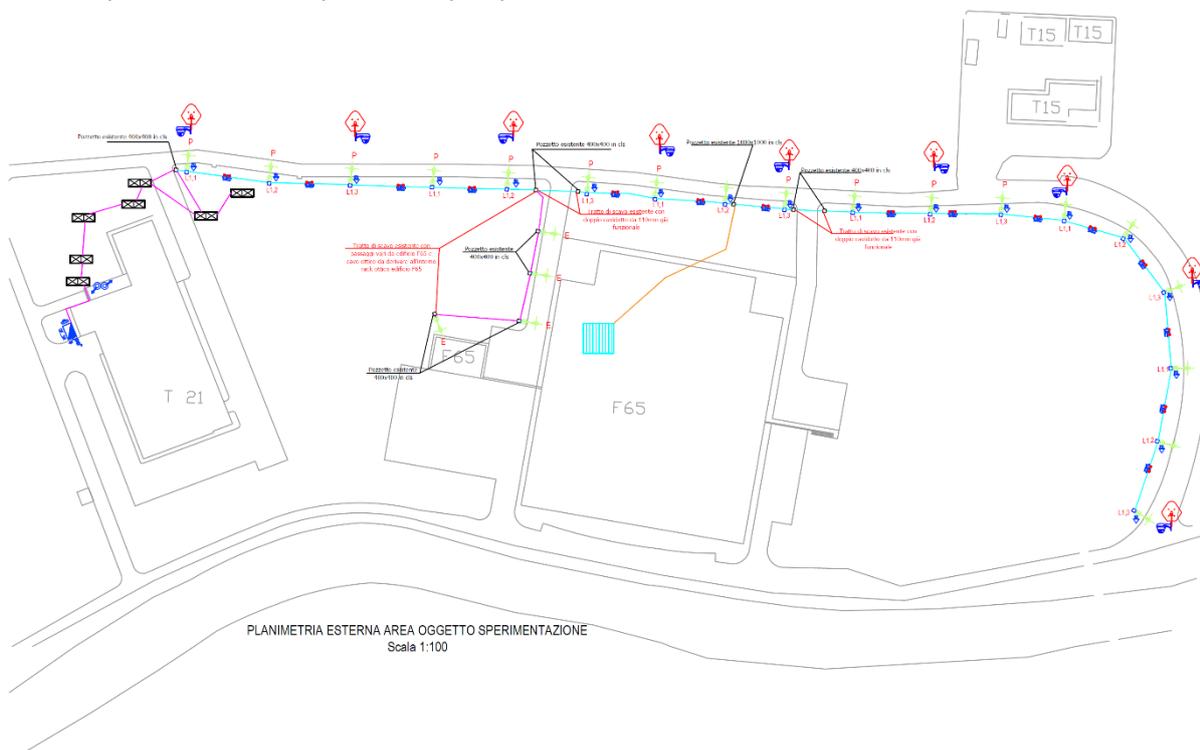


Figura 1 – Planimetria esterna del progetto “Smart Road”.

Segue una breve descrizione del progetto suddivisa nei tratti più essenziali ed in particolare, le principali opere civili previste dal progetto, l'alimentazione dell'impianto di illuminazione, l'impianto di illuminazione, la sensoristica utilizzata ed i cablaggi.

2.1.1 Opere civili principali del progetto

Come riportato nella planimetria di progetto, questo prevede uno scavo su terreno agricolo e vegetale al fianco della via che collega due Edifici del centro di ricerca (gli edifici T21 e F65 come riportato in figura 1) fino al congiungimento con la via perimetrale che porta al fosso della Casaccia. Lo scavo serve alla posa dei cavidotti e dei plinti di fondazione rispettivamente per l'alimentazione e la posa dei pali di illuminazione con tutti i vari servizi a loro connessi (TVcc, sensori ecc.).

2.1.2 L'alimentazione dell'Impianto di Illuminazione

In accordo al progetto ricevuto, l'alimentazione dell'intero apparato impiantistico ha origine dall'edificio T21. A tal fine, nell'edificio T21 è stato individuato, nel quadro generale, un interruttore disponibile da 100 A sotto alimentazione privilegiata da cui derivare la linea al nuovo quadro dedicato alla sperimentazione "Smart Road" chiamato QE_SR. La posizione del quadro è stata ipotizzata cercando di soddisfare l'esigenza di posizione baricentrica rispetto ai carichi e quella di massima possibile vicinanza sia al quadro generale che ai pozzetti esterni per la derivazione delle linee di alimentazione (si veda la Figura 1). In questa fase, sono state computate le vie cave interne (canalizzazioni e tubazioni) per raggiungere il posizionamento di tale nuovo quadro nel raggio di 50 m dalla posizione del quadro generale T21 ed è stata computata una linea maggiorata di alimentazione (sezione di fase 95 mm², con neutro e terra di 50 mm²). Qualora in fase di realizzazione, si riscontrasse la necessità di una potenza maggiore, è stato individuato un altro interruttore libero da 250 A al posto di quello da 100 A sempre sotto sezione privilegiata. Il quadro dedicato all'impianto è stato progettato in carpenteria metallica, IP55 con portella trasparente ecc.. All'interno del nuovo quadro QE_SR è previsto l'alloggiamento, oltre al sezionatore generale, i seguenti dispositivi:

- Un multimetro digitale di ultima generazione;
- Uno scaricatore di sovratensione;
- Un interruttore quadripolare magnetotermico differenziale da 32 A – 0,03 A – 10 kA a protezione della linea trifase con neutro sezione 10 mm² che alimenta i corpi illuminanti. Questo interruttore è affiancato da un relè crepuscolare con relativo contattore di potenza e da un interruttore di bypass automatico-manuale al fine di consentire il funzionamento dell'impianto di illuminazione stesso in caso di avaria dell'impianto sperimentale;
- Un interruttore bipolare magnetotermico differenziale da 16 A – 0,03 A – 10 kA a protezione della linea monofase sezione 6 mm² che alimenterà le telecamere IP, WI-FI previste nel progetto sperimentale;
- Un interruttore bipolare magnetotermico differenziale da 40 A – 0,03 A – 10 kA a protezione della linea monofase sezione 10 mm² che alimenterà la colonnina di ricarica auto per una potenza massima fino a 8 kW (nel caso la sperimentazione richieda una potenza superiore e/o un'alimentazione trifase bisognerà utilizzare uno degli interruttori messi come riserva);
- Quattro interruttori bipolari magnetotermici differenziali da 10 A – 0,03 A – 10 kA a protezione delle quattro linee monofase sezione 2,5 mm² che alimenteranno gli eventuali sensori previste a progetto la cui natura e tipologia è demandata ai responsabili della sperimentazione;
- Un interruttore bipolare magnetotermico differenziale da 16 A – 0,03 A – 10 kA a protezione della linea monofase sezione 4 mm² che alimenterà un eventuale sistema di telecontrollo previsto nel progetto sperimentale;
- Due interruttori di riserva monofase da 16 e 25 A e due trifase da 16 e 32 A.

Si evidenzia che tutti gli interruttori previsti nello schema unifilare del quadro sono dotati di ausiliari elettrici predisposti per un sistema di segnalazione e telecontrollo remoto nell'eventualità che si dovesse implementare questa possibilità. Inoltre, si sottolinea che nel quadro sono state lasciate ampie riserve di

interruttori e piastre modulari al fine di ospitare eventuali apparecchiature modulari che si dovessero rendere necessarie introdurre nel quadro stesso.

2.1.3 Impianto di illuminazione a LED

L'impianto di illuminazione previsto nel progetto prevede 18 pali, alti circa 7 m fuori terra (con ulteriori 80 cm interrati) con braccio curvo fino a 1,5 m, intervallati a una distanza media di 22 metri l'uno dall'altro, con un plinto di fondazione debolmente armato di circa un metro cubo con pozzetto 40x40 cm annesso in grado di sopportare carichi aggiuntivi relativi da eventuali apparati (pannelli fotovoltaici, alimentatori stabilizzati, telecamere con antenne ecc.) che si dovessero ritenere opportuni inserire sui pali stessi. Il calcolo illuminotecnico è stato eseguito riportando un'armatura da 60 W circa con efficienza illuminotecnica di circa 120/130 lm/W. Rientrano nella fornitura ulteriori quattro corpi illuminanti da inserire sui pali esistenti adiacenti l'edificio F65 sui quali dovranno essere sostituite le armature SAP (sorgenti al Sodio Alta Pressione) esistenti con quelle previste dal progetto come riportati nella tavola di progetto e nel computo metrico estimativo.

2.1.4 La sensoristica

Da progetto, sui pali sono stati previste postazioni per l'allaccio di sensori (in numero massimo di quattro) e telecamere dedicate alla videosorveglianza (per un massimo di nove, un palo sì ed uno no). Sebbene le telecamere siano Wi-Fi con tecnologia IP e l'alimentazione elettrica sia derivata dal nuovo quadro, il progetto prevede anche una linea di segnale in fibra ottica derivata dal pannello e rack ottico esistente nell'edificio F65. Dalla linea dorsale di segnale in fibra ottica, da convertitori ottici/LAN installati in apposita cassetta stagna sui pali scelti per ospitare le telecamere, saranno derivate le linee di segnale per ogni singola telecamera realizzate con cavi FTP cat. 6.

2.1.5 Cablaggi

La tipologia dei cavi utilizzati nel progetto è rispondente al nuovo regolamento CPR adatti per posa interrata, a doppio isolamento. È stato previsto un cavo addizionale 2x1,5 mm² lungo tutto il percorso oggetto della sperimentazione come linea aggiuntiva per un eventuale sistema a onde convogliate e/o ausiliari elettrici qualora non fosse possibile o non si voglia utilizzare una fase o il neutro della linea di illuminazione come conduttore dedicato. La dorsale di terra è stata prevista in corda di rame nudo da 35 mm² a cui verranno collegati i pali dell'illuminazione, ma senza dispersori a picchetto verticale di tipo intenzionale vista la natura del sistema (TN-S). A questa linea di terra faranno riferimento gli eventuali utilizzatori (eventualmente le telecamere, i sensori e i corpi illuminanti) che non risultassero in classe II di isolamento o che non abbiano un'alimentazione SELV o PELV come conformità alla normativa vigente.

2.2 Affidabilità dei sistemi Complessi

2.2.1 Cos'è l'Affidabilità

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 nonché la qualità costante nella produzione.

2.2.2 Scopo

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.

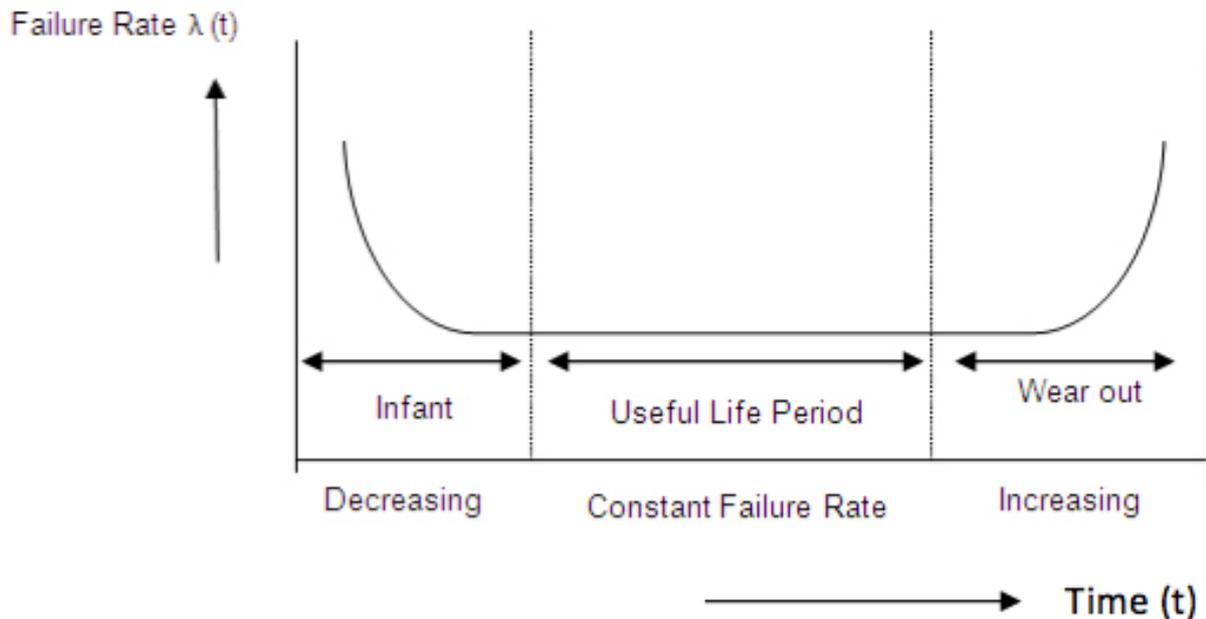


Figura 2 - Curva a Vasca da Bagno

Questi guasti sarebbero dovuti all'usura dell'ossido, all'elettromigrazione e agli effetti di elettroni caldi, tutti effetti 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.

2.2.3 Sollecitazioni e vita 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.

2.2.4 Definizioni

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):

$$F(t) = \frac{r}{n}$$

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)

$$R(t) = \frac{n - r}{n}$$

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

$$f(t, t + \Delta t) = \frac{\Delta r}{n}$$

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.

$$\lambda(t, t + \Delta t) = \frac{\Delta r}{n - r}$$

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

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

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, il tasso di guasto 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):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (0 \leq t \leq \alpha)$$

Funzione di distribuzione cumulativa (Cumulative Distribution Function):

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

Tasso di guasto (Failure Rate):

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

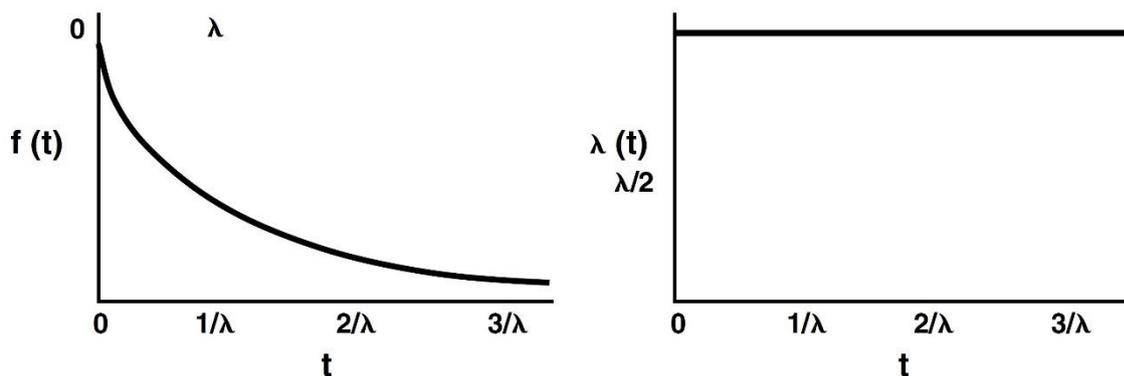


Figura 3 - Distribuzione del Failure rate

2.2.5 Tipologie 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.

2.2.6 Metodologie e manuali di riferimento

Varie organizzazioni hanno pubblicato standard che specificano come deve essere eseguita la modellazione delle sollecitazioni delle parti tra cui:

- MIL-HDBK-217
- SR-332, Procedura di previsione dell'affidabilità per apparecchiature elettroniche
- HRD-4 (British Telecom)
- SR-1171, Metodi e procedure per l'analisi dell'affidabilità del sistema

Questi "standard" producono risultati diversi, spesso di un fattore superiore a due, per lo stesso sistema. Le differenze tra loro mettono in luce il fatto che questa modellizzazione non è una scienza esatta. I progettisti di sistemi spesso devono eseguire l'analisi utilizzando uno standard specificato da un cliente, in modo che il cliente possa confrontare i risultati con altri sistemi modellati allo stesso modo.

Tutti questi standard calcolano un tasso di guasto complessivo previsto per tutti i componenti del sistema, che non è necessariamente il tasso di guasto del sistema nel suo insieme. I sistemi spesso incorporano la ridondanza o la tolleranza agli errori in modo che non si guastino quando un singolo componente si guasta. Diverse aziende forniscono programmi per l'esecuzione di calcoli di analisi della sollecitazione delle parti. È anche possibile eseguire la modellazione con un foglio di calcolo.

Tutti questi modelli assumono implicitamente l'idea di "fallimento casuale". I singoli componenti si guastano in momenti casuali ma a una velocità prevedibile, analoga al processo di decadimento nucleare. Una giustificazione per questa idea è che i componenti si guastano per un processo di usura, un prevedibile decadimento dopo la fabbricazione, ma che la durata di usura dei singoli componenti è ampiamente dispersa su una media molto lunga. I fallimenti "casuali" osservati sono quindi solo i valori estremi all'inizio di questa distribuzione.

Tutti i modelli utilizzano sostanzialmente lo stesso processo, con variazioni dettagliate.

2.2.7 Il manuale di riferimento: il MIL-HDBK-217F/2

Noi ci riferiremo al MIL-HDBK-217F/2 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 primo metodo.

2.2.8 Part Count Analysis

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.

2.2.9 Parts Stress Analysis

La *Parts Stress Analysis* è un metodo per trovare un valore atteso per il tasso di guasto (affidabilità) dei componenti meccanici ed elettronici di un sistema. Si basa sull'idea che più componenti ci sono nel sistema e maggiore è lo stress a cui sono sottoposti durante il funzionamento, più spesso si guastano.

Il metodo Part Stress Analysis richiede una maggiore quantità di informazioni dettagliate ed è solitamente più applicabile alla fase di progettazione successiva. Per sollecitazioni dei componenti, la norma si riferisce alle condizioni operative effettive come ad esempio l'ambiente, la temperatura, la tensione, la corrente e i livelli di potenza applicati. Lo standard MIL-217 raggruppa componenti o parti per categorie principali e quindi ha sottogruppi all'interno delle categorie. Ad esempio, un "condensatore in alluminio elettrolitico fisso (a secco)" è una sottocategoria del gruppo "condensatore". A ogni categoria di componenti o parti e ai relativi sottogruppi viene applicata una formula o un modello univoco per calcolare il tasso di guasto per quel componente o parte.

- Identificare la famiglia di ogni componente nel sistema
- Per ogni componente, determinare il modello del componente e lo standard da applicare
- Dal modello del componente dello standard, scopri quale parametro di complessità è necessario, se presente, e trova il valore di quel parametro per questo componente (come il conteggio dei pin per un connettore o il conteggio dei gate per un chip)
- Dal modello del componente dello standard, deriva quale curva di stress termico si applica e trova il valore della temperatura in funzione per questo componente
- La temperatura di lavoro è importante poiché, ad esempio il tasso di guasto dei connettori può cambiare poco, mentre quello dei condensatori può cambiare notevolmente
- Dal modello del componente dello standard, deriva quale curva di sollecitazione della parte si applica e trova il valore di quel parametro di sollecitazione della parte per questo componente in questa applicazione

- g) Dal modello del componente deriva il tasso di guasto di base modificato ulteriormente in base al parametro di complessità, alla temperatura operativa e alla curva di stress termico, al parametro di stress della parte e alla curva di stress della parte, con l'aritmetica specificata dallo standard. Questo ora è il tasso di guasto previsto per questo componente in questa applicazione
- h) Vengono sommati tutti i risultati per ogni componente del sistema per trovare il tasso di guasto complessivo per tutti i componenti di questo sistema.

È possibile utilizzare altri parametri di modifica globali che si presume abbiano lo stesso effetto su ogni tasso di guasto dei componenti. I più comuni sono l'ambiente, come ad esempio terreno benigno, aereo o commerciale, il processo di qualità e di qualificazione. Gli standard specificano i fattori moltiplicatori complessivi per queste varie scelte.

2.2.10 I sistemi complessi dal punto di vista affidabilistico

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.

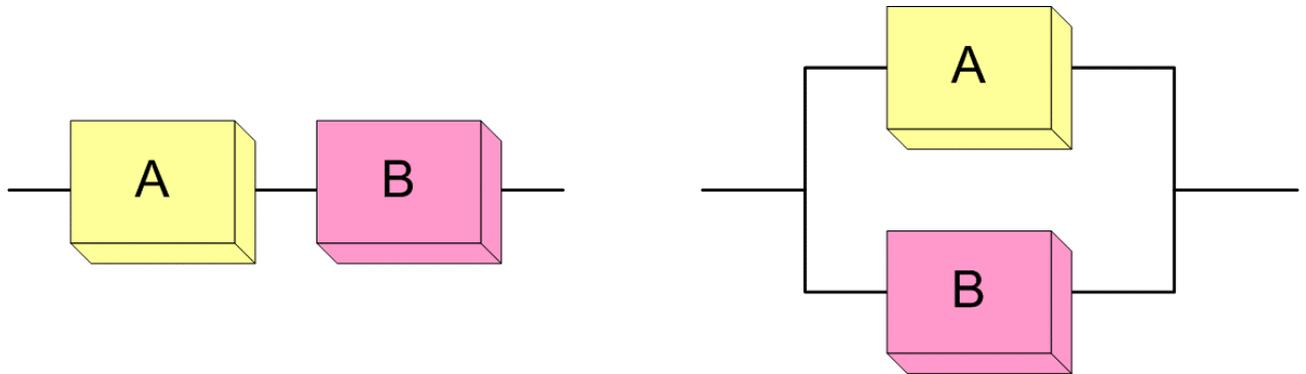


Figura 4 - schema logico "Serie" (a sinistra) e schema "Parallelo" per uno stesso sistema fisico

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.

2.2.11 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.

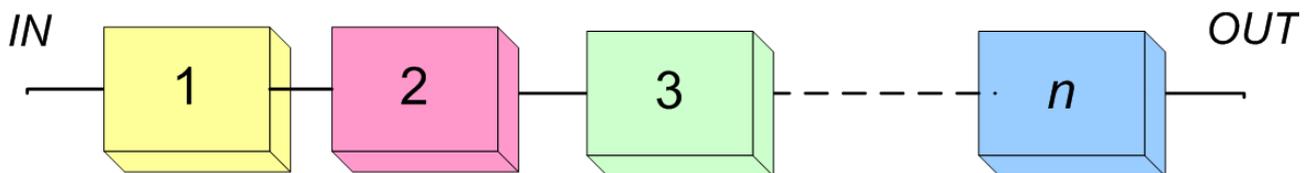


Figura 5 - schematizzazione del sistema serie

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:

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

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:

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

2.2.12 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.

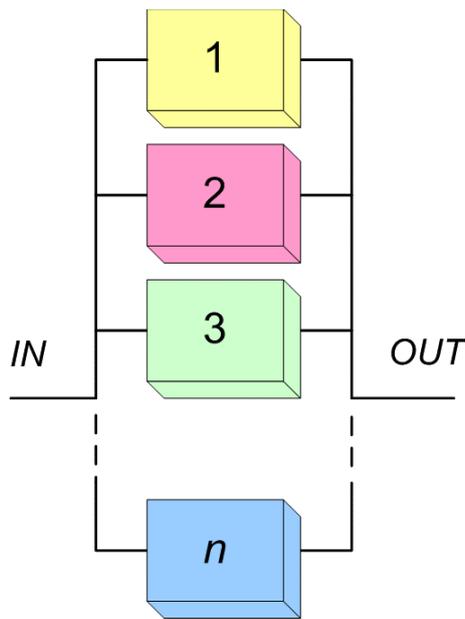


Figura 6 - schematizzazione di un sistema in parallelo a funzionamento permanente

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:

$$MTBF_{sys} = \int_0^{\infty} R_{sys}(t) dt = \int_0^{\infty} \left(N e^{-\lambda t} - \frac{N(N-1)}{2!} e^{-2\lambda t} + \frac{N(N-1)(N-2)}{3!} e^{-3\lambda t} - \dots \right) dt =$$

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

$$MTBF_{sys} = \frac{N}{\lambda} - \frac{N(N-1)}{2!} \frac{1}{2\lambda} + \frac{N(N-1)(N-2)}{3!} \frac{1}{3\lambda} - \dots$$

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

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

ossia superiore del 50% rispetto al componente preso singolarmente.

2.2.13 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.

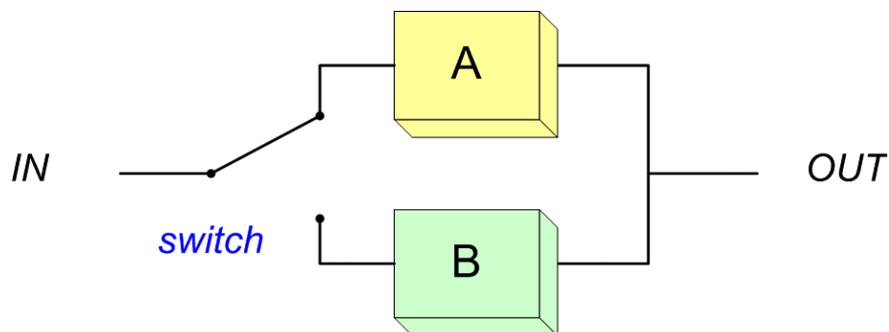


Figura 7 - Schema logico di un sistema in parallelo di due componenti a funzionamento sequenziale

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%.

2.2.14 Tabelle

Seguono le tabelle, alle diverse temperature, in cui viene riportata l'affidabilità delle singole parti

I campi delle tabelle successive sono:

- Descrizione: viene inserita una breve descrizione della parte o del sottosistema
- Environment: qui viene fornita la definizione di ambiente operativo in accordo al '217
- Lambda singolo: viene espressa la figura di affidabilità del singolo componente o sottosistema
- Quantità: viene espressa la quantità e/o molteplicità del componente nel sistema totale
- Lambda totale: viene espressa la figura di affidabilità del singolo componente o sottosistema
- MTBF: mean time between failures, espresso in ore
- Incidenza: sull'affidabilità totale, viene indicata la percentuale di incidenza del singolo elemento o gruppo

A piede di tabella si trova la somma di tutti i lambda totali che ci dà la figura di affidabilità del sistema, che viene poi, per chiarezza trasformato in MTBF prima in ore e poi in mesi.

Si segnala che la scelta delle temperature di screening rintracciabili nelle tabelle successive è dato dall'intervallo di funzionamento dei componenti.

Affidabilità del sistema a -40 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,5959	1	0,5959	1.678.226,6	0,45%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,1809	1	1,1809	846.824,2	0,89%
Scaricatore	Ground, Benign	0,7057	1	0,7057	1.417.010,6	0,53%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	0,7504	1	0,7504	1.332.539,5	0,57%
Contattore	Ground, Benign	0,0139	1	0,0139	71.717.159,3	0,01%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0051	1	0,0051	197.152.643,3	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0122	1	0,0122	81.924.746,7	0,01%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	0,7557	1	0,7557	1.323.227,1	0,57%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	0,7596	1	0,7596	1.316.558,5	0,57%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	0,6532	1	0,6532	1.530.941,2	0,49%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	0,6294	1	0,6294	1.588.708,0	0,48%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	0,6057	1	0,6057	1.651.005,2	0,46%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	0,5819	1	0,5819	1.718.387,5	0,44%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	0,5348	1	0,5348	1.869.871,8	0,40%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0103	1	0,0103	97.047.020,3	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0103	1	0,0103	97.047.020,3	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0103	1	0,0103	97.047.020,3	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0103	1	0,0103	97.047.020,3	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1,3365	18	24,0578	41.566,5	18,20%
ITALO	Ground, Unsheltered	0,7527	18	13,5488	73.807,2	10,25%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	0,7517	1	0,7517	1.330.251,6	0,57%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1,3428	1	1,3428	744.685,4	1,02%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,06%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,04%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	1,9642	1	1,9642	509.120,0	1,49%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,0099	1	0,0099	101.071.312,3	0,01%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	1,9642	2	3,9283	254.560,0	2,97%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	1,9266	2	3,8531	259.528,1	2,92%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	1,9261	3	5,7784	173.057,5	4,37%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	1,9271	2	3,8542	259.455,1	2,92%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	1,9281	2	3,8562	259.324,0	2,92%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	0,9882	3	2,9646	337.313,8	2,24%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	6,4799	9	58,3194	17.146,9	44,12%
				TOTALE	132,1749	

MTBF (R_{Total})	7.565,74 Ore
Equivalenti a	10,51 Mesi

Tabella 1 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di -40°C

Affidabilità del sistema a -30 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,6029	1	0,6029	1.658.771,5	0,44%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,1895	1	1,1895	840.690,0	0,87%
Scaricatore	Ground, Benign	0,7122	1	0,7122	1.404.155,6	0,52%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	0,7700	1	0,7700	1.298.678,5	0,57%
Contattore	Ground, Benign	0,0211	1	0,0211	47.396.457,7	0,02%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0069	1	0,0069	145.815.216,7	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0184	1	0,0184	54.258.958,7	0,01%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	0,7768	1	0,7768	1.287.292,9	0,57%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	0,7813	1	0,7813	1.279.862,5	0,57%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	0,6894	1	0,6894	1.450.491,1	0,51%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	0,6614	1	0,6614	1.511.839,8	0,49%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	0,6335	1	0,6335	1.578.607,2	0,47%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	0,6055	1	0,6055	1.651.544,4	0,45%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	0,5500	1	0,5500	1.818.313,8	0,40%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0131	1	0,0131	76.089.772,0	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0131	1	0,0131	76.089.772,0	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0131	1	0,0131	76.089.772,0	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0131	1	0,0131	76.089.772,0	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1,3585	18	24,4534	40.894,1	17,98%
ITALO	Ground, Unsheltered	0,7730	18	13,9136	71.872,3	10,23%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	0,7710	1	0,7710	1.297.050,8	0,57%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1,3659	1	1,3659	732.092,5	1,00%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,05%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,03%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	1,9965	1	1,9965	500.870,8	1,47%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,0162	1	0,0162	61.627.032,6	0,01%
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	1,9965	2	3,9930	250.435,4	2,94%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	1,9516	2	3,9032	256.196,8	2,87%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	1,9506	3	5,8517	170.891,0	4,30%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	1,9526	2	3,9051	256.074,4	2,87%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	1,9546	2	3,9091	255.812,8	2,87%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	0,9987	3	2,9960	333.783,0	2,20%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	6,7519	9	60,7669	16.456,3	44,67%
TOTALE				136,0327		

MTBF(R_{Total})	7.351,18 Ore
Equivalenti a	10,21 Mes

Tabella 2 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di -30°C

Affidabilità del sistema a -20 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,6161	1	0,6161	1.623.089,5	0,43%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,2074	1	1,2074	828.243,2	0,85%
Scaricatore	Ground, Benign	0,7239	1	0,7239	1.381.429,6	0,51%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	0,8120	1	0,8120	1.231.535,8	0,57%
Contattore	Ground, Benign	0,0320	1	0,0320	31.282.371,7	0,02%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0093	1	0,0093	107.133.384,8	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0281	1	0,0281	35.532.924,8	0,02%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	0,8208	1	0,8208	1.218.293,4	0,58%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	0,8261	1	0,8261	1.210.557,9	0,58%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	0,7314	1	0,7314	1.367.304,2	0,51%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	0,6988	1	0,6988	1.430.949,4	0,49%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	0,6663	1	0,6663	1.500.808,9	0,47%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	0,6338	1	0,6338	1.577.839,7	0,45%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	0,5692	1	0,5692	1.756.840,9	0,40%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0165	1	0,0165	60.690.419,3	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0165	1	0,0165	60.690.419,3	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0165	1	0,0165	60.690.419,3	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0165	1	0,0165	60.690.419,3	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1,4063	18	25,3140	39.503,8	17,79%
ITALO	Ground, Unsheltered	0,8159	18	14,6861	68.091,8	10,32%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	0,8120	1	0,8120	1.231.485,3	0,57%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1,4150	1	1,4150	706.728,4	0,99%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,05%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,03%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	2,0711	1	2,0711	482.838,2	1,46%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,0269	1	0,0269	37.235.994,7	0,02%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	2,0711	2	4,1422	241.419,1	2,91%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	2,0062	2	4,0124	249.227,0	2,82%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	2,0039	3	6,0116	166.344,3	4,22%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	2,0077	2	4,0155	249.036,1	2,82%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	2,0116	2	4,0232	248.557,6	2,83%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	1,0160	3	3,0481	328.076,0	2,14%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	7,1279	9	64,1515	15.588,1	45,09%
TOTALE				142,2902		

MTBF(R_{Total})	7.027,89 Ore
Equivalenti a	9,76 Mesi

Tabella 3 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di -20°C

Affidabilità del sistema a -10 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,6429	1	0,6429	1.555.404,5	0,42%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,2472	1	1,2472	801.769,5	0,81%
Scaricatore	Ground, Benign	0,7441	1	0,7441	1.343.861,8	0,49%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	0,9004	1	0,9004	1.110.652,9	0,59%
Contattore	Ground, Benign	0,0482	1	0,0482	20.760.915,7	0,03%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0127	1	0,0127	78.437.189,1	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0431	1	0,0431	23.211.938,9	0,03%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	0,9119	1	0,9119	1.096.655,1	0,60%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	0,9179	1	0,9179	1.089.450,2	0,60%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	0,7839	1	0,7839	1.275.620,0	0,51%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	0,7465	1	0,7465	1.339.513,8	0,49%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	0,7091	1	0,7091	1.410.145,8	0,46%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	0,6718	1	0,6718	1.488.641,2	0,44%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	0,5975	1	0,5975	1.673.577,2	0,39%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0203	1	0,0203	49.151.225,6	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0203	1	0,0203	49.151.225,6	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0203	1	0,0203	49.151.225,6	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0203	1	0,0203	49.151.225,6	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1,5096	18	27,1723	36.802,1	17,74%
ITALO	Ground, Unsheltered	0,9055	18	16,2995	61.351,7	10,64%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	0,8984	1	0,8984	1.113.078,2	0,59%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1,5195	1	1,5195	658.110,3	0,99%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,05%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,03%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	2,2413	1	2,2413	446.170,1	1,46%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,0443	1	0,0443	22.595.435,6	0,03%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	2,2413	2	4,4826	223.085,0	2,93%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	2,1258	2	4,2516	235.207,2	2,78%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	2,1211	3	6,3633	157.150,4	4,16%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	2,1282	2	4,2565	234.937,5	2,78%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	2,1353	2	4,2707	234.154,5	2,79%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	1,0444	3	3,1332	319.164,2	2,05%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	7,6684	9	69,0158	14.489,4	45,07%
TOTALE				153,1271		

MTBF(R_{Total})	6.530,52 Ore
Equivalenti a	9,07 Mesi

Tabella 4 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di -10°C

Affidabilità del sistema a 0 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,6994	1	0,6994	1.429.745,5	0,40%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,3387	1	1,3387	746.976,5	0,77%
Scaricatore	Ground, Benign	0,7776	1	0,7776	1.286.007,2	0,45%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	1,0823	1	1,0823	923.978,3	0,63%
Contattore	Ground, Benign	0,0718	1	0,0718	13.923.574,3	0,04%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0174	1	0,0174	57.436.768,0	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0656	1	0,0656	15.237.537,2	0,04%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	1,0973	1	1,0973	911.336,3	0,63%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	1,1042	1	1,1042	905.671,9	0,64%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	0,8589	1	0,8589	1.164.316,1	0,50%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	0,8163	1	0,8163	1.225.001,1	0,47%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	0,7738	1	0,7738	1.292.359,9	0,45%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	0,7312	1	0,7312	1.367.557,3	0,42%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	0,6468	1	0,6468	1.546.155,9	0,37%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0248	1	0,0248	40.352.052,2	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0248	1	0,0248	40.352.052,2	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0248	1	0,0248	40.352.052,2	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0248	1	0,0248	40.352.052,2	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1,7291	18	31,1233	32.130,3	18,01%
ITALO	Ground, Unsheltered	1,0891	18	19,6040	51.010,1	11,34%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	1,0766	1	1,0766	928.867,2	0,62%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1,7404	1	1,7404	574.590,7	1,01%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,04%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,03%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	2,6206	1	2,6206	381.596,8	1,52%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,0720	1	0,0720	13.896.956,0	0,04%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	2,6206	2	5,2411	190.798,4	3,03%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	2,3854	2	4,7707	209.611,0	2,76%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	2,3766	3	7,1298	140.257,2	4,12%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	2,3891	2	4,7782	209.282,5	2,76%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	2,4016	2	4,8033	208.190,7	2,78%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	1,0896	3	3,2689	305.914,5	1,89%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	8,4795	9	76,3156	13.103,5	44,15%
TOTALE				172,8443		

MTBF(R_{Total})	5.785,55 Ore
Equivalenti a	8,04 Mesi

Tabella 5 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 0°C

Affidabilità del sistema a 10 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,8203	1	0,8203	1.219.029,5	0,39%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,5476	1	1,5476	646.163,1	0,74%
Scaricatore	Ground, Benign	0,8309	1	0,8309	1.203.521,3	0,40%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	1,4472	1	1,4472	690.998,2	0,69%
Contattore	Ground, Benign	0,1056	1	0,1056	9.466.692,5	0,05%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0237	1	0,0237	42.212.864,3	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0990	1	0,0990	10.105.479,8	0,05%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	1,4668	1	1,4668	681.748,8	0,70%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	1,4746	1	1,4746	678.170,7	0,70%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	0,9822	1	0,9822	1.018.115,4	0,47%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	0,9342	1	0,9342	1.070.395,7	0,45%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	0,8863	1	0,8863	1.128.335,9	0,42%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	0,8383	1	0,8383	1.192.907,6	0,40%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	0,7430	1	0,7430	1.345.804,7	0,35%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0298	1	0,0298	33.536.163,6	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0298	1	0,0298	33.536.163,6	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0298	1	0,0298	33.536.163,6	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0298	1	0,0298	33.536.163,6	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	2,1856	18	39,3409	25.418,9	18,75%
ITALO	Ground, Unsheltered	1,4562	18	26,2123	38.150,0	12,49%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	1,4350	1	1,4350	696.843,0	0,68%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	2,1983	1	2,1983	454.887,8	1,05%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,03%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,02%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	3,4390	1	3,4390	290.781,7	1,64%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,1148	1	0,1148	8.709.230,5	0,05%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	3,4390	2	6,8780	145.390,9	3,28%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	2,9378	2	5,8755	170.198,0	2,80%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	2,9221	3	8,7664	114.071,9	4,18%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	2,9433	2	5,8867	169.875,6	2,81%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	2,9645	2	5,9291	168.661,1	2,83%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	1,1599	3	3,4797	287.383,6	1,66%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	9,7548	9	87,7931	11.390,4	41,85%
TOTALE				209,7872		

MTBF(R_{Total})	4.766,73 Ore
Equivalenti a	6,62 Mesi

Tabella 6 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 10°C

Affidabilità del sistema a 20 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	1,0773	1	1,0773	928.222,3	0,39%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	2,0124	1	2,0124	496.920,3	0,72%
Scaricatore	Ground, Benign	0,9129	1	0,9129	1.095.400,3	0,33%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	2,1589	1	2,1589	463.198,2	0,77%
Contattore	Ground, Benign	0,1530	1	0,1530	6.536.640,6	0,05%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0320	1	0,0320	31.227.690,1	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,1472	1	0,1472	6.793.944,0	0,05%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	2,1845	1	2,1845	457.760,6	0,78%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	2,1932	1	2,1932	455.953,9	0,78%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	1,2079	1	1,2079	827.915,8	0,43%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	1,1542	1	1,1542	866.398,7	0,41%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	1,1006	1	1,1006	908.633,5	0,39%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	1,0469	1	1,0469	955.197,0	0,37%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	0,9404	1	0,9404	1.063.382,1	0,34%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0355	1	0,0355	28.181.315,8	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0355	1	0,0355	28.181.315,8	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0355	1	0,0355	28.181.315,8	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0355	1	0,0355	28.181.315,8	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	3,1101	18	55,9822	17.862,8	20,01%
ITALO	Ground, Unsheltered	2,1709	18	39,0758	25.591,3	13,97%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	2,1363	1	2,1363	468.102,8	0,76%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	3,1244	1	3,1244	320.064,0	1,12%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,03%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,02%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	5,1431	1	5,1431	194.434,5	1,84%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,1793	1	0,1793	5.576.106,0	0,06%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	5,1431	2	10,2862	97.217,2	3,68%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	4,0821	2	8,1641	122.487,1	2,92%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	4,0555	3	12,1666	82.192,0	4,35%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	4,0901	2	8,1803	122.245,2	2,92%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	4,1247	2	8,2495	121.220,0	2,95%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	1,2663	3	3,7989	263.234,3	1,36%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	11,8522	9	106,6697	9.374,7	38,13%
				TOTALE	279,7393	

MTBF(R_{Total})	3.574,76 Ore
Equivalenti a	4,96 Mesi

Tabella 7 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 20°C

Affidabilità del sistema a 30 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	1,6122	1	1,6122	620.251,7	0,39%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	3,0104	1	3,0104	332.178,7	0,73%
Scaricatore	Ground, Benign	1,0355	1	1,0355	965.724,9	0,25%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	3,5068	1	3,5068	285.161,5	0,85%
Contattore	Ground, Benign	0,2180	1	0,2180	4.587.156,2	0,05%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0429	1	0,0429	23.302.570,4	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,2156	1	0,2156	4.639.195,0	0,05%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	3,5402	1	3,5402	282.472,8	0,86%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	3,5498	1	3,5498	281.708,0	0,86%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	1,6413	1	1,6413	609.272,8	0,40%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	1,5817	1	1,5817	632.213,2	0,38%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	1,5222	1	1,5222	656.948,8	0,37%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	1,4626	1	1,4626	683.698,7	0,36%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	1,3444	1	1,3444	743.829,0	0,33%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0418	1	0,0418	23.920.073,0	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0418	1	0,0418	23.920.073,0	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0418	1	0,0418	23.920.073,0	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0418	1	0,0418	23.920.073,0	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	4,9278	18	88,7005	11.273,9	21,55%
ITALO	Ground, Unsheltered	3,5225	18	63,4056	15.771,5	15,40%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	3,4679	1	3,4679	288.361,4	0,84%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	4,9436	1	4,9436	202.280,6	1,20%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,02%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,01%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	8,5630	1	8,5630	116.782,0	2,08%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,2739	1	0,2739	3.650.420,4	0,07%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	8,5630	2	17,1259	58.391,0	4,16%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	6,3807	2	12,7614	78.361,0	3,10%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	6,3375	3	19,0124	52.597,1	4,62%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	6,3921	2	12,7843	78.221,0	3,11%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	6,4468	2	12,8936	77.557,8	3,13%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	1,4242	3	4,2726	234.047,7	1,04%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	15,4304	9	138,8740	7.200,8	33,74%
				TOTALE	411,6492	

MTBF(R_{Total})	2.429,25 Ore
Equivalenti a	3,37 Mesi

Tabella 8 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 30°C

Affidabilità del sistema a 40 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	2,6933	1	2,6933	371.290,0	0,41%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	5,0701	1	5,0701	197.233,5	0,77%
Scaricatore	Ground, Benign	1,2147	1	1,2147	823.221,9	0,18%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	5,9847	1	5,9847	167.093,7	0,91%
Contattore	Ground, Benign	0,3056	1	0,3056	3.271.876,4	0,05%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0569	1	0,0569	17.565.314,3	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,3105	1	0,3105	3.220.261,7	0,05%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	6,0279	1	6,0279	165.895,8	0,92%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	6,0385	1	6,0385	165.604,6	0,92%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	2,4787	1	2,4787	403.441,8	0,38%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	2,4130	1	2,4130	414.422,2	0,37%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	2,3473	1	2,3473	426.017,0	0,36%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	2,2817	1	2,2817	438.279,2	0,35%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	2,1513	1	2,1513	464.842,7	0,33%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0488	1	0,0488	20.489.346,5	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0488	1	0,0488	20.489.346,5	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0488	1	0,0488	20.489.346,5	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0488	1	0,0488	20.489.346,5	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	8,3931	18	151,0755	6.619,2	23,00%
ITALO	Ground, Unsheltered	6,0052	18	108,0942	9.251,2	16,45%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	5,9214	1	5,9214	168.880,4	0,90%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	8,4105	1	8,4105	118.898,6	1,28%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,01%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,01%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	15,1806	1	15,1806	65.873,5	2,31%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,4093	1	0,4093	2.443.061,2	0,06%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	15,1806	2	30,3612	32.936,8	4,62%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	10,8507	2	21,7013	46.080,1	3,30%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	10,7826	3	32,3477	30.914,1	4,92%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	10,8665	2	21,7329	46.013,1	3,31%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	10,9504	2	21,9007	45.660,6	3,33%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	1,6571	3	4,9714	201.149,0	0,76%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	21,6795	9	195,1158	5.125,2	29,70%
				TOTALE	656,9116	

MTBF(R_{Total})	1.522,27 Ore
Equivalenti a	2,11 Mesi

Tabella 9 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 40°C

Affidabilità del sistema a 50 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	4,8065	1	4,8065	208.052,8	0,44%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	9,1535	1	9,1535	109.248,0	0,83%
Scaricatore	Ground, Benign	1,4750	1	1,4750	677.988,3	0,13%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	10,4097	1	10,4097	96.064,7	0,94%
Contattore	Ground, Benign	0,4217	1	0,4217	2.371.182,1	0,04%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0747	1	0,0747	13.386.185,0	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,4400	1	0,4400	2.272.663,2	0,04%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	10,4652	1	10,4652	95.554,6	0,95%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	10,4768	1	10,4768	95.448,6	0,95%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	4,0682	1	4,0682	245.806,1	0,37%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	3,9963	1	3,9963	250.233,7	0,36%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	3,9243	1	3,9243	254.823,8	0,36%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	3,8523	1	3,8523	259.585,4	0,35%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	3,7094	1	3,7094	269.586,5	0,34%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0565	1	0,0565	17.697.726,9	0,01%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0565	1	0,0565	17.697.726,9	0,01%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0565	1	0,0565	17.697.726,9	0,01%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0565	1	0,0565	17.697.726,9	0,01%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	14,7995	18	266,3910	3.753,9	24,13%
ITALO	Ground, Unsheltered	10,4363	18	187,8533	5.323,3	17,02%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	10,3109	1	10,3109	96.984,4	0,93%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	14,8186	1	14,8186	67.482,6	1,34%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,01%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	27,5456	1	27,5456	36.303,4	2,50%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,5987	1	0,5987	1.670.223,1	0,05%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	27,5456	2	55,0912	18.151,7	4,99%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	19,2644	2	38,5287	25.954,7	3,49%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	19,1604	3	57,4812	17.397,0	5,21%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	19,2858	2	38,5716	25.925,8	3,49%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	19,4111	2	38,8223	25.758,4	3,52%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	2,0114	3	6,0343	165.718,3	0,55%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	32,6927	9	294,2345	3.398,7	26,65%
TOTALE				1103,9011		

MTBF(R_{Total})	905,88 Ore
Equivalenti a	1,26 Mesi

Tabella 10 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 50°C

Affidabilità del sistema a 60 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	8,7971	1	8,7971	113.673,5	0,46%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	16,9392	1	16,9392	59.034,5	0,89%
Scaricatore	Ground, Benign	1,8625	1	1,8625	536.922,8	0,10%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	18,0997	1	18,0997	55.249,4	0,95%
Contattore	Ground, Benign	0,5731	1	0,5731	1.744.985,5	0,03%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0969	1	0,0969	10.317.357,7	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,6134	1	0,6134	1.630.236,2	0,03%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	18,1706	1	18,1706	55.033,8	0,96%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	18,1833	1	18,1833	54.995,5	0,96%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	7,0035	1	7,0035	142.786,3	0,37%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	6,9250	1	6,9250	144.404,2	0,36%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	6,8465	1	6,8465	146.059,2	0,36%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	6,7681	1	6,7681	147.752,5	0,36%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	6,6123	1	6,6123	151.233,5	0,35%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0649	1	0,0649	15.403.902,6	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0649	1	0,0649	15.403.902,6	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0649	1	0,0649	15.403.902,6	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0649	1	0,0649	15.403.902,6	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	26,2989	18	473,3797	2.112,5	24,91%
ITALO	Ground, Unsheltered	18,1339	18	326,4111	3.063,6	17,18%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	17,9511	1	17,9511	55.707,0	0,94%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	26,3197	1	26,3197	37.994,3	1,39%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	49,8992	1	49,8992	20.040,4	2,63%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,8582	1	0,8582	1.165.213,4	0,05%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	49,8992	2	99,7984	10.020,2	5,25%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	34,6105	2	69,2210	14.446,5	3,64%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	34,4561	3	103,3684	9.674,1	5,44%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	34,6390	2	69,2780	14.434,6	3,65%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	34,8219	2	69,6438	14.358,8	3,67%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	2,6105	3	7,8315	127.690,1	0,41%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	52,0422	9	468,3800	2.135,0	24,65%
TOTALE				1900,2105		

MTBF(R_{Total})	526,26 Ore
Equivalenti a	0,73 Mesi

Tabella 11 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 60°C

Affidabilità del sistema a 70 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	16,0815	1	16,0815	62.183,4	0,49%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	31,2454	1	31,2454	32.004,7	0,95%
Scaricatore	Ground, Benign	2,4929	1	2,4929	401.144,3	0,08%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	31,1473	1	31,1473	32.105,5	0,95%
Contattore	Ground, Benign	0,7674	1	0,7674	1.303.063,3	0,02%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,1243	1	0,1243	8.042.832,8	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,8418	1	0,8418	1.187.954,5	0,03%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	31,2370	1	31,2370	32.013,3	0,95%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	31,2508	1	31,2508	31.999,2	0,95%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	12,2583	1	12,2583	81.577,3	0,37%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	12,1732	1	12,1732	82.147,6	0,37%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	12,0881	1	12,0881	82.725,9	0,37%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	12,0030	1	12,0030	83.312,4	0,37%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	11,8340	1	11,8340	84.501,9	0,36%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0741	1	0,0741	13.502.138,5	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0741	1	0,0741	13.502.138,5	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0741	1	0,0741	13.502.138,5	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0741	1	0,0741	13.502.138,5	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	46,3859	18	834,9467	1.197,7	25,41%
ITALO	Ground, Unsheltered	31,1908	18	561,4349	1.781,2	17,08%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	30,9299	1	30,9299	32.331,2	0,94%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	46,4085	1	46,4085	21.547,8	1,41%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	89,0960	1	89,0960	11.223,8	2,71%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	1,2069	1	1,2069	828.543,3	0,04%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	89,0960	2	178,1921	5.611,9	5,42%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	61,7900	2	123,5799	8.091,9	3,76%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	61,5663	3	184,6990	5.414,2	5,62%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	61,8273	2	123,6546	8.087,0	3,76%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	62,0883	2	124,1765	8.053,1	3,78%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	3,8426	3	11,5277	86.747,2	0,35%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	85,6358	9	770,7223	1.297,5	23,45%
				TOTALE	3286,5360	

MTBF(R_{Total})	304,27 Ore
Equivalenti	
a	0,42 Mesi

Tabella 12 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 70°C

Affidabilità del sistema a 80 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	28,9505	1	28,9505	34.541,7	0,51%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	56,6372	1	56,6372	17.656,2	1,00%
Scaricatore	Ground, Benign	3,7024	1	3,7024	270.092,1	0,07%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	52,8741	1	52,8741	18.912,9	0,94%
Contattore	Ground, Benign	1,0136	1	1,0136	986.618,4	0,02%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,1577	1	0,1577	6.340.121,4	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	1,1379	1	1,1379	878.784,4	0,02%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	52,9866	1	52,9866	18.872,7	0,94%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	53,0014	1	53,0014	18.867,4	0,94%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	21,3777	1	21,3777	46.777,8	0,38%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	21,2858	1	21,2858	46.979,7	0,38%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	21,1939	1	21,1939	47.183,4	0,38%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	21,1020	1	21,1020	47.388,8	0,37%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	20,9196	1	20,9196	47.802,1	0,37%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0839	1	0,0839	11.912.334,9	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0839	1	0,0839	11.912.334,9	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0839	1	0,0839	11.912.334,9	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0839	1	0,0839	11.912.334,9	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	80,6570	18	1451,8267	688,8	25,70%
ITALO	Ground, Unsheltered	52,9289	18	952,7199	1.049,6	16,86%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	52,5639	1	52,5639	19.024,5	0,93%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	80,6815	1	80,6815	12.394,4	1,43%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	155,9702	1	155,9702	6.411,5	2,76%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	1,6673	1	1,6673	599.762,3	0,03%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	155,9702	2	311,9404	3.205,7	5,52%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	108,6784	2	217,3567	4.600,7	3,85%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	108,3615	3	325,0845	3.076,1	5,75%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	108,7265	2	217,4530	4.598,7	3,85%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	109,0915	2	218,1830	4.583,3	3,86%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	6,9659	3	20,8977	47.852,2	0,37%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	142,9467	9	1286,5199	777,3	22,77%
TOTALE				5649,6603		

MTBF(R_{Total})	177,00 Ore
Equivalenti a	0,25 Mesi

Tabella 13 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 80°C

Affidabilità del sistema a 90 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	50,9928	1	50,9928	19.610,6	0,53%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	100,2724	1	100,2724	9.972,8	1,04%
Scaricatore	Ground, Benign	6,5019	1	6,5019	153.801,4	0,07%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	88,6808	1	88,6808	11.276,4	0,92%
Contattore	Ground, Benign	1,3213	1	1,3213	756.834,2	0,01%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,1979	1	0,1979	5.052.291,1	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	1,5165	1	1,5165	659.428,2	0,02%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	88,8207	1	88,8207	11.258,6	0,92%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	88,8367	1	88,8367	11.256,6	0,92%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	36,7367	1	36,7367	27.220,7	0,38%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	36,6379	1	36,6379	27.294,1	0,38%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	36,5392	1	36,5392	27.367,9	0,38%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	36,4404	1	36,4404	27.442,1	0,38%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	36,2443	1	36,2443	27.590,6	0,38%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,0946	1	0,0946	10.573.116,1	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,0946	1	0,0946	10.573.116,1	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,0946	1	0,0946	10.573.116,1	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,0946	1	0,0946	10.573.116,1	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	138,0828	18	2485,4910	402,3	25,86%
ITALO	Ground, Unsheltered	88,7492	18	1597,4859	626,0	16,62%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	88,2481	1	88,2481	11.331,7	0,92%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	138,1091	1	138,1091	7.240,7	1,44%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	267,4264	1	267,4264	3.739,3	2,78%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	2,2652	1	2,2652	441.452,5	0,02%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	267,4264	2	534,8528	1.869,7	5,57%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	187,8215	2	375,6429	2.662,1	3,91%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	187,3815	3	562,1446	1.778,9	5,85%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	187,8827	2	375,7653	2.661,2	3,91%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	188,3838	2	376,7676	2.654,2	3,92%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	15,9228	3	47,7683	20.934,4	0,50%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	238,7222	9	2148,4994	465,4	22,36%
TOTALE				9610,7038		

MTBF(R_{Total})	104,05 Ore
Equivalenti a	0,14 Mesi

Tabella 14 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 90°C

Affidabilità del sistema a 100 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	87,6657	1	87,6657	11.407,0	0,54%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	173,0435	1	173,0435	5.778,9	1,07%
Scaricatore	Ground, Benign	13,8499	1	13,8499	72.202,8	0,09%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	147,8253	1	147,8253	6.764,7	0,91%
Contattore	Ground, Benign	1,7014	1	1,7014	587.739,3	0,01%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,2458	1	0,2458	4.068.140,1	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	1,9938	1	1,9938	501.551,2	0,01%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	147,9977	1	147,9977	6.756,9	0,91%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	148,0148	1	148,0148	6.756,1	0,91%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	61,8849	1	61,8849	16.159,0	0,38%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	61,7791	1	61,7791	16.186,7	0,38%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	61,6733	1	61,6733	16.214,5	0,38%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	61,5676	1	61,5676	16.242,3	0,38%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	61,3575	1	61,3575	16.297,9	0,38%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,1060	1	0,1060	9.436.953,7	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,1060	1	0,1060	9.436.953,7	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,1060	1	0,1060	9.436.953,7	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,1060	1	0,1060	9.436.953,7	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	233,3568	18	4200,4215	238,1	25,95%
ITALO	Ground, Unsheltered	147,9098	18	2662,3772	375,6	16,45%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	147,2334	1	147,2334	6.791,9	0,91%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	233,3849	1	233,3849	4.284,8	1,44%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	449,8633	1	449,8633	2.222,9	2,78%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	3,0301	1	3,0301	330.019,5	0,02%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	449,8633	2	899,7267	1.111,4	5,56%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	319,3546	2	638,7092	1.565,7	3,95%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	318,7550	3	956,2649	1.045,7	5,91%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	319,4314	2	638,8628	1.565,3	3,95%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	320,1079	2	640,2157	1.562,0	3,96%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	42,4333	3	127,2999	7.855,5	0,79%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	395,2878	9	3557,5900	281,1	21,98%
TOTALE				16186,1234		

MTBF(R_{Total})	61,78 Ore
Equivalenti a	0,09 Mesi

Tabella 15 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 100°C

Affidabilità del sistema a 110 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	147,0442	1	147,0442	6.800,7	0,54%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	291,0758	1	291,0758	3.435,5	1,07%
Scaricatore	Ground, Benign	34,0161	1	34,0161	29.397,8	0,13%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	247,4128	1	247,4128	4.041,8	0,91%
Contattore	Ground, Benign	2,1658	1	2,1658	461.720,0	0,01%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,3023	1	0,3023	3.308.358,6	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	2,5883	1	2,5883	386.356,7	0,01%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	247,6233	1	247,6233	4.038,4	0,91%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	247,6415	1	247,6415	4.038,1	0,91%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	101,9892	1	101,9892	9.805,0	0,38%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	101,8763	1	101,8763	9.815,8	0,38%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	101,7634	1	101,7634	9.826,7	0,38%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	101,6506	1	101,6506	9.837,6	0,37%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	101,4265	1	101,4265	9.859,4	0,37%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,1181	1	0,1181	8.466.679,8	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,1181	1	0,1181	8.466.679,8	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,1181	1	0,1181	8.466.679,8	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,1181	1	0,1181	8.466.679,8	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	391,6350	18	7049,4293	141,9	26,00%
ITALO	Ground, Unsheltered	247,5163	18	4455,2926	224,5	16,43%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	246,6174	1	246,6174	4.054,9	0,91%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	391,6650	1	391,6650	2.553,2	1,44%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	745,2906	1	745,2906	1.341,8	2,75%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	3,9950	1	3,9950	250.314,3	0,01%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	745,2906	2	1490,5813	670,9	5,50%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	536,4920	2	1072,9840	932,0	3,96%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	535,6884	3	1607,0652	622,3	5,93%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	536,5873	2	1073,1746	931,8	3,96%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	537,4862	2	1074,9724	930,3	3,97%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	119,4479	3	358,3437	2.790,6	1,32%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	645,5691	9	5810,1219	172,1	21,43%
TOTALE				27108,7008		

MTBF(R_{Total})	36,89 Ore
Equivalenti a	0,05 Mesi

Tabella 16 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 110°C

Affidabilità del sistema a 120 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	240,7808	1	240,7808	4.153,2	0,53%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	477,6468	1	477,6468	2.093,6	1,05%
Scaricatore	Ground, Benign	88,9760	1	88,9760	11.239,0	0,20%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	421,5542	1	421,5542	2.372,2	0,93%
Contattore	Ground, Benign	2,7272	1	2,7272	366.671,5	0,01%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,3682	1	0,3682	2.715.944,8	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	3,3200	1	3,3200	301.204,2	0,01%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	421,8093	1	421,8093	2.370,7	0,93%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	421,8287	1	421,8287	2.370,6	0,93%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	164,3930	1	164,3930	6.083,0	0,36%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	164,2730	1	164,2730	6.087,4	0,36%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	164,1529	1	164,1529	6.091,9	0,36%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	164,0329	1	164,0329	6.096,3	0,36%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	163,7945	1	163,7945	6.105,2	0,36%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,1310	1	0,1310	7.632.962,1	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,1310	1	0,1310	7.632.962,1	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,1310	1	0,1310	7.632.962,1	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,1310	1	0,1310	7.632.962,1	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	658,6541	18	11855,7733	84,3	26,05%
ITALO	Ground, Unsheltered	421,6798	18	7590,2370	131,7	16,68%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	420,5025	1	420,5025	2.378,1	0,92%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	658,6860	1	658,6860	1.518,2	1,45%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	1.223,1696	1	1223,1696	817,5	2,69%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	5,1965	1	5,1965	192.439,0	0,01%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	1.223,1696	2	2446,3392	408,8	5,38%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	896,6038	2	1793,2075	557,7	3,94%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	895,5433	3	2686,6299	372,2	5,90%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	896,7207	2	1793,4413	557,6	3,94%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	897,8980	2	1795,7960	556,9	3,95%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	334,7246	3	1004,1737	995,8	2,21%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	1.036,9561	9	9332,6050	107,2	20,51%
TOTALE				45506,0587		

MTBF(R_{Total})	21,98 Ore
Equivalenti a	0,03 Mesi

Tabella 17 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 120°C

Affidabilità del sistema a 130 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	385,3043	1	385,3043	2.595,4	0,50%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	765,5840	1	765,5840	1.306,2	0,99%
Scaricatore	Ground, Benign	234,2959	1	234,2959	4.268,1	0,30%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	742,1650	1	742,1650	1.347,4	0,96%
Contattore	Ground, Benign	3,3994	1	3,3994	294.166,1	0,00%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,4445	1	0,4445	2.249.582,7	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	4,2109	1	4,2109	237.476,8	0,01%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	742,4716	1	742,4716	1.346,9	0,96%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	742,4921	1	742,4921	1.346,8	0,96%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	259,3046	1	259,3046	3.856,5	0,34%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	259,1773	1	259,1773	3.858,4	0,34%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	259,0500	1	259,0500	3.860,3	0,33%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	258,9227	1	258,9227	3.862,2	0,33%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	258,6700	1	258,6700	3.865,9	0,33%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,1447	1	0,1447	6.912.453,8	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,1447	1	0,1447	6.912.453,8	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,1447	1	0,1447	6.912.453,8	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,1447	1	0,1447	6.912.453,8	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1.122,7288	18	20209,1180	49,5	26,12%
ITALO	Ground, Unsheltered	742,3163	18	13361,6926	74,8	17,27%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	740,7947	1	740,7947	1.349,9	0,96%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1.122,7626	1	1122,7626	890,7	1,45%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	2.004,5228	1	2004,5228	498,9	2,59%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	6,6748	1	6,6748	149.818,3	0,01%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	2.004,5228	2	4009,0456	249,4	5,18%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	1.504,4127	2	3008,8253	332,4	3,89%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	1.503,0331	3	4509,0994	221,8	5,83%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	1.504,5547	2	3009,1094	332,3	3,89%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	1.506,0762	2	3012,1524	332,0	3,89%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	910,3729	3	2731,1186	366,2	3,53%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	1.636,1311	9	14725,1799	67,9	19,03%
TOTALE				77366,2866		

MTBF(R_{Total})	12,93 Ore
Equivalenti a	0,02 Mesi

Tabella 18 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 130°C

Affidabilità del sistema a 140 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	603,2872	1	603,2872	1.657,6	0,45%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1.200,1998	1	1200,1998	833,2	0,89%
Scaricatore	Ground, Benign	604,0172	1	604,0172	1.655,6	0,45%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	1.364,9179	1	1364,9179	732,6	1,01%
Contattore	Ground, Benign	4,1970	1	4,1970	238.263,0	0,00%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,5322	1	0,5322	1.879.059,0	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	5,2848	1	5,2848	189.223,3	0,00%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	1.365,2834	1	1365,2834	732,4	1,01%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	1.365,3052	1	1365,3052	732,4	1,01%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	400,6273	1	400,6273	2.496,1	0,30%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	400,4927	1	400,4927	2.496,9	0,30%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	400,3581	1	400,3581	2.497,8	0,30%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	400,2235	1	400,2235	2.498,6	0,30%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	399,9563	1	399,9563	2.500,3	0,30%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,1591	1	0,1591	6.286.424,3	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,1591	1	0,1591	6.286.424,3	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,1591	1	0,1591	6.286.424,3	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,1591	1	0,1591	6.286.424,3	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1.962,1722	18	35319,0990	28,3	26,22%
ITALO	Ground, Unsheltered	1.365,0985	18	24571,7734	40,7	18,24%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	1.363,1564	1	1363,1564	733,6	1,01%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1.962,2079	1	1962,2079	509,6	1,46%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	3.311,8915	1	3311,8915	301,9	2,46%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	8,4736	1	8,4736	118.014,2	0,01%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	3.311,8915	2	6623,7831	151,0	4,92%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	2.560,8819	2	5121,7639	195,2	3,80%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	2.559,1107	3	7677,3322	130,3	5,70%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	2.561,0528	2	5122,1056	195,2	3,80%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	2.562,9949	2	5125,9898	195,1	3,81%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	2.382,3868	3	7147,1604	139,9	5,31%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	2.534,9711	9	22814,7398	43,8	16,94%
				TOTALE	134684,9148	

MTBF(R_{Total})	7,42 Ore
Equivalenti a	0,01 Mesi

Tabella 19 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 140°C

Affidabilità del sistema a 150 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	925,4053	1	925,4053	1.080,6	0,38%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1.842,8101	1	1842,8101	542,6	0,76%
Scaricatore	Ground, Benign	1.507,5096	1	1507,5096	663,3	0,62%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	2.627,3301	1	2627,3301	380,6	1,09%
Contattore	Ground, Benign	5,1355	1	5,1355	194.723,7	0,00%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,6321	1	0,6321	1.582.079,4	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	6,5668	1	6,5668	152.280,7	0,00%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	2.627,7628	1	2627,7628	380,6	1,09%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	2.627,7858	1	2627,7858	380,5	1,09%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	606,9437	1	606,9437	1.647,6	0,25%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	606,8018	1	606,8018	1.648,0	0,25%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	606,6598	1	606,6598	1.648,4	0,25%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	606,5179	1	606,5179	1.648,8	0,25%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	606,2361	1	606,2361	1.649,5	0,25%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,1742	1	0,1742	5.739.733,3	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,1742	1	0,1742	5.739.733,3	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,1742	1	0,1742	5.739.733,3	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,1742	1	0,1742	5.739.733,3	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	3.545,1425	18	63812,5655	15,7	26,36%
ITALO	Ground, Unsheltered	2.627,5442	18	47295,7956	21,1	19,54%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	2.625,0938	1	2625,0938	380,9	1,08%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	3.545,1803	1	3545,1803	282,1	1,46%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	5.572,1756	1	5572,1756	179,5	2,30%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	10,6399	1	10,6399	93.986,0	0,00%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	5.572,1756	2	11144,3511	89,7	4,60%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	4.464,8214	2	8929,6428	112,0	3,69%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	4.462,5748	3	13387,7243	74,7	5,53%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	4.465,0252	2	8930,0504	112,0	3,69%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	4.467,4756	2	8934,9512	111,9	3,69%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	5.988,0619	3	17964,1858	55,7	7,42%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	3.857,6216	9	34718,5940	28,8	14,34%
TOTALE				242075,8639		

MTBF(R_{Total})	4,13 Ore
Equivalenti a	0,01 Mesi

Tabella 20 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 150°C

Affidabilità del sistema a 160 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	1.392,4081	1	1392,4081	718,2	0,31%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	2.774,8768	1	2774,8768	360,4	0,62%
Scaricatore	Ground, Benign	3.629,9321	1	3629,9321	275,5	0,81%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	5.250,6227	1	5250,6227	190,5	1,17%
Contattore	Ground, Benign	6,2309	1	6,2309	160.489,4	0,00%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,7451	1	0,7451	1.342.044,1	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	8,0840	1	8,0840	123.700,8	0,00%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	5.251,1314	1	5251,1314	190,4	1,17%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	5.251,1555	1	5251,1555	190,4	1,17%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	902,6596	1	902,6596	1.107,8	0,20%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	902,5103	1	902,5103	1.108,0	0,20%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	902,3610	1	902,3610	1.108,2	0,20%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	902,2117	1	902,2117	1.108,4	0,20%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	901,9153	1	901,9153	1.108,8	0,20%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,1901	1	0,1901	5.260.057,1	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,1901	1	0,1901	5.260.057,1	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,1901	1	0,1901	5.260.057,1	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,1901	1	0,1901	5.260.057,1	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	6.633,5736	18	119404,3246	8,4	26,52%
ITALO	Ground, Unsheltered	5.250,8747	18	94515,7439	10,6	20,99%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	5.247,8159	1	5247,8159	190,6	1,17%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	6.633,6133	1	6633,6133	150,7	1,47%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	9.624,0334	1	9624,0334	103,9	2,14%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	13,2239	1	13,2239	75.620,9	0,00%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	9.624,0334	2	19248,0668	52,0	4,27%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	8.018,8887	2	16037,7775	62,4	3,56%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	8.016,0711	3	24048,2132	41,6	5,34%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	8.019,1299	2	16038,2597	62,4	3,56%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	8.022,1887	2	16044,3773	62,3	3,56%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	14.467,8372	3	43403,5117	23,0	9,64%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	5.768,8177	9	51919,3597	19,3	11,53%
TOTALE				450256,0452		

MTBF(R_{Total})	2,22 Ore
Equivalenti a	0,00 Mesi

Tabella 21 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 160°C

Affidabilità del sistema a 170 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	2.057,5152	1	2057,5152	486,0	0,24%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	4.102,7987	1	4102,7987	243,7	0,48%
Scaricatore	Ground, Benign	8.431,3230	1	8431,3230	118,6	0,98%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	10.740,3745	1	10740,3745	93,1	1,25%
Contattore	Ground, Benign	7,5003	1	7,5003	133.328,4	0,00%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,8722	1	0,8722	1.146.482,7	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	9,8647	1	9,8647	101.371,7	0,00%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	10.740,9685	1	10740,9685	93,1	1,25%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	10.740,9938	1	10740,9938	93,1	1,25%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	1.319,3130	1	1319,3130	758,0	0,15%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	1.319,1563	1	1319,1563	758,1	0,15%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	1.318,9996	1	1318,9996	758,2	0,15%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	1.318,8429	1	1318,8429	758,2	0,15%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	1.318,5318	1	1318,5318	758,4	0,15%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,2067	1	0,2067	4.837.298,4	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,2067	1	0,2067	4.837.298,4	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,2067	1	0,2067	4.837.298,4	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,2067	1	0,2067	4.837.298,4	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	12.786,2243	18	230152,0375	4,3	26,68%
ITALO	Ground, Unsheltered	10.740,6690	18	193332,0424	5,2	22,41%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	10.736,8889	1	10736,8889	93,1	1,24%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	12.786,2660	1	12786,2660	78,2	1,48%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	17.124,8912	1	17124,8912	58,4	1,99%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	16,2786	1	16,2786	61.430,4	0,00%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	17.124,8912	2	34249,7825	29,2	3,97%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	14.835,0351	2	29670,0702	33,7	3,44%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	14.831,5381	3	44494,6143	22,5	5,16%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	14.835,3183	2	29670,6365	33,7	3,44%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	14.839,0984	2	29678,1969	33,7	3,44%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	33.661,6592	3	100984,9777	9,9	11,71%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	8.483,5057	9	76351,5515	13,1	8,85%
TOTALE				862676,2352		

MTBF(R_{Total})	1,16 Ore
Equivalenti a	0,00 Mesi

Tabella 22 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 170°C

Affidabilità del sistema a 180 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	2.989,1419	1	2989,1419	334,5	0,18%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	5.963,3652	1	5963,3652	167,7	0,35%
Scaricatore	Ground, Benign	18.912,8947	1	18912,8947	52,9	1,12%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	22.154,5385	1	22154,5385	45,1	1,31%
Contattore	Ground, Benign	8,9609	1	8,9609	111.595,7	0,00%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	1,0143	1	1,0143	985.945,3	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	11,9385	1	11,9385	83.762,9	0,00%
Interruttore Linea Telecamere	Ground, Benign	22.155,2278	1	22155,2278	45,1	1,31%
Interruttore Linea colonnina carica auto	Ground, Benign	22.155,2543	1	22155,2543	45,1	1,31%
Interruttore Sensore 1	Ground, Benign	1.897,0490	1	1897,0490	527,1	0,11%
Interruttore Sensore 2	Ground, Benign	1.896,8849	1	1896,8849	527,2	0,11%
Interruttore Sensore 3	Ground, Benign	1.896,7208	1	1896,7208	527,2	0,11%
Interruttore Sensore 4	Ground, Benign	1.896,5567	1	1896,5567	527,3	0,11%
Interruttore Linea Telecontrollo	Ground, Benign	1.896,2308	1	1896,2308	527,4	0,11%
Interruttore Riserva 1	Ground, Benign	0,2241	1	0,2241	4.463.132,2	0,00%
Interruttore Riserva 2	Ground, Benign	0,2241	1	0,2241	4.463.132,2	0,00%
Interruttore Riserva 3	Ground, Benign	0,2241	1	0,2241	4.463.132,2	0,00%
Interruttore Riserva 4	Ground, Benign	0,2241	1	0,2241	4.463.132,2	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	25.129,4221	18	452329,5970	2,2	26,82%
ITALO	Ground, Unsheltered	22.154,8806	18	398787,8501	2,5	23,65%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	22.150,2524	1	22150,2524	45,1	1,31%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	25.129,4657	1	25129,4657	39,8	1,49%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	31.326,1358	1	31326,1358	31,9	1,86%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	19,8599	1	19,8599	50.352,8	0,00%

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	31.326,1358	2	62652,2716	16,0	3,72%
P5-PM10	Ground, Unsheltered	28.107,9751	2	56215,9503	17,8	3,33%
P5-NOISE	Ground, Unsheltered	28.103,6771	3	84311,0312	11,9	5,00%
P5-NO2	Ground, Unsheltered	28.108,3053	2	56216,6105	17,8	3,33%
P5-CO2	Ground, Unsheltered	28.112,9335	2	56225,8669	17,8	3,33%
Outdoor Access Point	Ground, Benign	75.574,1589	3	226722,4768	4,4	13,44%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	12.277,7877	9	110500,0893	9,0	6,55%
TOTALE				1686424,2516		

MTBF(R_{Total})	0,59 Ore
Equivalenti a	0,00 Mesi

Tabella 23 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” alla temperatura di 180°C

2.2.15 Grafico riassuntivo

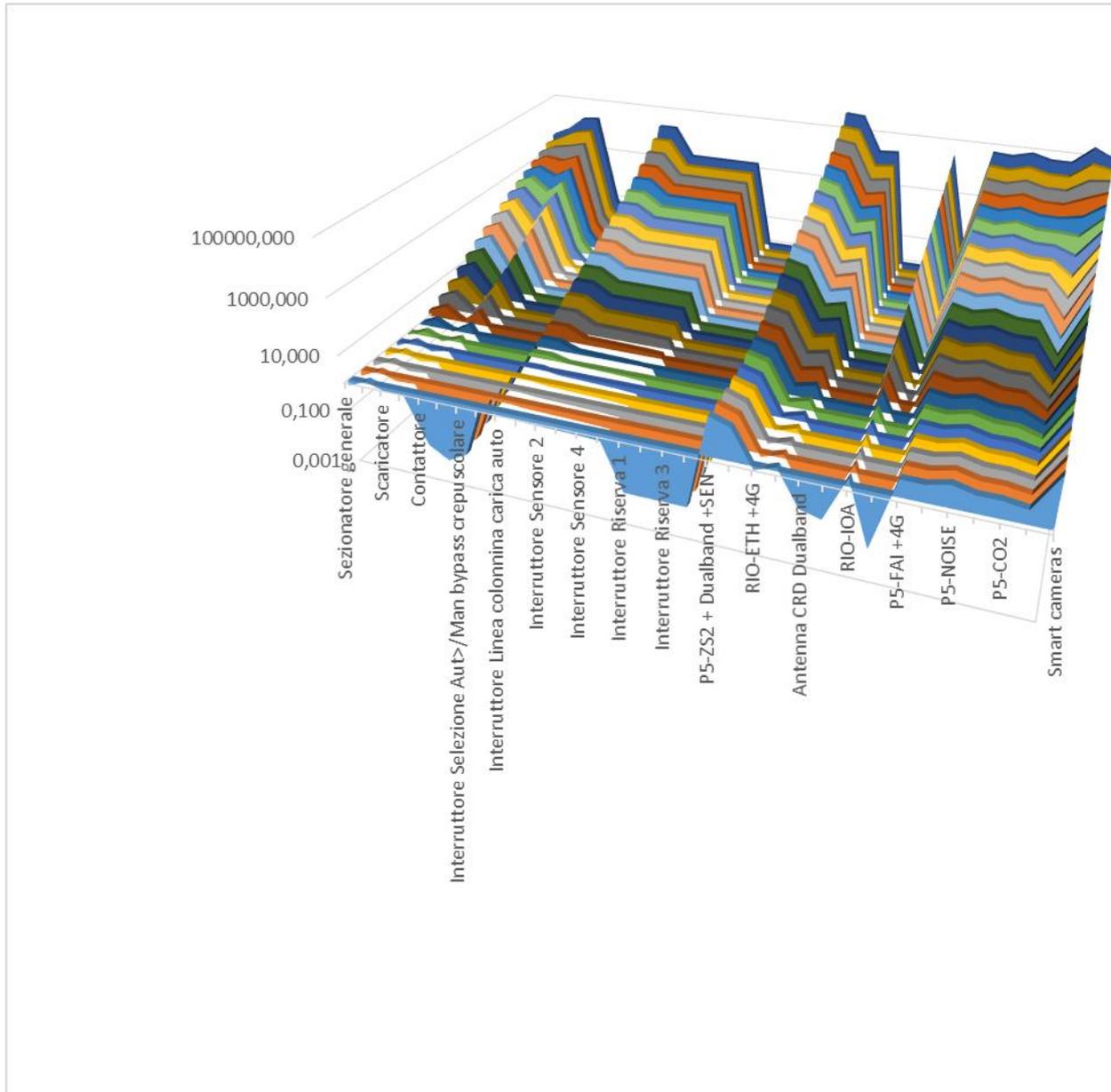


Tabella 24 – Figura di affidabilità dei vari componenti del sistema “Smart Road” a tutti gli intervalli di temperatura

Dalla Tabella grafica 24 si evincono alcune conclusioni: innanzitutto non tutti i sottosistemi derivano in temperatura allo stesso modo ovvero alcuni tendono a divergere in modo lineare (es. interruttori), altri invece in modo esponenziale (telecamera); questo è dovuto dalla predominanza alla sensibilità dei componenti che più si degradano con la temperatura in quanto associata a fenomeno fisico di ammaloramento.

Inoltre si evince ancora che maggiore è la complessità del sottosistema e più forte sarà l’“amplificazione” dell’effetto della temperatura sull’affidabilità ovvero una rete semplice di componenti sarà più sensibile alla degradazione in temperatura di un unico componente seppur complesso (per esempio un FPGA o un processore).

2.3 Analisi markoviana

Entriamo nella definizione di un processo di Markov, esaminando un esempio:

Esempio 1: si supponga di studiare l'utilizzo dell'autobus in una città. Dopo aver esaminato una certa mole di dati, è stato riscontrato che il 30% delle persone che viaggiano regolarmente sugli autobus in un dato anno non lo fanno regolarmente l'anno successivo.

Inoltre, è stato riscontrato che il 20% delle persone che non usano regolarmente l'autobus in quell'anno, iniziano a usare l'autobus regolarmente l'anno successivo. Se 5.000 persone prendono l'autobus e 10.000 non lo usano in un dato anno, qual è la distribuzione dei passeggeri/non passeggeri nell'anno successivo? In 2 anni? In n anni?

Per prima cosa determineremo quante persone prenderanno l'autobus l'anno prossimo. Delle persone che attualmente utilizzano l'autobus, il 70% continuerà a farlo. Delle persone che non prendono l'autobus, il 20% di loro inizierà a prendere l'autobus. Così possiamo scrivere:

$$5000(0.7) + 10000(0.2) = n^{\circ} \text{ di persone che prenderanno il bus l'anno prossimo} = b_1$$

Quindi possiamo vedere che

$$5000(0.3) + 10000(0.8) = n^{\circ} \text{ di persone che NON prenderanno il bus l'anno prossimo} = b_2$$

Questo sistema di equazioni è equivalente all'equazione matriciale:

$$Mx = b$$

dove

$$M = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 \\ 0.3 & 0.8 \end{bmatrix}$$

e

$$x = \begin{bmatrix} 5000 \\ 10000 \end{bmatrix}$$

con

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5500 \\ 9500 \end{bmatrix}$$

Per calcolare il risultato dopo 2 anni, usiamo semplicemente la stessa matrice M , tuttavia usando b al posto di x .

Quindi la distribuzione dopo 2 anni è:

$$Mb = M^2x$$

Estrapolando, dopo n anni, la distribuzione sarà data da

$$M^n x$$

L'esempio precedente è un esempio di un processo markoviano.

Ora alcune definizioni formali:

Definizione 1: Un processo stocastico è una sequenza di eventi in cui il risultato in qualsiasi fase dipende da alcune probabilità.

Definizione 2. Un processo markoviano è un processo stocastico con le seguenti proprietà:

- a. Il numero di possibili risultati o stati è finito.
- b. Il risultato in qualsiasi stato dipende solo dall'esito dello stato precedente.
- c. Le probabilità sono costanti nel tempo.

Se x_0 è un vettore che rappresenta lo stato iniziale di un sistema, allora esiste una matrice M tale che lo stato del sistema dopo un'iterazione è dato dal vettore Mx_0 .

Quindi otteniamo una catena di vettori di stato: $x_0, Mx_0, M^2x_0 \dots$ dove lo stato del sistema dopo n iterazioni è dato da $M^n x_0$.

Tale catena è chiamata catena di Markov e la matrice M è chiamata matrice di transizione.

I vettori di stato possono essere di due tipi: vettori assoluti e vettori di probabilità. Un vettore assoluto è un vettore le cui voci danno il numero effettivo di oggetti in uno stato dato, come nel primo esempio.

Un vettore di probabilità è un vettore in cui le voci danno la percentuale (o probabilità) di oggetti in un dato stato. Considereremo tutti i nostri vettori di stato come vettori di probabilità d'ora in poi. Nota che le voci di un vettore di probabilità si incrementano di 1.

Teorema 3. Sia M la matrice di transizione di un processo di Markov tale che M^k abbia solo elementi positivi per qualsiasi k . Allora esiste un unico vettore di probabilità x_s tale che $Mx_s = x_s$.

Inoltre:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} M^k x_0 = x_s$$

Questo per qualsiasi vettore di probabilità di stato iniziale x_0 .

Il vettore x_s è chiamato vettore di stato stazionario.

2.3.1 La matrice di transizione e il suo vettore di stato stazionario

La matrice di transizione di un processo di Markov a n stati è una matrice M $n \times n$ dove l'input i, j di M rappresenta la probabilità che un oggetto sia stato j transiti nello stato i , cioè se $M = (m_{ij})$ e gli stati sono

$$S_1, S_2, \dots, S_n$$

allora m_{ij} è la probabilità che un oggetto nello stato S_j passi allo stato S_i . Ciò che resta è determinare il vettore di stato stazionario.

Si noti che abbiamo la catena di equivalenze:

$$Mx_s = x_s \Leftrightarrow Mx_s - x_s = 0 \Leftrightarrow Mx_s - Ix_s = 0 \Leftrightarrow (M - I)x_s = 0 \Leftrightarrow x_s \in N(M - I)$$

Quindi x_s è un vettore nello spazio nullo di $M - I$.

Se M^k ha tutti gli elementi positivi per qualsiasi k , allora:

$$\dim [N(M - I)]$$

e qualsiasi vettore in $N(M - I)$ è solo un multiplo scalare di x_s .

In particolare, se:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

è un qualsiasi vettore diverso da zero in $N(M - I)$, allora:

$$x_s = \frac{1}{c} x \quad \text{dove: } c = x_1 + x_2 + \dots + x_n$$

2.3.2 Strategia di costruzione di un albero markoviano

In questa sezione viene presentata una strategia per la costruzione di un modello dell'albero dei guasti del sistema e la sua affidabilità viene calcolata da questo modello.

Nella sezione precedente i guasti dei componenti del sistema sono classificati in gruppi in base ai suoi componenti principali. Questa sottosezione spiega la costruzione dell'albero dei guasti per i sottosistemi di due sistemi. L'albero è costruito in cinque passaggi come segue:

- a) Determinare il livello di occorrenza del guasto (componente, sottosistema e funzione). In questa analisi vengono considerati i guasti di soli 3 livelli; componente, sottosistema e livello di funzione principale.
- b) Determinare il contributo di ciascun guasto dei componenti nei suoi guasti di livello superiore, quindi utilizzare la porta appropriata (AND e OR) per costruire l'analisi o l'albero dei guasti del sistema principale. Dalla teoria della probabilità, la probabilità di output delle porte AND e OR viene calcolata rispettivamente con le seguenti (dove "i" indica l'input i-esimo della porta):

$$P_{AND} = \prod_{i=1}^n P_i$$

$$P_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$$

- c) Considerare ogni albero dei guasti del sottosistema/funzione come un modulo dell'albero dei guasti principale.
- d) Trovare la probabilità di guasto di ciascun componente (fatto nella sezione precedente).
- e) Costruire l'albero dei guasti principale e valutare l'affidabilità del sistema tramite uno strumento disponibile.

2.3.3 Caso E01 – Illuminazione insufficiente

Illustriamo il primo caso: abbiamo stabilito come occorrenza di guasto grave che lo spegnimento di un solo lampione non incida il flusso luminoso in modo tale da renderlo insufficiente. Invece lo è lo spegnimento di due lampioni, anche non consecutivi (quindi di posizionamento completamente casuale) della linea: in questo caso abbiamo un'insufficiente illuminazione che noi associamo concettualmente a un guasto grave.

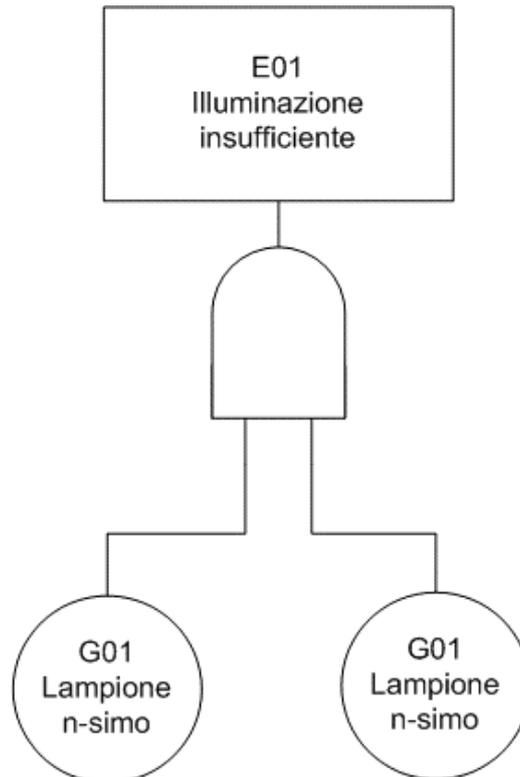


Figura 8 – Caso E01

In accordo a quanto scritto precedentemente, nel nostro caso quindi per la probabilità possiamo scrivere:

$$P_{E01} = \prod_{i=1}^n P_i = e^{-\lambda_{G01}} \cdot e^{-\lambda_{G01}}$$

2.3.4 Caso E02 – impossibilità di gestire il flusso dati

In questo secondo caso abbiamo la gestione dei dati che, nella loro interezza è compromessa dalla mancanza di uno solo dei sottosistemi indicati. Questo non significa certamente che ciò che è a monte del *failure* critico non funzioni correttamente (trasduttori, sensori, ecc.) significa solo che il dato non può giungere a buon fine.

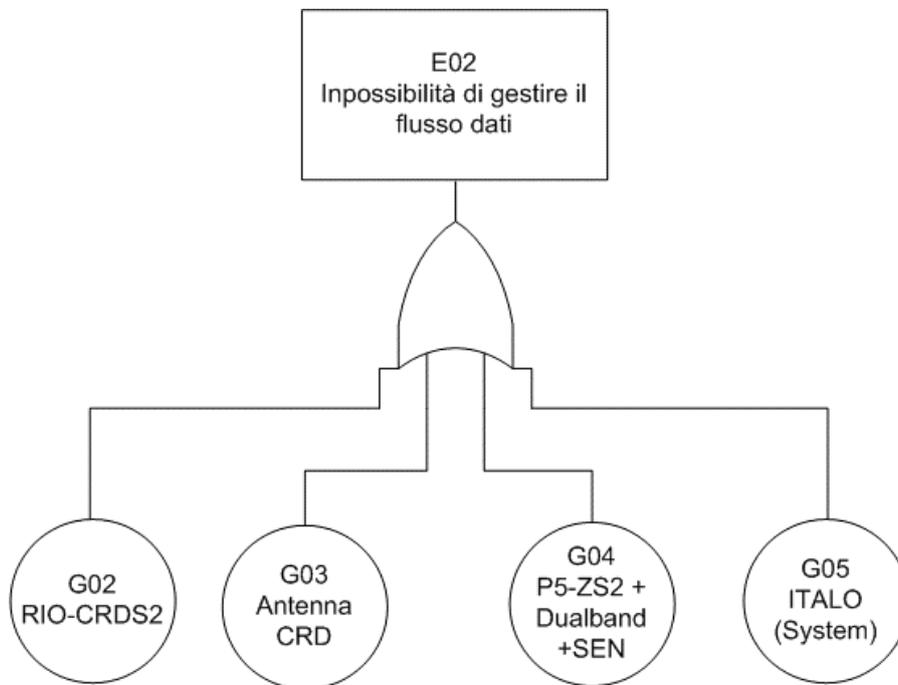


Figura 9 – E02 – impossibilità di gestire il flusso dati

In accordo a quanto scritto precedentemente, nel nostro caso quindi possiamo scrivere ancora:

$$P_{E02} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) = 1 - (1 - e^{-\lambda_{G02}}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{G03}}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{G04}}) \cdot (1 - e^{-\lambda_{G05}}) \cdot$$

2.3.5 Caso E03 – Dati “enviromentali” insufficienti

In questo caso vengono a mancare i dati “enviromentali” ovvero i dati parametrici dello stato dell’aria della smart street che viene monitorata.

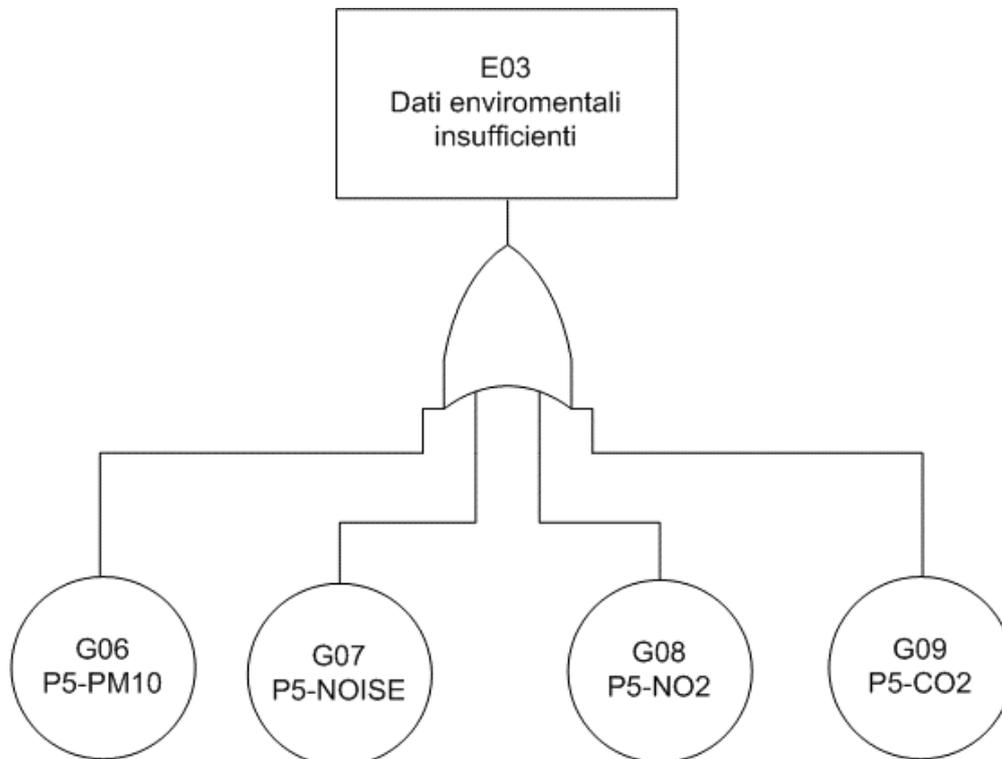


Figura 10 – E03 - Dati “enviromentali” insufficienti

2.3.6 Caso E04 – Copertura video insufficiente

Nel caso in esame, per definire insufficiente la copertura video dell'area è necessario che vengano a mancare almeno tre telecamere: non è importante la posizione o la collocazione.

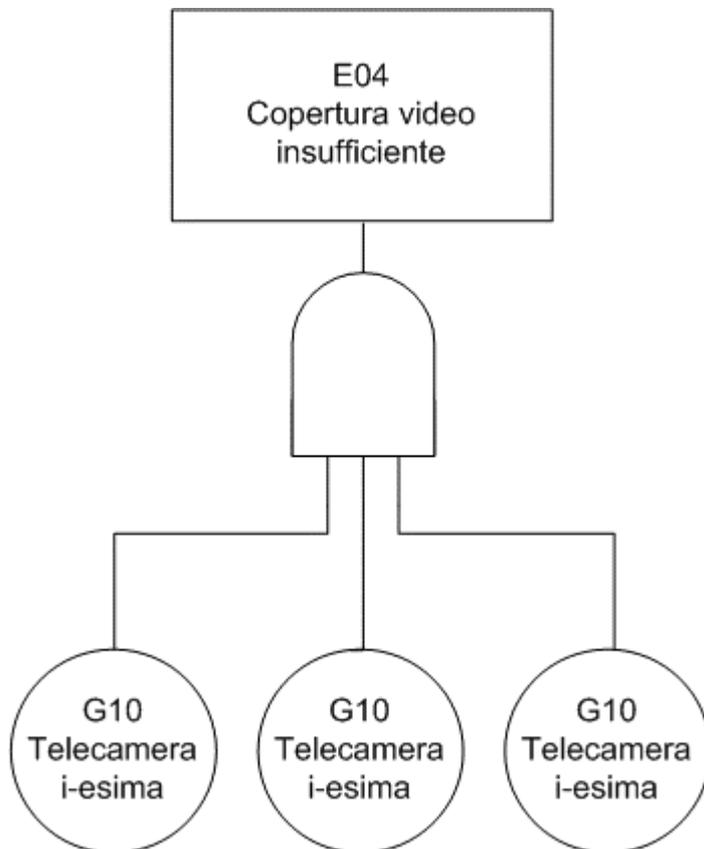


Figura 11 –E04 - Copertura video insufficiente

2.3.7 Caso E05 – mancanza di alimentazione

Per ultimo ma non per importanza, la mancanza di alimentazione al sistema dovuta ai tre colli di bottiglia non ridondati del sistema.

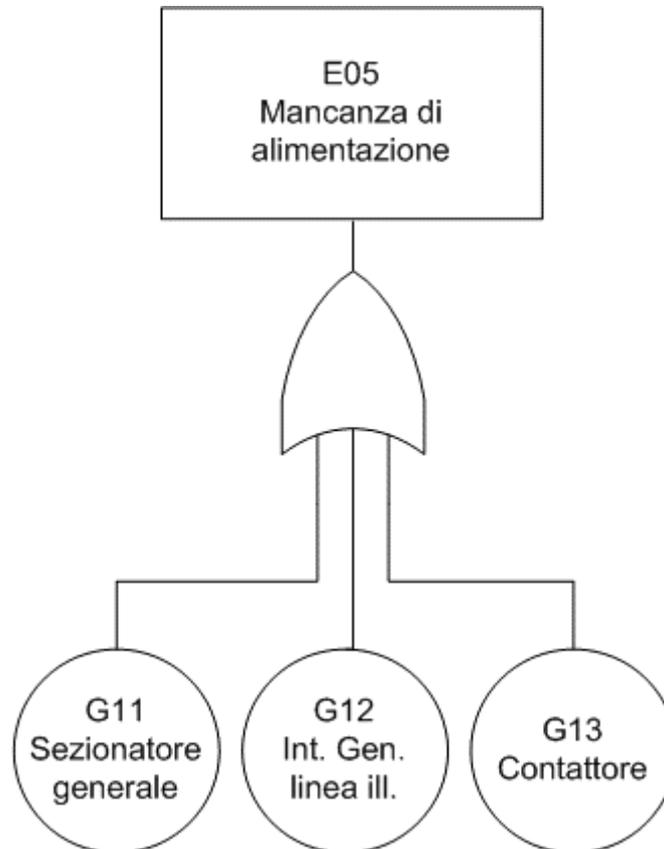


Figura 12 – E05 - mancanza di alimentazione

2.3.8 Tabella riassuntiva

Nella tabella riassuntiva qui sotto riportiamo il risultato dell'analisi markoviana di 5 casi importanti: nella prima colonna abbiamo la numerazione dell'evento basico, nella seconda colonna il tipo di effetto e nella terza l'occorrenza di guasto (*failure rate*)

Evento basico	Tipo di effetto	Failure Rate
E01	Livello di illuminazione insufficiente	2,2603E-06
E02	Impossibilità di gestire il flusso dati	9,1351E-01
E03	Dati enviromentali insufficienti	1,3124E-02
E04	Copertura video insufficiente	3,5011E-18
E05	Perdita di alimentazione generale della linea	3,2079E-01

3 Prove di laboratorio e ritorni dal campo

3.1 Ritorni dal campo

In questo terzo anno, l'ENEA si è occupata di realizzare l'infrastruttura smart road a supporto e interazione di un veicolo a guida autonoma.

Le nuove tecnologie già assistono i conducenti in molti compiti e rappresentano un comodo ausilio per la sicurezza ed il comfort di guida, ma l'obiettivo è quello della sostituzione del guidatore attraverso l'uso di questo tipo di infrastrutture in grado di interpretare le informazioni provenienti dall'ambiente interno (veicolo) e dall'ambiente esterno (strada e traffico) e quindi capaci di sostituire il guidatore nel compito di reazione e controllo.

3.1.1 Illuminazione

La smart road realizzata nel centro ricerche ENEA-Casaccia fa uso dei pali di sostegno già esistenti della illuminazione pubblica con notevole vantaggio dal punto di vista dei costi e della logistica.



Figura 13 – Particolare della smart road

Su ogni palo di sostegno è stato installato un nuovo corpo illuminante con tecnologia led della **AEG** connesso al dispositivo P5 per la connessione wireless su frequenza 868 MHz.

Tutti i corpi illuminanti comprensivi di dispositivo P5 sono collegati tra di loro e con il concentratore MC22 formando una rete mesh. Il concentratore a sua volta è connesso alla LAN o alla rete GPRS



Figura 14 – Arrangiamento trasmettitori-ricevitori

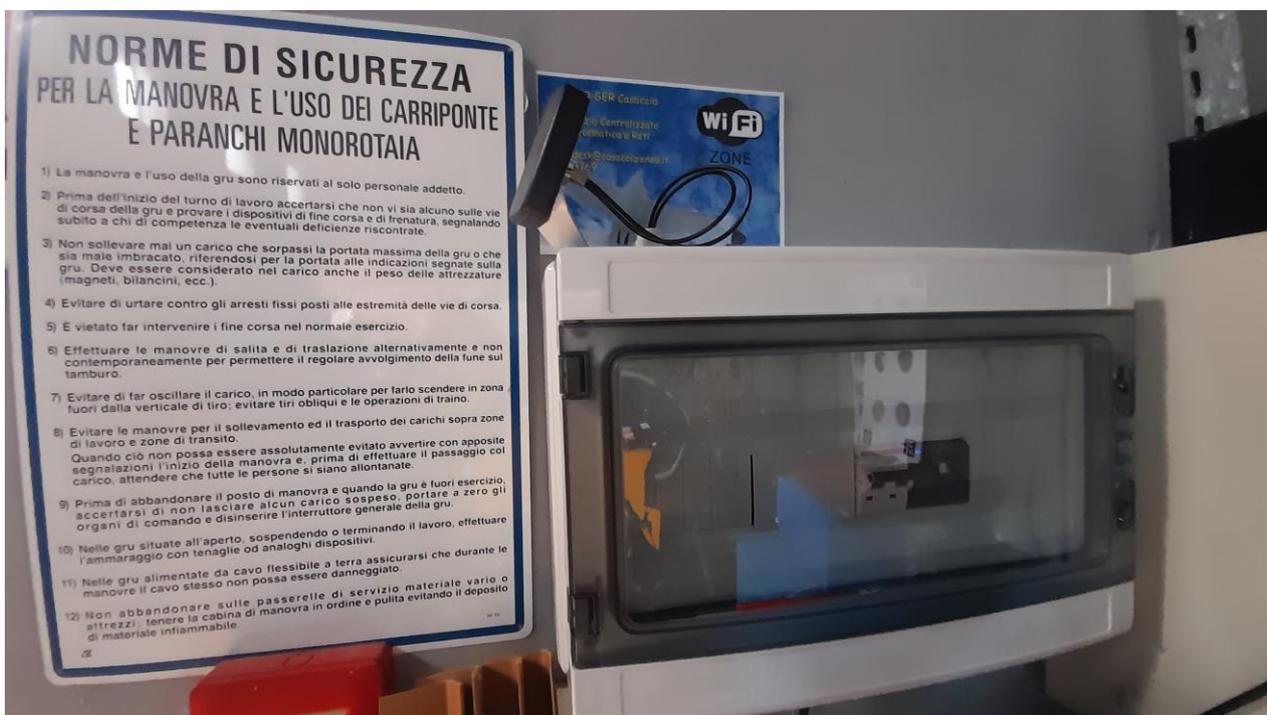


Figura 15 -Quadro elettrico concentratore e antenna

3.1.2 Sistema telecamera TAI-FAI conteggio flusso veicoli.

Nel sistema è stata installata una telecamera che rileva sia il passaggio dei veicoli che le condizioni meteo. La telecamera elabora questi parametri e in uscita fornisce un parametro per la dimmerazione dei corpi illuminanti.

La geometria dell'istallazione prevede che la telecamera TAI-FAI possa inquadrare un'area fra 2 lampioni consecutivi alla distanza di 60 m.

Nella seguente figura è schematizzata un'istallazione con vista dall'alto. La telecamera è stata montata in modo orizzontale poiché il sensore interno è volutamente montato inclinato di un angolo noto.

Oggetto del nostro intervento è stato proprio capire quanto la telecamera potesse essere inclinata rispetto all'area di interesse che ovviamente deve essere all'interno del campo visivo inquadrato dalla telecamera. Nel paragrafo è spiegato come selezionare tale area di interesse.

La normativa vigente prevede il montaggio della telecamera TAI-FAI a 5,5 m dal piano.

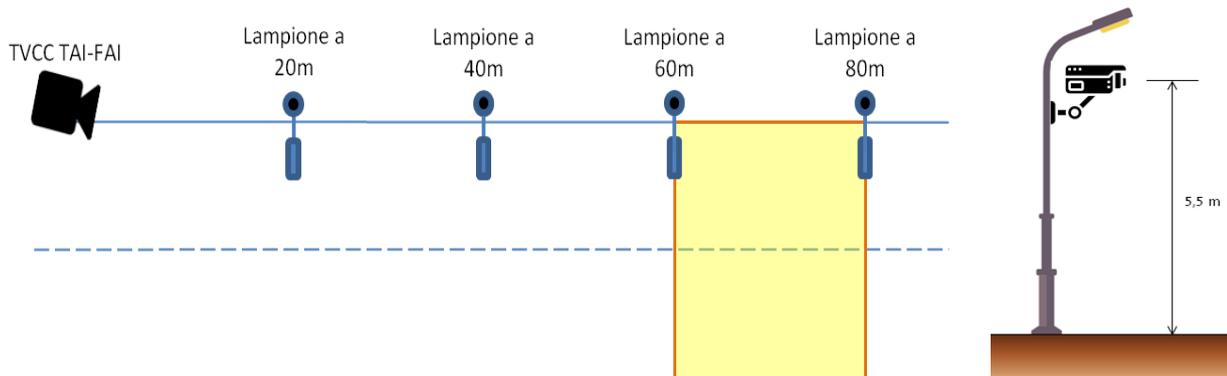


Figura 16 – Schema arrangiamento telecamere

Uno dei parametri essenziali negli algoritmi TAI-FAI è la luminanza; per individuare correttamente questo parametro, è necessario configurare l'area di interesse all'interno della quale la telecamera effettuerà la misurazione di luminanza. Il programma UtilRoadLighting in dotazione ci consente di configurare tale impostazione.

Per ottenere una giusta inquadratura è necessario agire direttamente sul posizionamento della telecamera e, per motivi tecnico/pratici (salire sulla scala, scambio di attrezzi, rispetto norme di sicurezza e di buon senso, posizionamento dei target), tale operazione richiede almeno due operatori, anche se le azioni risultano più agevoli lavorando in tre. In accordo con l'esperienza misuristica che riassume in sé i concetti di taratura e calibrazione, nei limiti consentiti dalle regole pandemiche, abbiamo offerto la nostra collaborazione ai colleghi ENEA per cercare di trovare il miglior set-up sperimentale legato al posizionamento relativo telecamera-area di interesse. È ovvio che, per trovare questo set up, ci sono regole generali sempre valide suggerite dal costruttore, ma che devono essere necessariamente calate nel caso specifico sotto indagine e che quindi richiedono adeguate particolarizzazioni.

Abbiamo dunque collaborato sia agli aspetti logistico-meccanici sia alla valutazione del conteggio flusso veicolare, mirando a determinare quale fossero l'orientamento ed il brandeggio della telecamera che potessero, rispetto ad un target fisso, restituire un conteggio di vetture transittanti quanto più corretto possibile. La prima parte ha riguardato i meri aspetti tecnici legati al posizionamento della telecamera rispetto al target che si sono concretizzati nel fornire tutto il supporto necessario per raggiungere fisicamente la telecamera ed agire sulle possibilità offerte dalla stessa al fine di modificarne sia l'angolo rispetto alla verticale del palo (azimuth), sia l'angolo rispetto al piano stradale (alzo). Il riscontro sulla giustezza del posizionamento veniva riscontrata sperimentalmente verificando direttamente il flusso video proposto dal sistema sullo schermo del computer dove il programma di gestione della telecamera era in uso.

Mentre sull'angolo di azimuth la taratura è stata abbastanza intuitiva avendo come specifica quella di inquadrare l'incrocio a fondo strada delimitata dai bordi della carreggiata, la determinazione dell'angolo di alzo ha richiesto un po' più di attenzione e ha previsto un processo iterativo nel quale, ad ogni posizionamento della telecamera ottenuta variando l'angolo, si valutava l'inquadramento dell'incrocio al passaggio di un target (automobile).

Un angolo di alzo troppo elevato o troppo basso avrebbe potuto comportare un'area di interesse non funzionale al conteggio efficiente delle automobili. Il processo iterativo è stato di tipo sperimentale inquadrando un target (automobile) posizionato in corrispondenza dell'incrocio a cui ha fatto seguito, come vedremo a valle, la determinazione, tramite settaggi software (vedi figura sotto), della zona di valutazione rilevamento veicoli.

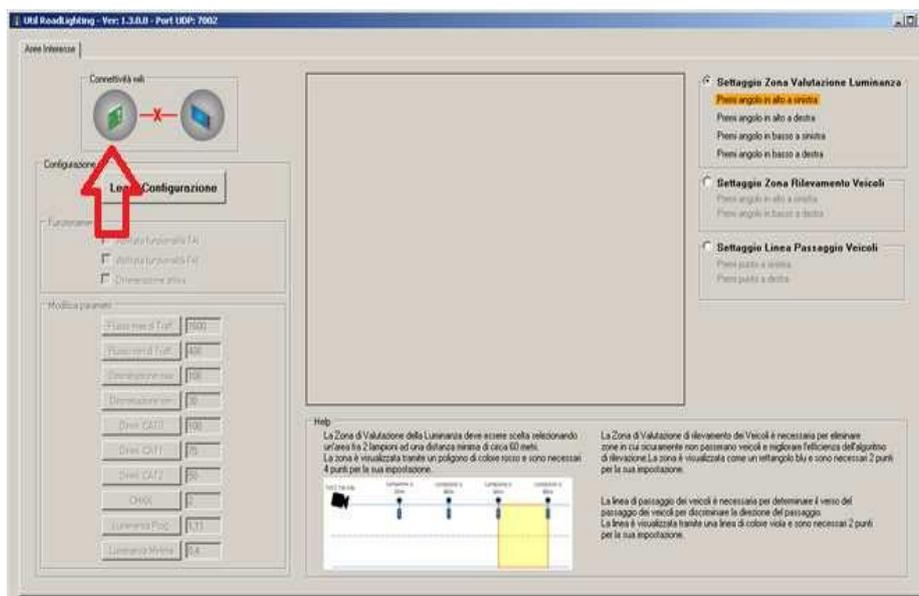


Figura 17 – Particolare del programma di settaggio inquadratura

Nel dettaglio il nostro intervento ha contribuito alla determinazione della zona di valutazione della luminanza, della zona di valutazione del rilevamento veicoli e della linea passaggio veicoli.

- Zona di valutazione della Luminanza

La zona di valutazione della luminanza è stata scelta selezionando un'area fra 2 lampioni ad una distanza minima di circa 60 metri. La zona è visualizzata tramite un poligono di colore rosso e sono stati necessari 4 punti per la sua impostazione.

I vari punti vengono specificati con il tasto sinistro del mouse direttamente sull'immagine. Ad esempio nella figura 18 sopra è descritta la situazione in cui l'utente ha già specificato i primi 2 punti del poligono ed il programma è in attesa del 3° punto corrispondente all'angolo in basso a sinistra. Perché i punti del poligono vengano salvati è necessario impostarli tutti e 4.

- Zona di valutazione rilevamento veicoli

La zona di valutazione di rilevamento dei veicoli è necessaria per eliminare le zone in cui sicuramente non passeranno veicoli migliorando quindi l'efficienza dell'algoritmo di rilevazione.

La zona è visualizzata come un rettangolo blu e sono necessari 2 punti per la sua impostazione.

Ad esempio, nella figura 18 è descritta la situazione in cui l'utente deve specificare il primo punto del rettangolo che corrisponde all'angolo in alto a sinistra. Perché i punti del rettangolo vengano salvati è necessario impostarli tutti e 2.

- Linea passaggio veicoli

La linea di passaggio dei veicoli è necessaria per determinare il verso del passaggio dei veicoli per discriminare la direzione del passaggio. La linea è visualizzata tramite una linea di colore viola e sono necessari 2 punti per la sua impostazione. Ad esempio, nella figura 18 è descritta la situazione in cui l'utente deve specificare il primo punto della linea che corrisponde al punto più a sinistra. Perché i punti della linea vengano salvati è necessario impostarli tutti e 2.

Come si intuisce dalle figure soprastanti, mentre risulta abbastanza facile la determinazione sia della zona di valutazione della Luminanza che della linea di passaggio, meno agevole è stata la determinazione della zona di valutazione della zona di rilevamento veicoli soprattutto in uno scenario non banale. Lo scenario più semplice intatti, che prevedeva il passaggio di una sola auto in corrispondenza dell'incrocio, non ha comportato un grande impegno.

Al contrario, in uno scenario più articolato con due macchine poste una appresso all'altra, la determinazione esatta della quantità di auto si è dimostrata più difficoltosa. Il nostro maggior contributo è stato proprio rivolto a trovare sperimentalmente quale fosse l'angolo di alzo della telecamera che insieme all'area individuata dal rettangolo blu, ci desse il maggior potere discriminatorio rispetto al passaggio di due auto in fila, cioè consentisse al sistema di distinguere due auto una appresso all'altra senza confonderle.

Usando due auto in nostro possesso (una Mercedes Classe A ed una Fiat Panda) abbiamo potuto verificare che il massimo potere discriminatorio si ha quando l'angolo di alzo è pari a -5° rispetto al piano stradale, riscontrando che le due auto venivano distinte dal sistema se distanti l'una dall'altra almeno 2 metri. Le prove sono state effettuate variando l'angolo di circa 5° con cinque passi successivi da -20° a $+5^\circ$. In tutti gli altri casi il sistema riusciva a distinguere le auto solo se maggiormente distanti. Sebbene l'analisi sia stata condotta solo su un campione limitato di auto, la generalità del metodo è comunque fatta salva anche se è ragionevole attendersi numeri leggermente diversi a seconda della carrozzeria delle auto sotto indagine.

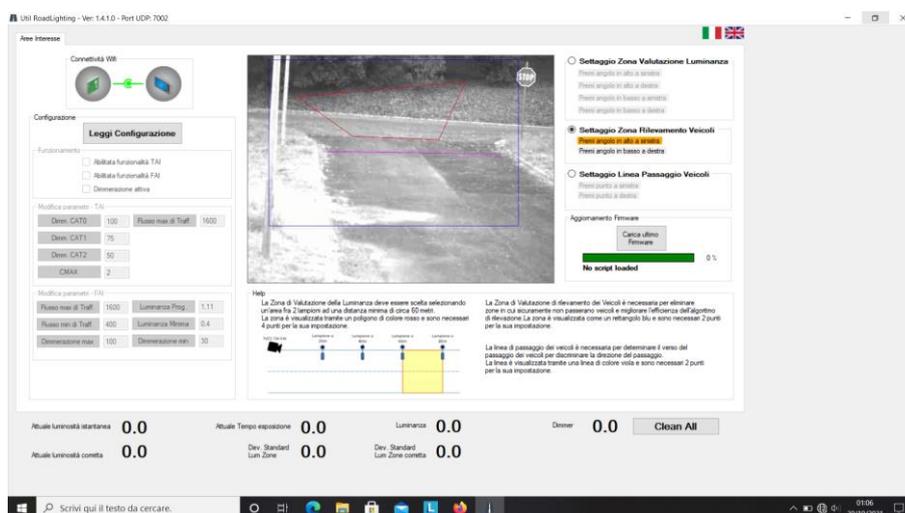


Figura 18 – Posizionamento dei target rilevazione veicoli

3.1.3 Sezione fotografica



Figura 18 – vista esterna di parte della “Smart Road” installata presso il CR ENEA La Casaccia.



Figura 19 – vista esterna di telecamera e sensori installata presso il CR ENEA La Casaccia.

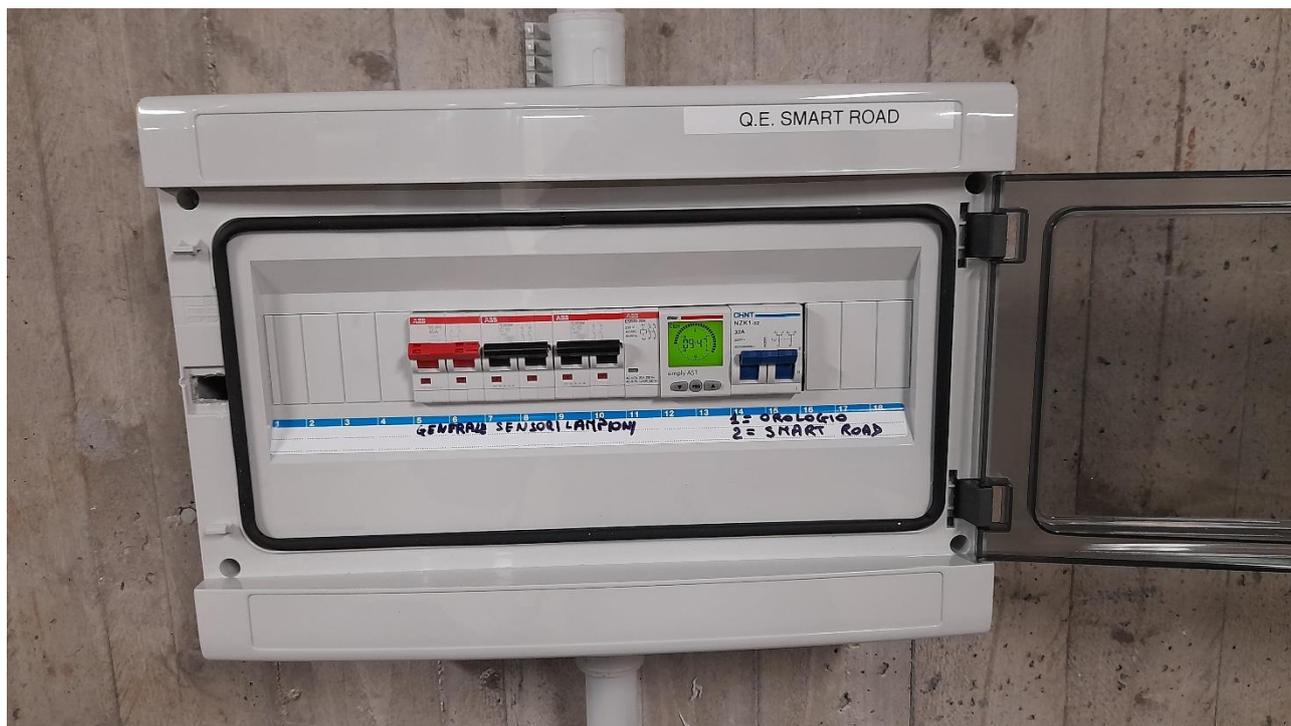


Figura 20 – Quadro elettrico di controllo installata presso il CR ENEA Casaccia.

3.2 Prove di laboratorio

Abbiamo deciso di tenere all'interno del laboratorio di Misure (in via della Vasca Navale) tutte le misurazioni necessarie atte a caratterizzare i componenti per stabilirne la vita utile complessiva.

Nella analisi della difettosità del componente siamo stati in grado di definire il percorso di Failure Analysis, di effettuare l'analisi delle condizioni di stress della componentistica imposte dal design, di misurare e di effettuare la caratterizzazione elettrica a regime e durante i transitori.

Inoltre abbiamo effettuato la failure Analysis di componenti attivi e passivi, abbiamo effettuato la mappatura su componenti in camera termica, e definito le possibili soluzioni.

Di seguito la tabella con la strumentazione utilizzata:

Descrizione	Tipo
Agilent E4348A	Analizzatore di spettro
Agilent E5257D	Generatore di segnale
Lecroy 7200A	Oscilloscopio
HP34419A	Multimetro
Zeiss HY558	Microscopio

Elenco strumentazione

Di seguito la tabelle con l'affidabilità alle varie temperature:

Affidabilità del sistema ridotto sperimentale a -40 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,5957	1	0,5957	1.678.648,8	1,42%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,1806	1	1,1806	847.039,3	2,82%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	0,7503	1	0,7503	1.332.805,7	1,79%
Contattore	Ground, Benign	0,0136	1	0,0136	73.292.871,4	0,03%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0048	1	0,0048	209.536.452,9	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0119	1	0,0119	83.987.376,1	0,03%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1,3362	4	5,3450	187.091,1	12,75%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	0,7514	1	0,7514	1.330.782,2	1,79%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1,3425	1	1,3425	744.851,7	3,20%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,17%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,11%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	1,9639	1	1,9639	509.197,7	4,68%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,0099	1	0,0099	101.071.312,3	0,02%
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	1,9639	2	3,9277	254.598,9	9,37%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	6,4799	4	25,9197	38.580,6	61,81%
TOTALE				41,9367		

MTBF (R_{Total})	23.845,49 Ore
Equivalenti a	33,12 Mesi

Tabella 26 – Figura di affidabilità del sistema ridotto alla temperatura di -40 °C

Affidabilità del sistema ridotto sperimentale a -20 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,6159	1	0,6159	1.623.630,7	1,36%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,2070	1	1,2070	828.525,1	2,66%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	0,8118	1	0,8118	1.231.847,4	1,79%
Contattore	Ground, Benign	0,0316	1	0,0316	31.689.567,7	0,07%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0089	1	0,0089	112.064.919,2	0,02%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0277	1	0,0277	36.059.226,7	0,06%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1,4059	4	5,6237	177.818,9	12,38%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	0,8116	1	0,8116	1.232.108,6	1,79%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1,4146	1	1,4146	706.933,6	3,11%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,16%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,10%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	2,0707	1	2,0707	482.934,0	4,56%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,0269	1	0,0269	37.235.994,7	0,06%
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	2,0707	2	4,1414	241.467,0	9,12%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	7,1279	4	28,5118	35.073,2	62,77%

TOTALE **45,4229**

MTBF (R_{Total})	22.015,31 Ore
Equivalenti a	30,58 Mesi

Tabella 27 – Figura di affidabilità del sistema ridotto alla temperatura di -20 °C

Affidabilità del sistema ridotto sperimentale a 0 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	0,6992	1	0,6992	1.430.295,0	1,27%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	1,3382	1	1,3382	747.276,5	2,43%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	1,0820	1	1,0820	924.207,7	1,97%
Contattore	Ground, Benign	0,0713	1	0,0713	14.028.553,6	0,13%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0169	1	0,0169	59.266.289,3	0,03%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,0651	1	0,0651	15.363.354,6	0,12%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	1,7285	4	6,9141	144.631,3	12,58%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	1,0760	1	1,0760	929.331,1	1,96%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	1,7398	1	1,7398	574.768,2	3,16%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,13%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,09%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	2,6200	1	2,6200	381.675,1	4,77%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,0720	1	0,0720	13.896.956,0	0,13%
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	2,6200	2	5,2401	190.837,5	9,53%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	8,4795	4	33,9181	29.482,8	61,70%
TOTALE				54,9722		

MTBF (R_{Total})	18.191,01 Ore
Equivalenti a	25,27 Mesi

Tabella 28 – Figura di affidabilità del sistema ridotto alla temperatura di 0 °C

Affidabilità del sistema ridotto sperimentale a 20 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	1,0770	1	1,0770	928.514,4	1,25%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	2,0117	1	2,0117	497.087,8	2,33%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	2,1586	1	2,1586	463.270,9	2,50%
Contattore	Ground, Benign	0,1523	1	0,1523	6.565.733,8	0,18%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0313	1	0,0313	31.903.033,9	0,04%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,1465	1	0,1465	6.825.378,1	0,17%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	3,1094	4	12,4378	80.400,2	14,39%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	2,1356	1	2,1356	468.251,4	2,47%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	3,1237	1	3,1237	320.133,4	3,61%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,08%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,05%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	5,1424	1	5,1424	194.460,1	5,95%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,1793	1	0,1793	5.576.106,0	0,21%
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	5,1424	2	10,2849	97.230,1	11,90%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	11,8522	4	47,4088	21.093,2	54,87%
TOTALE				86,4094		

MTBF (R_{Total})	11.572,81 Ore
Equivalenti a	16,07 Mesi

Tabella 29 – Figura di affidabilità del sistema ridotto alla temperatura di 20 °C

Affidabilità del sistema ridotto sperimentale a 50 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	4,8060	1	4,8060	208.072,5	1,48%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	9,1526	1	9,1526	109.258,8	2,83%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	10,4092	1	10,4092	96.068,9	3,22%
Contattore	Ground, Benign	0,4208	1	0,4208	2.376.308,7	0,13%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,0738	1	0,0738	13.551.229,1	0,02%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	0,4391	1	0,4391	2.277.372,2	0,14%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	14,7986	4	59,1944	16.893,5	18,28%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	10,3100	1	10,3100	96.993,0	3,18%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	14,8177	1	14,8177	67.486,8	4,58%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,02%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,01%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	27,5447	1	27,5447	36.304,6	8,51%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	0,5987	1	0,5987	1.670.223,1	0,18%
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	27,5447	2	55,0894	18.152,3	17,02%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	32,6927	4	130,7709	7.647,0	40,39%
TOTALE				323,7468		

MTBF (R_{Total})	3.088,83 Ore
Equivalenti a	4,29 Mesi

Tabella 30 – Figura di affidabilità del sistema ridotto alla temperatura di 50 °C

Affidabilità del sistema ridotto sperimentale a 100 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	87,6650	1	87,6650	11.407,1	1,88%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	173,0421	1	173,0421	5.778,9	3,71%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	147,8247	1	147,8247	6.764,8	3,17%
Contattore	Ground, Benign	1,7001	1	1,7001	588.201,7	0,04%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	0,2445	1	0,2445	4.090.396,6	0,01%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	1,9925	1	1,9925	501.887,8	0,04%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	233,3554	4	933,4217	1.071,3	20,03%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	147,2321	1	147,2321	6.792,0	3,16%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	233,3835	1	233,3835	4.284,8	5,01%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	449,8620	1	449,8620	2.222,9	9,65%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	3,0301	1	3,0301	330.019,5	0,07%
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	449,8620	2	899,7240	1.111,5	19,31%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	395,2878	4	1581,1511	632,5	33,93%
TOTALE				4660,3928		

MTBF (R_{Total})	214,57 Ore
Equivalenti a	0,30 Mesi

Tabella 31 – Figura di affidabilità del sistema ridotto alla temperatura di 100 °C

Affidabilità del sistema ridotto sperimentale a 180 °C

Descrizione	Environment	λ_p Singolo	Quantità	λ_p TOTALE	MTBF	Incidenza
Sezionatore generale	Ground, Unsheltered	2.989,1409	1	2989,1409	334,5	0,93%
Multimetro PM 3200	Ground, Fixed	5.963,3632	1	5963,3632	167,7	1,85%
Interruttore generale linea illuminazione	Ground, Benign	22.154,5375	1	22154,5375	45,1	6,88%
Contattore	Ground, Benign	8,9588	1	8,9588	111.621,6	0,00%
Crepuscolare e orologio illuminazione IC2000P+	Ground, Unsheltered	1,0122	1	1,0122	987.967,4	0,00%
Interruttore Selezione Aut>/Man bypass crepuscolare	Ground, Benign	11,9364	1	11,9364	83.777,5	0,00%
P5-ZS2 + Dualband +SEN	Ground, Unsheltered	25.129,4200	4	100517,6799	9,9	31,21%
RIO-ETH +4G	Ground, Benign	22.150,2503	1	22150,2503	45,1	6,88%
RIO-CRDS2 Dualband	Ground, Benign	25.129,4636	1	25129,4636	39,8	7,80%
Antenna CRD Dualband	Ground, Unsheltered	0,0727	1	0,0727	13.747.716,9	0,00%
Antenna GSM magnetica	Ground, Unsheltered	0,0468	1	0,0468	21.382.058,7	0,00%
RIO-IOA	Ground, Unsheltered	31.326,1337	1	31326,1337	31,9	9,73%
Alimentatore 24vdc	Ground, Fixed	19,8599	1	19,8599	50.352,8	0,01%
P5-FAI +4G	Ground, Unsheltered	31.326,1337	2	62652,2675	16,0	19,46%
Smart cameras	Ground, Unsheltered	12.277,7877	4	49111,1508	20,4	15,25%
TOTALE				322035,8741		

MTBF (R_{Total})	3,11 Ore
Equivalenti a	0,00 Mesi

Tabella 32 – Figura di affidabilità del sistema ridotto alla temperatura di 180 °C

3.2.1 Visual inspection dei componenti



Figura 22 – Interno della lampada: sono visibili i tre gruppi LED ed i regolatori di potenza

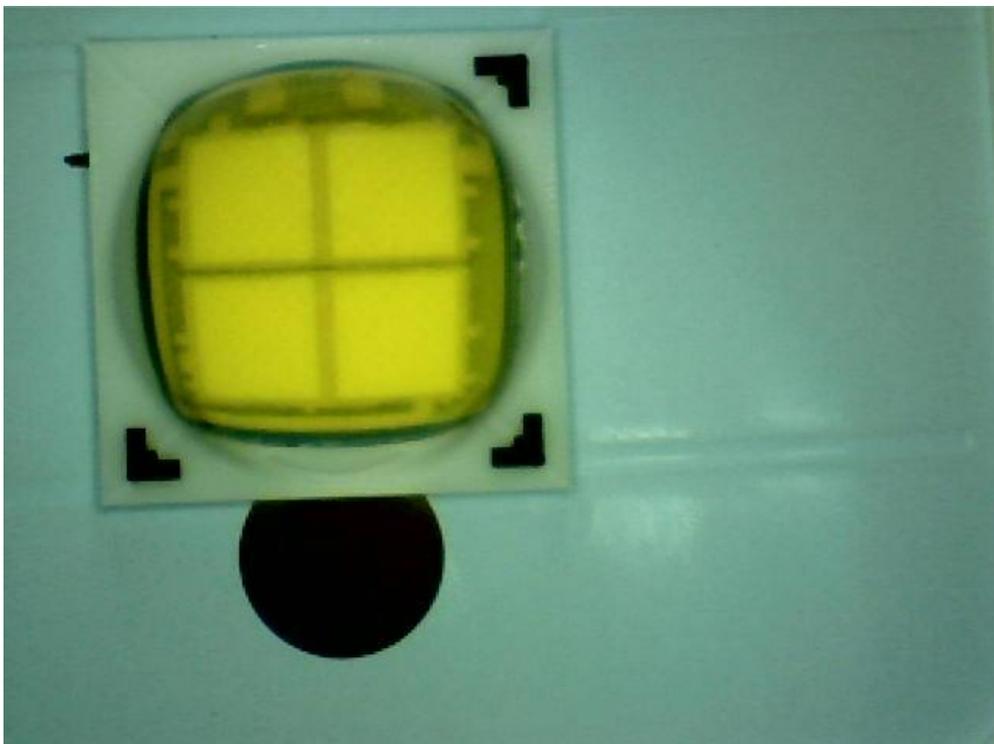


Figura 21 – Dettaglio diodo lampada

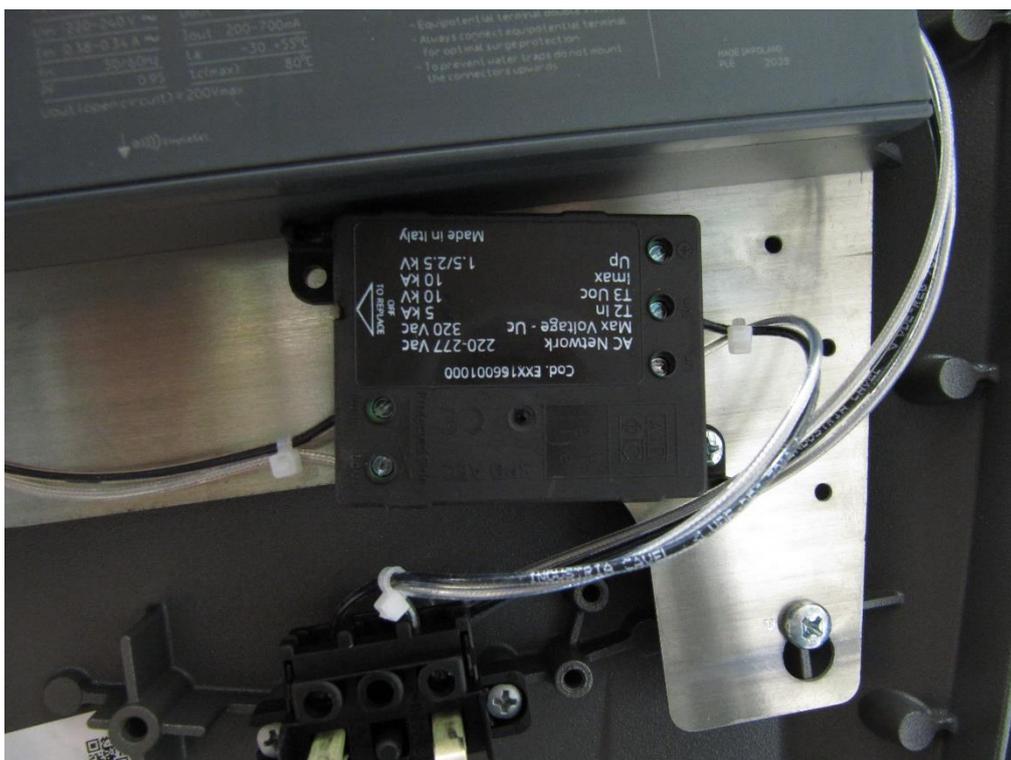


Figura 22 – Dettaglio della regolazione di potenza



Figura 23 – Dettaglio dell'ancoraggio della "boa"

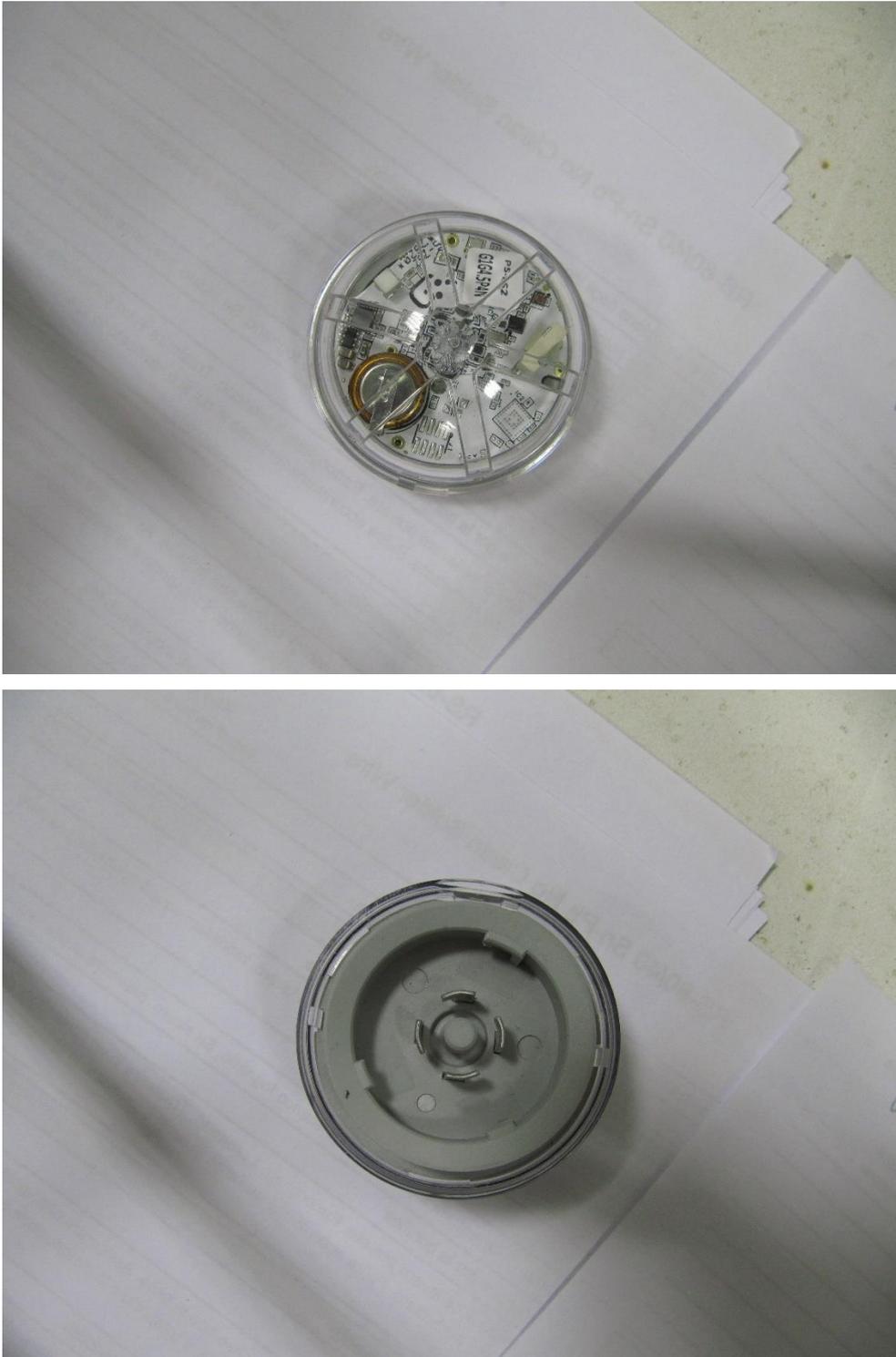


Figura 24 – Due viste della “boa” superiore e inferiore

dettaglio circuito boa

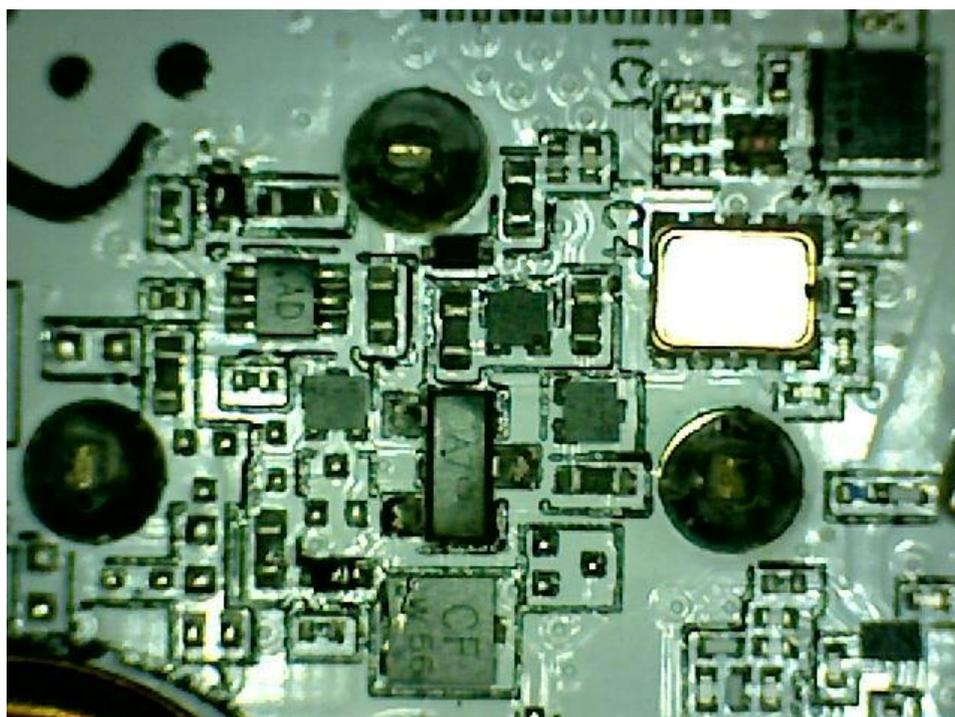


Figura 25 – dettaglio circuito boa

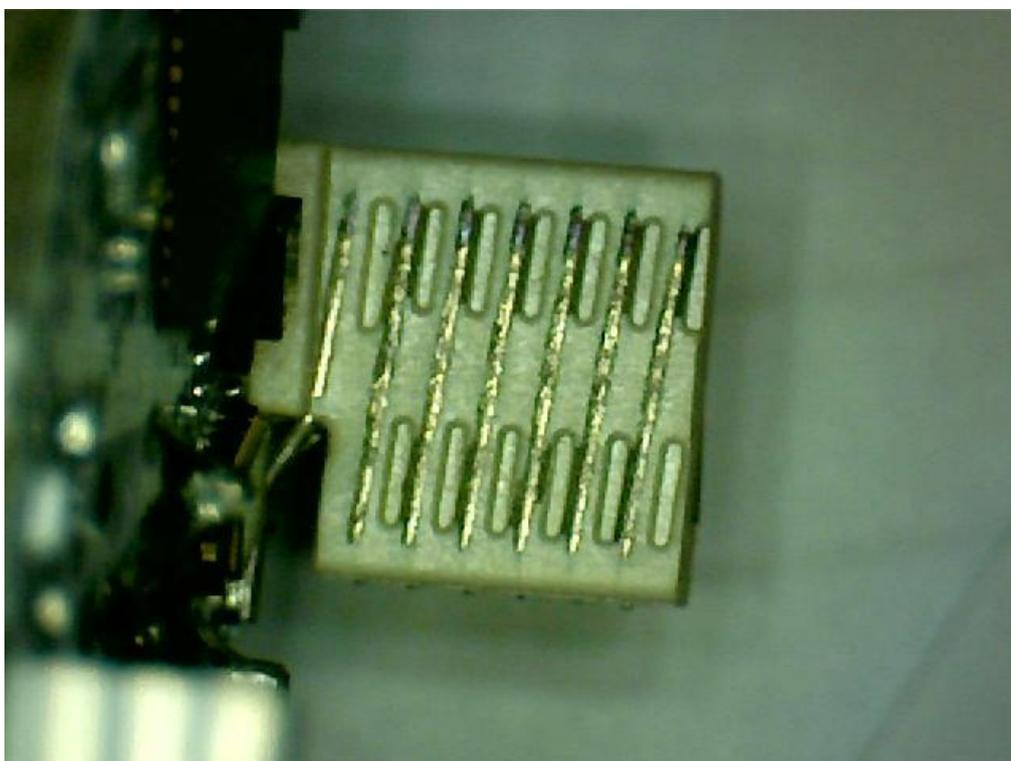


Figura 26 – Dettaglio antenna della boa

4 Conclusioni

4.1 Affidabilità

È stata effettuata l'Analisi di affidabilità del sistema "Smart Road" presso CR Casaccia. Per questo sistema è stato effettuato un approccio analitico che tiene conto di diversi fattori contribuendo quindi all'effettuazione di un'analisi più accurata e consistente.

Poiché il sistema è basato principalmente su componenti di qualità COTS (Commercial Off The Shelf) l'approccio numerico è basato sul sistema del *part stress*. Il metodo del *part count*, usato in precedenza, ha dato luogo a risultati troppo conservativi in rapporto alla durata reale dei componenti, malgrado ci si sia basati su un approccio di più ampio respiro che ha tenuto conto anche di altri parametri che hanno incluso un fattore di temperatura (π_T), un fattore di potenza (π_P), un fattore di stress di potenza (π_S), un fattore di qualità (π_Q) e un fattore ambientale (π_E) oltre al tasso di guasto di base (λ_b) del componente. Questi parametri sono stati fattore correttivo rispetto ai nudi numeri forniti dal MIL-STD-217 che, come si è detto, fornisce parametri troppo conservativi che poi si rivelerebbero irrealistici. Quindi è stato abbandonato per un approccio più preciso ovvero la *part stress analysis*

La *Parts Stress Analysis* è un metodo per trovare un valore atteso per il tasso di guasto (affidabilità) dei componenti meccanici ed elettronici di un sistema. Si basa sull'idea che quanti più componenti ci sono nel sistema tanto maggiore è lo stress a cui sono sottoposti durante il funzionamento, più spesso si guastano.

Il metodo Part Stress Analysis richiede una maggiore quantità di informazioni dettagliate ed è solitamente più applicabile alla fase di progettazione successiva. Per sollecitazioni dei componenti, la norma si riferisce alle condizioni operative effettive come ad esempio l'ambiente, la temperatura, la tensione, la corrente e i livelli di potenza applicati. Lo standard MIL-217 raggruppa componenti o parti per categorie principali e quindi ha sottogruppi all'interno delle categorie. Ad esempio, un "condensatore in alluminio elettrolitico fisso (a secco)" è una sottocategoria del gruppo "condensatore". A ogni categoria di componenti o parti e ai relativi sottogruppi viene applicata una formula o un modello univoco per calcolare il tasso di guasto per quel componente o parte.

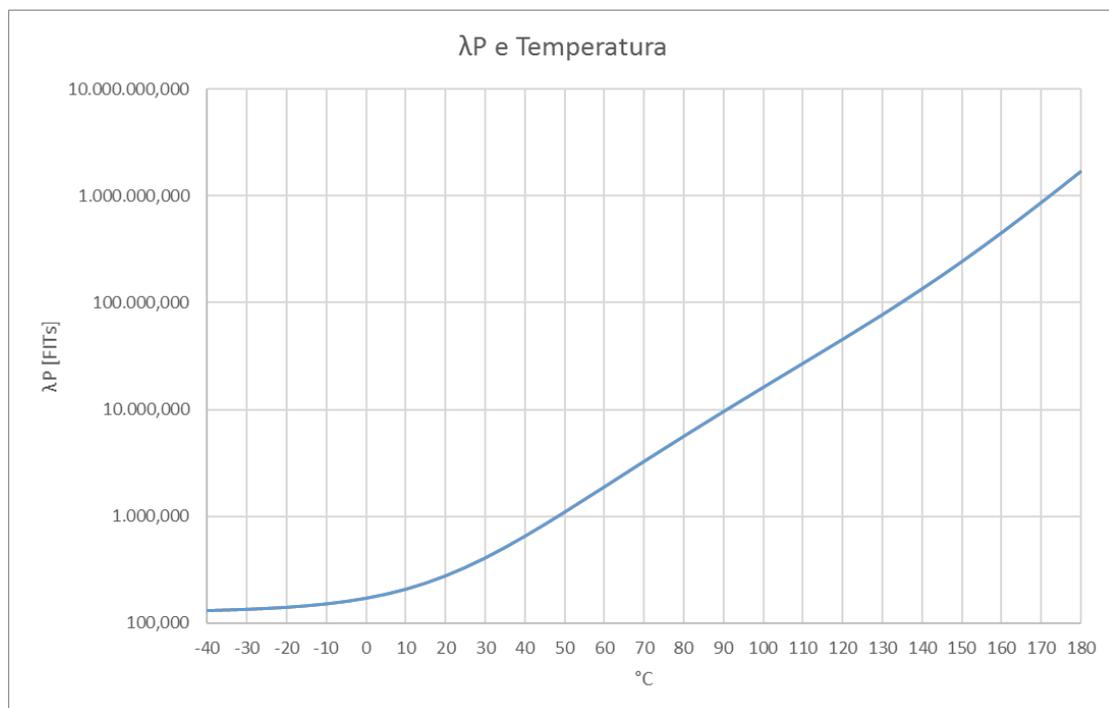


Figura 27 – Affidabilità complessiva del sistema in funzione della temperatura

Nella Figura 29 è visibile la deriva in temperatura dell'affidabilità. È assolutamente evidente un punto di "ginocchio" (benché il grafico sia semilogaritmico) intorno ai 25°C: questo è dovuto al fatto che la maggior parte dei componenti elettronici è ottimizzata per quell'intorno di temperatura ovvero le caratteristiche elettriche vengono espresse (per esempio nel *datasheet*) appunto in quel ristretto intervallo. Ogni altra deriva in alto e in basso porta ad una degradazione delle caratteristiche suddette.

Nella figura 30 è visibile la deriva in temperatura dell'affidabilità in funzione del singolo sottosistema. Qui si evidenzia il fatto che componenti poco complessi come interruttori e contattori sono poco sensibili dal punto di vista affidabilistico alla deriva in temperatura (in alto e in basso) mentre componenti ad alta complessità (*smart cameras*) preferiscono le basse temperature.

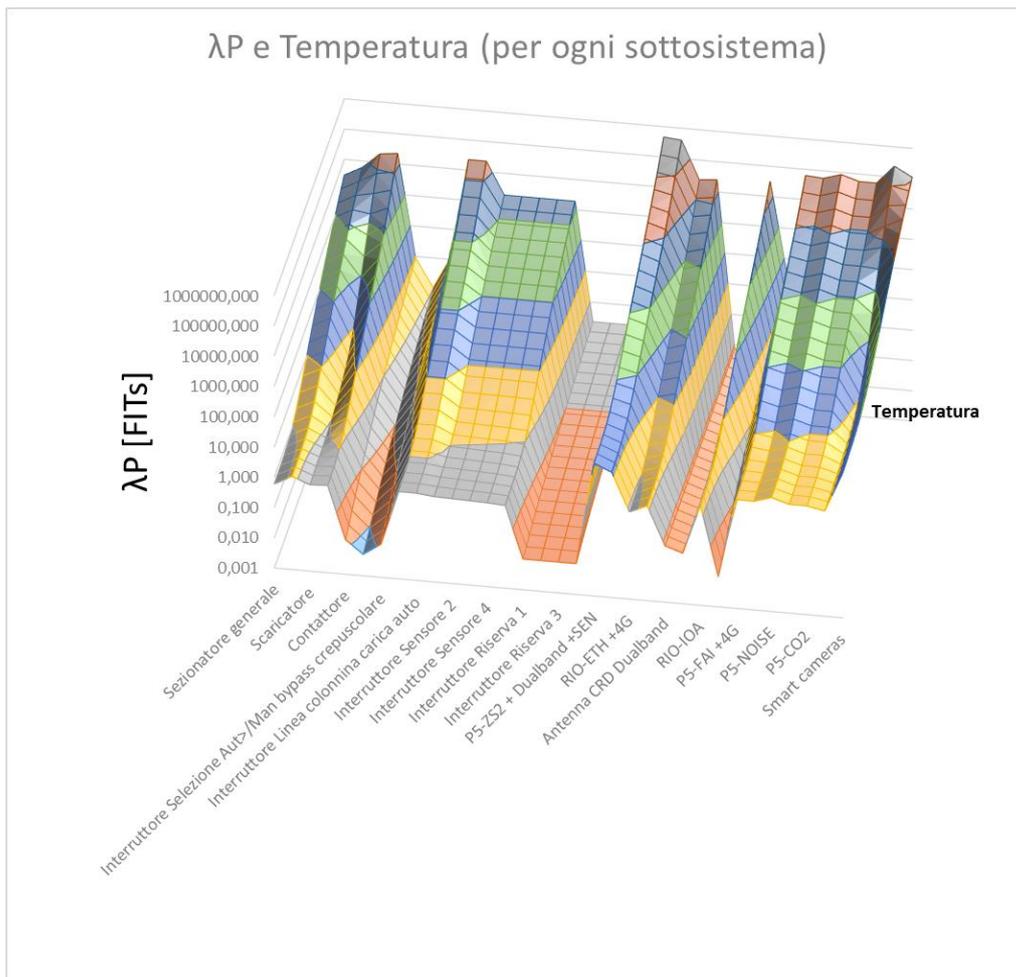


Figura 28 – Affidabilità complessiva del sistema in funzione della temperatura per ogni sottosistema

Il nostro sistema non ha unità o componenti in ridondanza, né calda (hot redundancy) né fredda (cold redundancy): solo il sistema di illuminazione ammette lo spegnimento di un punto luce ma quello, com'è stato trattato in precedenza, non è da considerarsi una vera e propria ridondanza in quanto al venir meno dell'elemento, le prestazioni del sistema non sono ripristinate bensì risultano degradate, anche se si mantengono ben all'interno delle tolleranze previste di progetto.

Ogni componente del sistema è un SPF (single point failure) ovvero il suo guasto porta ad una degradazione più o meno grave del sistema: dalle nude cifre parrebbe che sia prono ad ogni guasto, in realtà non è così. Una stima conservativa dell'affidabilità ci porta un'occorrenza di guasto accettabile e ben al di sopra dell'intervallo della normale manutenzione ispettiva del sistema.

4.2 Analisi Markoviana

L'analisi markoviana dei componenti più critici ci mostra che nessuna occorrenza di guasto composto è così alta da doverci impensierire in quanto notevolmente più bassa dei singoli componenti quindi nessun evento composto è particolarmente critico

Evento basilco	Tipo di effetto	Failure Rate
E01	Livello di illuminazione insufficiente	2,2603E-06
E02	Impossibilità di gestire il flusso dati	9,1351E-01
E03	Dati enviromentali insufficienti	1,3124E-02
E04	Copertura video insufficiente	3,5011E-18
E05	Perdita di alimentazione generale della linea	3,2079E-01

4.3 Prove di laboratorio e Ritorni dal campo

Dai ritorni dal campo si sono riportate varie tecniche per la taratura delle telecamere: malgrado l'utilizzo di software piuttosto avanzati per l'identificazione dei veicoli è stata necessaria un'ulteriore regolazione dell'angolo diedro delle telecamere.

E' stata valutata l'affidabilità del sistema ridotto, che è visibile nella figura qui sotto:

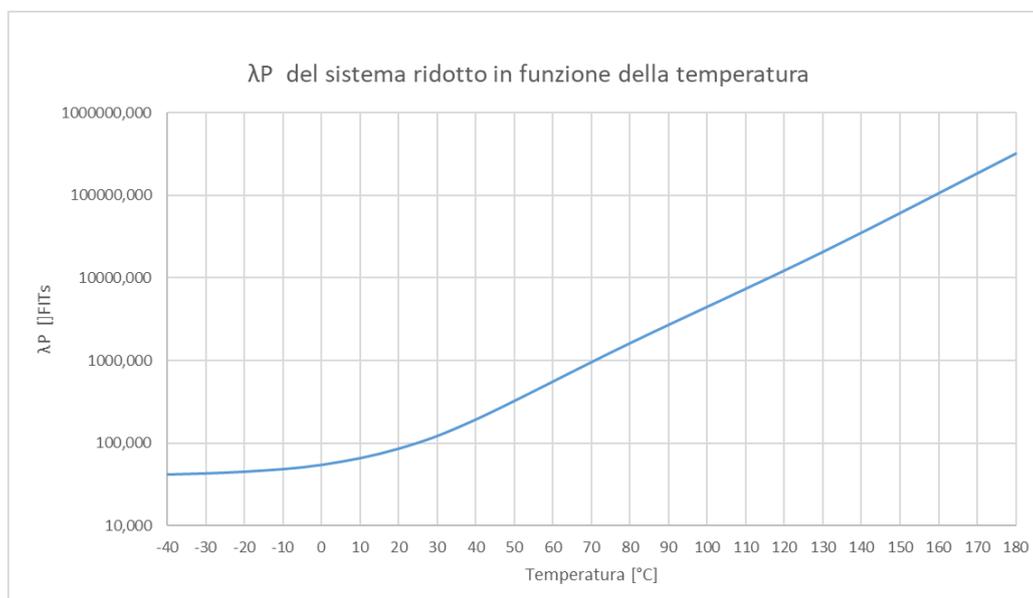


Figura 29 – Affidabilità complessiva del sistema ridotto sperimentale in funzione della temperatura

Similmente alla Fig. 29 vediamo lo stesso punto di ginocchio alla stessa temperatura: qualitativamente abbiamo lo stesso andamento anche se, poiché il sistema ha un numero di componenti ridotto rispetto al precedente, i numeri e quindi la pendenza della curva è meno pronunciata.

5 Riferimenti bibliografici

Di seguito i riferimenti bibliografici divisi in due sezioni: la prima “Documenti di riferimento” che sono i documenti su cui si basa questa parte di ricerca ovvero i documenti propedeutici o a cui si fa riferimento. La seconda parte invece è la parte bibliografica a cui afferiscono citazioni e assunzioni

5.1 Documenti di Riferimento

#	Numero Documento	Rev.	Titolo
RD01	Report RdS/PTR2020/022 ENEA	N/A	Analisi LSA preliminare applicata ad una Smart Road Sperimentale
RD02	G.U. 8-4-2018	N/A	Criteri Ambientali Minimi Per Servizio Di Illuminazione Pubblica
RD03	G.U. 18-10-2017	N/A	Criteri Ambientali Minimi Per L’acquisizione Di Sorgenti Luminose Per Illuminazione Pubblica L’acquisizione Di Apparecchi Per Illuminazione Pubblica L’affidamento Del Servizio Di Progettazione Di Impianti Per Illuminazione Pubblica
RD04	OF 191/20 del 28/04/2020	1	Algorab srl - offerta “Fornitura Hardware – Progetto Smart Road”.
RD05	N/A	MAG-20	AEC Illuminazione S.r.l. Scheda prodotto Italo 1
RD06			Quadro smart road Cabina 19-T21
RD07	IE01		Inpianto elettrico Smart Road Planimetria
RD08		05/11/2019	Calcolo Illuminotecnico Niteko Srl ICONA-S-60W-4070-A4 ICONA-S-60W-4070-A4 1xHI power LED

5.2 Bibliografia

1. E. Petritoli, F. Leccese and L. Ciani, "Reliability assessment of UAV systems," 2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Padua, 2017
2. E. Petritoli, E. De Francesco, R. De Francesco, "Obsolescence of the MIL-HDBK-217: A critical review," 2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Padua, Italy 2017
3. E. Petritoli, F. Leccese: “A High Accuracy Navigation System for a Tailless Underwater Glider” IMEKO International Conference on Metrology for The Sea (MetroSea), Naples, Italy, October 11-13, 2017
4. E. Petritoli, F. Leccese “A New Reliability Approach for Additive Layers Manufactured Components: an Improvement” IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace 2018) – Rome, Italy
5. E. Petritoli, F. Leccese “Reliability Degradation, Preventive and Corrective Maintenance of UAV Systems” 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Rome, 2018

6. E. Petritoli, E., Leccese, F., Ciani, L. "Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles" 2018 Sensors
7. E. Petritoli, E., Leccese, F., Pizzuti, S., Pieroni, F "Smart lighting as basic building block of smart city: An energy performance comparative case study" 2019 Measurement: Journal of the International Measurement Confederation
8. Petritoli, E.R., Leccese, F., Cagnetti, M. "Takagi-Sugeno Discrete Fuzzy Modeling: An IoT Controlled ABS for UAV" 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT
9. Petritoli, E., Leccese, F., Ciani, L. "A precision reliability measurement in a s-band transponder for space applications" Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 2019-May

6 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	
PNR	Part Number
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 diverse linee di ricerca tra le quali la qualità dell'energia (dal 2004), l'analisi informativa dei segnali (2002), i controlli di apparati locali e remoti ed in particolare di sistemi di risparmio energetico applicati ad illuminazione e riscaldamento (2008), la sensoristica distribuita incluse le WSN (2008) e le analisi affidabilistiche di sistemi complessi (2013) trova ampia utilità e complementarità con le attività svolte in ENEA dal gruppo del Laboratorio Smart Cities and Communities.

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, 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 e con molte Aziende del Territorio.

A testimonianza dell'esperienza maturata, il nostro lavoro ha portato ad oltre 200 pubblicazioni scientifiche per la maggior parte presentate su Riviste Scientifiche o Congressi Scientifici Internazionali, come riscontrabile dalle 151 riportate sul Database Scopus. Di queste, 8 sono state scritte insieme ad ENEA e sempre con ENEA sono stati affrontati insieme 7 progetti di ricerca.

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".
- 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.

- 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.

I seguenti progetti sono stati sviluppati all'interno del piano Piano Triennale della Ricerca nell'ambito del Sistema Elettrico Nazionale 2015-2017 finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) e gestito da ENEA all'interno dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA 2015-2017.

- 6) **Progettazione e sviluppo prototipale di strumenti per la gestione del PELL**, per conto di ENEA – Roma, 2015. **Ruolo: Responsabile Scientifico di Sede.** Durata 5 mesi.
- 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.** Durata 5 mesi.
- 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.** Durata 5 mesi.
- 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.** Durata 3 mesi.
- 10) **Smart Energy in Sistemi Pubblici: analisi di affidabilità e qualificazione dei dati per ridurre le incertezze di sistema**, per conto di ENEA – Roma, 2019-2021. **Ruolo di Responsabile Scientifico di Sede.** Durata 3 anni.

Progetti Conto Terzi:

- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.

- 14) Progetto di ricerca: **“Sistema di gestione delle telecamere di guida a bordo del Rover SETEL”** per conto della Se.Te.L. group di Roma, 2020-2021. **Ruolo: Responsabile Scientifico.** Durata 7 mesi.