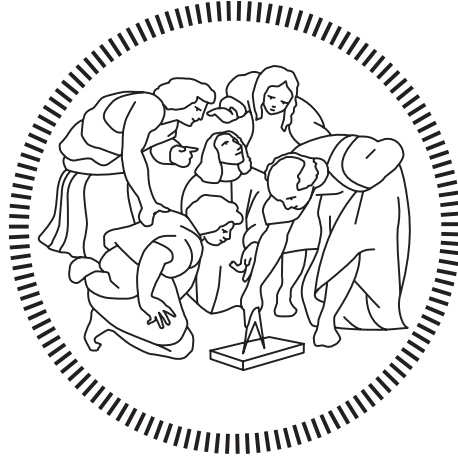


Politecnico di Milano

SCUOLA DI ARCHITETTURA URBANISTICA INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI

Laurea Magistrale – Ingegneria dei Sistemi Edilizi



L'affidabilità degli impianti *HVAC*:
analisi e calcolo dell'indice $R(t)$ tramite *RBD*
(*Reliability Block Diagrams*).

Relatore

Prof. Angelo Lucchini

Co-Relatori

Prof. Enrico Sergio Mazzucchelli

Ing. Umberto Corbellini

Studente

Paolo Giannattasio – 928717

Anno accademico 2020 – 2021

Indice

Indice delle figure.....	3
Indice delle tabelle.....	5
Abstract (Ita).....	6
Abstract (Eng).....	7
1. Il concetto di affidabilità	8
1.2 La fidatezza di un impianto elettrico: IEC 60050.....	11
1.2 L'importanza degli schemi funzionali e dei componenti in un impianto elettrico per l'affidabilità	13
1.2.1 IEC 61508: Standard per la sicurezza Funzionale di Sistemi di Sicurezza.....	13
1.2.2 L'affidabilità di uno schema funzionale.....	17
2. Metodi di classificazione degli schemi funzionali	22
2.1 IEEE Standard 3006.5: Recommended Practice for the Use of Probability Methods for Conducting a Reliability Analysis of Industrial and Commercial Power Systems.....	22
1.1.1 Equazioni di calcolo dell'affidabilità.....	24
2.1.1.1 Affidabilità per un sistema con distribuzione esponenziale	24
2.1.2 Metodi qualitativi per l'analisi di affidabilità e disponibilità.....	30
2.1.3 Metodi numerici per il calcolo dell'affidabilità e della disponibilità di un sistema....	35
2.2 Data Center Site Infrastructure. La classificazione secondo <i>Tier</i> dell' <i>Uptime Institute</i>	38
2.2.1 Classificazione dei <i>Tier</i>	38
2.2.2 Sistemi di generazione	44
2.2.3 Temperature di progetto di un Data center.....	44
2.3 Classificazione degli schemi elettrici di potenza	46
2.3.1 Guasti elettrici α	48
2.3.2 Temperatura β	49
2.3.3 Prevenzione incendi γ	50
2.3.4 Sisma e alluvione δ	51
2.3.5 Sostenibilità ε	51
2.3.6 Fattore umano ξ	52
2.3.7 Sicurezza dal sabotaggio η	55
3. La progettazione e il tema dell'affidabilità degli impianti meccanici.....	57

3.1 <i>Maintainability e Functional availability</i> : l'importanza della manutenzione ai fini dell'affidabilità	61
3.2 I dati di affidabilità degli impianti meccanici.....	66
3.3 Gli impianti meccanici nei data center	68
3.3.1 La riduzione dei consumi per il sistema di raffrescamento	71
3.3.2 Rischi legati all'aumento delle temperature	75
4. Il caso studio.....	82
4.1. La differenza di affidabilità al variare delle configurazioni: metodologia di calcolo.....	86
4.2 Schema elettrico.....	89
4.2.1. Schema 1	90
4.2.2 Schema 2	93
4.2.3. Schema 3	95
4.2.4 Schema reale	97
4.2.5 Considerazioni sullo studio di affidabilità	98
4.3 Gli impianti meccanici	101
4.3.1 Considerazioni sullo studio di affidabilità dell'impianto meccanico	104
4.3.2 Ulteriori aspetti legati all'affidabilità	107
5. Discussione e conclusioni	111
Bibliografia	119
Allegato 1: Schema funzionale impianti tecnologici del caso studio	122

Indice delle figure

Figura 1. Data center in fiamme a causa dell'innesco di un incendio. L'evento ha causato danni rilevanti per numerosi siti web.	9
Figura 2. Tabella livelli SIL con relativo valore di probabilità media di guasto per domanda e fattore di riduzione del rischio	14
Figura 3. Tabella dei livelli di prestazione (PL) con probabilità media di guasto oraria e rapporto con livelli SIL	16
Figura 4. Esempio di schema elettrico di potenza con differenziazione tra rete normale e rete sotto continuità	17
Figura 5. Esempio di diagramma a blocchi di affidabilità.....	25
Figura 6. Diagramma a blocchi di affidabilità per un sistema composto da elementi in serie ...	26
Figura 7. Diagramma a blocchi di affidabilità di un sistema caratterizzato da ridondanza	27
Figura 8. Tabelle che indicano il rapporto tra numero di generatori presenti, livello di ridondanza e disponibilità	28
Figura 9. Diagramma a blocchi di affidabilità nel caso di "parallel redundancy" (a) e "standby redundancy" (b)	29
Figura 10. Diagramma a blocchi di affidabilità nel caso di "standby redundancy" con interruttore "imperfetto"	30
Figura 11. Esempio di diagramma di guasto ad albero di un sistema di alimentazione di una pompa antincendio	31
Figura 12. Esempio di diagramma ad albero degli eventi.....	32
Figura 13. Esempio di foglio di lavoro per eseguire un'analisi di tipo FMECA	33
Figura 14. Esempio di diagramma causa-effetto	34
Figura 15. Esempio di rete Bayesiana	34
Figura 16. Esempio di modello di Markov.....	36
Figura 17. Esempio di schema elettrico Tier I	39
Figura 18. Esempio di schema elettrico Tier II	40
Figura 19. Esempio di schema elettrico Tier III	41
Figura 20. Esempio schema elettrico Tier IV	43
Figura 21. Tabelle riassuntiva delle caratteristiche principali dei 4 Tier	43
Figura 22. Tabella delle sette categorie dei criteri di classificazione	46
Figura 23. Tabella delle classi e punteggi di valutazione per ogni categoria	47
Figura 24. Schema funzionale originale del sistema con singolo ramo di alimentazione.....	53
Figura 25. Schema funzionale della nuova centrale elettrica	53
Figura 26. Schema funzionale durante la fase trasitoria.....	54
Figura 27. Tabella riassuntiva dei possibili valori derivati dalla classificazione di uno schema funzionale	56
Figura 28. Rappresentazione dei differenti metodi di progettazione.....	60
Figura 29. Diagramma di rappresentazione delle fasi necessarie alla riparazione di un dispositivo	62
Figura 30. Distribuzione lognormale dei valori di MTTR	64
Figura 31. Distribuzione lognormale dei valori di MTBF	64
Figura 32. Distribuzione percentuale dei dati in base alla tipologia di edificio	67
Figura 33. Tabella dei valori guida ASHRAE 2004 e 2008.....	69

Figura 34. Tabella delle classi ASHRAE 2011	70
Figura 35. Schema di funzionamento di un economizzatore air-side	72
Figura 36. Mappa indice delle ore di funzionamento di un sistema free-cooling in Europa con temperatura operativa interna di 27°C.....	73
Figura 37. Mappa indice delle ore di funzionamento di un sistema free-cooling in Europa con una temperatura operativa interna di 35°C.....	73
Figura 38. Grafico con percentuale annua in cui alcune città internazionali ricadono nel range ASHRAE A2	74
Figura 39. Variazione della temperatura interna di server e della potenza delle ventole in relazione alla temperatura di immissione dell'aria in ambiente	75
Figura 40. Variazione del valore del rateo di guasto per un server in relazione alla temperatura operativa (ASHRAE 2011)	76
Figura 41. Variazione del rateo di guasto con una temperatura operativa variabile dai 15°C ai 35°C	78
Figura 42. Variazione del rateo di guasto con una temperatura operativa compresa tra i 20°C e i 35°C	79
Figura 43. Valori di rateo di guasto per server in relazione alle temperature operative (ASHRAE 2011)	80
Figura 44. Tabella di calcolo del valore di Net X-factor per una località specifica	81
Figura 45. Render dell'edificio oggetto di studio	83
Figura 46. Schemi comparativi della radiazione solare per due diverse soluzioni progettuali... 84	84
Figura 47. Illustrazione del grado di illuminazione naturale negli ambienti interni	85
Figura 48. Grafico standard dell'andamento del rateo di guasto	87
Figura 49. Schema elettrico di progetto.....	90
Figura 50. Schema 1 con singolo ramo di alimentazione.....	91
Figura 51. Schema 2 con cogeneratore.....	93
Figura 52. Schema 3 con aggiunta di alimentazione da gruppi elettrogeni.....	95
Figura 53. Schema elettrico finale.....	97
Figura 54. Diagramma a blocchi esemplificativo dello schema analizzato. I valori di rateo di guasto dei componenti sono espressi nella tabella seguente.	102
Figura 55. Condizione di precisione del tipo Two Sources ad acqua refrigerata + espansione diretta.....	109

Indice delle tabelle

Tabella 1. Componenti dello schema 1 con relativi valori di rateo di guasto e affidabilità su base annua.....	92
Tabella 2. Valori di affidabilità dello schema 1 caratterizzato da singolo ramo di alimentazione e componenti in serie	92
Tabella 3. Componenti dello schema 2 con relativi valori di rateo di guasto e affidabilità su base annua.....	94
Tabella 4. Valori di affidabilità dello schema 2 caratterizzato da alimentazione in parallelo utility- cogenerazione.....	94
Tabella 5. Componenti dello schema 3 con relativi valori di rateo di guasto e affidabilità su base annua.....	96
Tabella 6. Valori di affidabilità dello schema 3 caratterizzato da alimentazione in parallelo utility- cogenerazione-gruppo elettrogeno.....	96
Tabella 7. Valori di affidabilità dello schema reale di progetto, caratterizzato da ridondanza ..	98
Tabella 8. Affidabilità rete data center con esclusiva alimentazione da gruppi elettrogeni.	98
Tabella 9. Variazione di affidabilità nelle diverse configurazioni.....	99
Tabella 10. Tabella valori di rateo di guasto e affidabilità dei componenti dell'impianto meccanico	103
Tabella 11. Valori di affidabilità dei singoli rami e dell'intero impianto meccanico	104
Tabella 12. Schema di valutazione del rischio in relazione alla destinazione d'uso	112
Tabella 13. Legenda schema di valutazione.....	113
Tabella 14. Tabella di classificazione di uno schema in parallelo	115
Tabella 15. Tabella di classificazione di uno schema in serie.....	115

Abstract (Ita)

In diversi settori dell'ingegneria, quali aeronautica, aerospaziale, così come nel settore nucleare, chimico, petrolifero ed elettrico, il concetto dell'affidabilità risulta essere parte fondamentale ed ormai imprescindibile in fase di progettazione e di realizzazione di un impianto e dei singoli elementi che lo compongono. Gli stessi principi non sono però allo stesso modo percepiti e applicati nel mondo degli impianti meccanici di climatizzazione, estiva ed invernale, degli edifici. Questi, infatti, sono spesso esclusivamente considerati centrali per l'ottenimento di un comfort termoisometrico delle persone che vivono in un ambiente costruito e, quindi, non oggetto di particolari studi legati alla loro affidabilità. Gli impianti di raffrescamento, però, hanno assunto, in tempi più o meno recenti, una funzione essenziale per garantire aspetti di sicurezza delle persone e di protezione di valori economici importanti. Basti pensare al raffrescamento di una sala operatoria o al raffrescamento di una sala di apparati informatici di un aeroporto, di una banca, o anche semplicemente di un'azienda con centinaia di dipendenti, il cui lavoro è dipendente dal loro funzionamento. Mentre nel settore dell'ingegneria elettrica sono stati, fin dagli anni '50, sviluppati studi affidabilistici basati su statistiche dei tassi di guasto di componenti, algoritmi di calcolo definiti da norme tecniche, ciò non avviene ancora per il settore degli impianti tecnologici.

Il seguente lavoro di tesi ha, quindi, lo scopo di mettere in evidenza l'importanza dell'affidabilità (*reliability*) degli impianti e di trattarne lo stato dell'arte nel settore elettrico, proponendone l'estensione agli impianti tecnologici di climatizzazione. Verranno, quindi, mostrate, studiate e analizzate le implicazioni sotto il profilo dell'analisi del guasto sia di componenti sia dei collegamenti tra di essi (schemi funzionali).

La tesi conclude con un esempio di un'analisi affidabilistica di un sistema elettrico di una sala apparati di un aeroporto, conforme allo Standard *IEEE 3006.5 (2014) IEEE Recommended Practice for the Use of Probability Methods for Conducting a Reliability Analysis of Industrial and Commercial Power Systems*, che viene esteso in modo del tutto analogo agli impianti tecnologici a servizio della medesima sala apparati. In particolar modo, tutte le analisi affidabilistiche sia in relazione all'impianto elettrico che a quello meccanico, verranno svolte tramite i *Reliability Block Diagrams* (RBD). Verranno così evidenziati gli aspetti positivi e negativi legati all'applicazione di questa metodologia di calcolo dell'affidabilità e, tramite l'applicazione del caso studio, sarà possibile verificare il suo possibile utilizzo nella pratica progettuale.

Abstract (Eng)

The idea of reliability, in several engineering fields such as aeronautics, aerospace, nuclear, chemical, petroleum and electrical, is essential for the design and construction of new plants. However, these concepts are generally not applied in HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems supplying the buildings. Generally, the reliability of the HVAC system is not studied because it is only associated with thermohygrometric comfort of people but, nowadays, this is not entirely true. For example, the HVAC systems assume fundamental importance during surgery, or for maintaining the correct range of temperature in a bank Data Center and for ensuring the best working conditions for employees of a big company. Reliability studies, based on statistics and mathematic formulas, are investigated and applied in electrical engineering since the 1950s. This scientific approach is based on the failure ratio of several components of electric plants, which are not available for all the component of HVAC systems.

The thesis aims to highlight the importance of reliability in HVAC systems and to describe the statistical methods that are currently used in electrical engineering extending them for design reliable HVAC systems. To do that, the thesis analyzes and investigates the failure ratio of the single component of the systems and focuses on how the system is designed (functional diagram).

In the conclusions of the thesis, the application of reliability analysis is exemplified following the IEEE Standard 3006.5 "Recommended Practice for the Use of Probability Methods for Conducting a Reliability Analysis of Industrial and Commercial Power Systems" for the electrical plant and HVAC systems of an airport. The reliability analysis was performed by using the Reliability Block Diagrams (RBD) for both functional diagrams, electrical and HVAC. The positive and negative aspects of this method are showed by the applications in the study case in order to estimate the usefulness of quantifying the reliability of a system by RBD for design reliable systems.

1. Il concetto di affidabilità

L'affidabilità viene definita come la probabilità che un dispositivo compia in modo soddisfacente la funzione ad esso richiesta, quando gli sia chiesto di compierla, entro i limiti e specifiche di progetto: il guasto/rottura o lo scostamento dei parametri caratteristici al di fuori delle tolleranze sono, pertanto, i due elementi da indagare per valutare l'affidabilità. Per garantire l'affidabilità di un dispositivo risulta essere necessario definirne precisamente la funzione richiesta così come il quando sia richiesta e che sia determinata, in fase progettuale, la prestazione che l'elemento deve garantire e le condizioni operative nelle quali il dispositivo deve lavorare. Il concetto di affidabilità risulta essere fortemente legato alle condizioni in cui opera così come alle richieste che, in caso dovessero variare, cambierebbero il livello di affidabilità del dispositivo stesso.

Nel seguente elaborato si studieranno e approfondiranno gli aspetti di affidabilità legati agli impianti elettrici e meccanici in ambito civile. L'applicazione di differenti metodologie matematiche e statistiche, che ci permettono di quantificare l'affidabilità, deriva però dalla necessità di garantire dei livelli di sicurezza idonei in determinati contesti. Vi sono, infatti, opere civili e/o industriali i cui componenti devono garantire dei livelli di affidabilità alti al fine di evitare la perdita di importanti valori economici e, in alcuni casi, anche alla salute delle persone. Parliamo, infatti, di strutture quali ospedali, industrie, centrali nucleari, aeroporti, centri di ricerca o comunque edifici nell'ambito del terziario per cui dovrebbe essere maggiormente diffusa la consapevolezza dell'importanza dell'affidabilità.

Alcuni esempi relativi alle conseguenze di un mancato funzionamento di sistemi impiantistici, in particolar modo relativi all'alimentazione elettrica e ai sistemi di trattamento dell'aria e condizionamento degli ambienti, sono facilmente riscontrabili. I blackout di ospedali con la conseguente mancata attivazione di gruppi elettrogeni o con la parziale copertura dei carichi richiesti provocano disagi tra medici e pazienti soprattutto nei reparti maggiormente "sensibili" o a rischio. La mancanza di alimentazione elettrica determina l'interruzione del sistema di illuminazione interna dell'ospedale, così come il blocco degli ascensori ma, ancora più importante, rende altamente complicate l'utilizzo di sale operatorie interrompendo anche il funzionamento di macchinari e respiratori necessari a garantire la salute delle persone. Ancora la mancanza di alimentazione elettrica in un aeroporto causa forti disagi ai passeggeri e ritardi su numerosi voli con una conseguente perdita economica non indifferente. In edifici quali *Data*

center o laboratori chimici assume anche una rilevanza il sistema di climatizzazione e di trattamento dell'aria. Edifici che ospitano i server in grado di far funzionare migliaia di siti web tra cui siti governativi o bancari, devono rispettare dei limiti di temperatura e qualità dell'aria al fine di evitare il rischio di innesco di incendio causato dal raggiungimento di temperature elevatissime dei server. Gravi conseguenze, non solo di carattere economico, possono anche verificarsi nel caso in cui in un laboratorio chimico e biologico viene a mancare il sistema che garantisce la conservazione di prodotti chimici di sintesi, di campioni biologici o di reagenti a prefissate condizioni ambientali e di temperatura. Se queste condizioni non dovessero essere garantite, anche solo per tempi molto brevi, c'è il rischio di perdere anni di ricerche e sviluppi in campo scientifico. In questa tipologia di ambienti è anche importante garantire il funzionamento corretto del sistema di ricambio d'aria interno con lo scopo di mitigare il rischio di contaminazione degli ambienti da prodotti chimici dannosi per la salute.

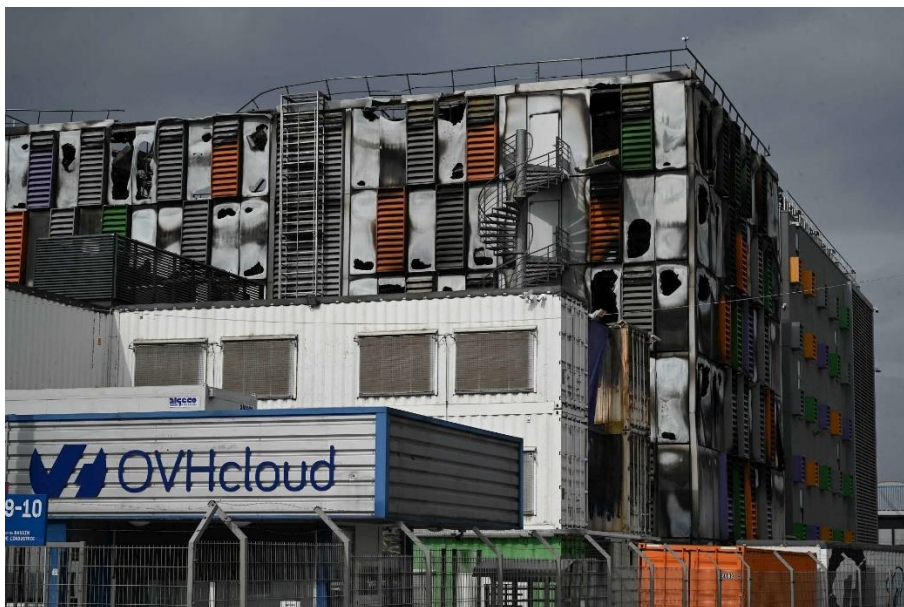


Figura 1. Data center in fiamme a causa dell'innesco di un incendio. L'evento ha causato danni rilevanti per numerosi siti web.

Attraverso questi brevi esempi, è possibile comprendere come la destinazione d'uso dell'edificio che si sta progettando assume un ruolo cardine nella definizione dei livelli di affidabilità. La mancanza di alimentazione elettrica, ad esempio, in una sala operatoria piuttosto che in una grossa industria ha una ricaduta differente in termini di perdite economiche e di salute delle persone rispetto al caso in cui si verifichi in un edificio di tipo residenziale. L'ottenimento di impianti e sistemi tecnologici affidabili deriva però non solo dalla consapevolezza della necessità di ottenere livelli di sicurezza più alti per edifici con destinazioni d'uso strategiche, ma anche da

un dispendio economico e tecnico in termini di produzione e progettazione dell'impianto certamente molto più alto che in un caso standard. Progettare e realizzare un impianto completamente ridondante e/o munito di un sistema di gestione, controllo e sensoristica avanzato, è un dispendio economico in termini realizzativi, costruttivi e gestionali che ha una rilevanza importante soprattutto se facciamo riferimento ad impianti a servizio di edifici di grandi dimensioni come ospedali o edifici industriali. È quindi necessario che il progettista così come i committenti e i gestori di questi impianti siano in grado di individuare e definire quando è necessario studiare e progettare un impianto affidabile. Gli edifici soggetti a maggiori criticità devono quindi essere pensati e progettati al fine di ottimizzare aspetti economici, funzionali, di sicurezza, di uso e di disponibilità. L'affidabilità non è quindi un mero esercizio progettuale di applicazione di formule matematiche e statistiche da parte del progettista, ma deve essere indotto dal buon senso, dal committente e dal gestore dell'impianto dalle fasi di progettazione a quelle di utilizzo.

Nel presente capitolo e nel successivo, verranno quindi definiti quelli che sono gli aspetti principali che un ingegnere progettista deve poter considerare per garantire e, se possibile, quantificare il livello di affidabilità dell'impianto che sta progettando. Sono principalmente due gli elementi che concorrono all'ottenimento di un sistema affidabile: l'architettura dello schema funzionale e la tipologia di componenti utilizzati.

Come vedremo, per l'ingegneria elettrica ed elettronica, sono stati sviluppati negli anni diversi standard e diffuse più o meno buone pratiche di progettazione atte a garantire l'affidabilità soprattutto in ambiti industriali o di infrastrutture strategiche. Allo stesso modo anche in ambiti altamente specializzati come l'ingegneria ferroviaria, navale o aerospaziale lo studio di impianti altamente prestazionali che garantiscano livelli di affidabilità consoni all'importanza di infrastrutture strategiche è altresì diffuso anche se, nel presente elaborato, non verranno trattati. Non vi è però nessun obbligo di carattere normativo, sia a livello nazionale che internazionale, di seguire delle pratiche progettuali definite così come di misurare in modo qualitativo e/o quantitativo l'affidabilità del sistema progettato sia in ambito elettrico che per impianti meccanici di climatizzazione.

Si valuteranno così standard internazionali che descrivono dettagliatamente le modalità di valutazione dell'affidabilità e verranno analizzati e in parte commentati differenti tipologie di schemi elettrici con l'obiettivo di individuarne le maggiori criticità prevalentemente in relazione al sistema di alimentazione del sistema stesso.

Il fine di questa analisi è quello di applicare le classificazioni e le modalità di calcolo dell'affidabilità ad un caso reale ma, soprattutto, di traslare queste metodologie per l'analisi e la progettazione di impianti meccanici di raffrescamento che sono di sostanziale importanza per il funzionamento di edifici strategici (ospedali, aeroporti, Data center...). Per queste tipologie di impianti, infatti, sia in relazione alla fidatezza che alla disponibilità di componenti e di schemi impiantistici, non sembra essere diffusa, tra i tecnici e i produttori di componenti, la consapevolezza dell'importanza di queste due caratteristiche. Il presente elaborato si pone quindi nell'ottica di analizzare le modalità con cui è possibile quantificare l'affidabilità tramite lo studio di standard e normative appartenenti all'ingegneria elettrica ed elettronica ed in seguito proporre un approccio similare in ambito meccanico.

1.2 La fidatezza di un impianto elettrico: IEC 60050

Nel mondo dell'elettrotecnica e degli impianti elettrici il problema dell'affidabilità viene affrontato e studiato sin dal secolo scorso. L'importanza dell'idea di affidabilità di un impianto è legata a numerosi aspetti sia di sicurezza che funzionali. In modo particolare per infrastrutture di una certa rilevanza, quali ad esempio ospedali, aeroporti, piattaforme petrolifere e grandi industrie di diversi settori produttivi, risulta essere fondamentale garantire un funzionamento corretto, e in alcuni casi continuo, di diverse tipologie di impianti. Certamente l'approvvigionamento di energia elettrica e la sua modalità di distribuzione (schema funzionale) è una di queste. La mancanza di energia elettrica, infatti, può causare il mancato funzionamento di un intero sistema produttivo causando gravi danni economici così come un peggioramento delle condizioni di sicurezza e di comfort di persone e cose. Oltre a progettare quindi un impianto che sia in grado di sostenere tutte le richieste necessarie, esso deve allo stesso tempo garantire livelli di sicurezza adeguati anche in caso di presenza di un guasto. Ci si pone quindi nell'ottica di come poter garantire l'approvvigionamento di energia elettrica anche in caso di guasto ed anche come la manutenzione dello stesso impianto possa essere effettuata in tutta sicurezza. Per far sì che ciò sia possibile, gli schemi elettrici ed i loro componenti devono essere progettati e scelti secondo dei criteri specifici in base alle tipologie di edifici e di infrastrutture che essi andranno a servire.

Nell'ingegneria elettrica ed elettronica questi aspetti sono ormai studiati e approfonditi da diversi anni. Un esempio è certamente il comitato elettrotecnico internazionale.

La IEC, *International Electrotechnical Commission*, fondata nel 1906, è l'organizzazione leader per la redazione e la pubblicazione degli standard internazionali inerenti il campo elettrico, elettronico e relative tecnologie. Lo scopo della realizzazione di questi numerosi standard da parte dell'IEC ha lo scopo di garantire un alto livello di qualità, sostenibilità, efficienza e di incrementare il livello di sicurezza per le persone e l'ambiente in relazione al mondo elettrotecnico. Gli standard IEC propongono quindi istruzioni, linee guida, regole, definizioni, valutazioni di rischio atte alla progettazione, realizzazione, installazione e certificazione di sistemi elettrici ed elettronici. Numerose normative tecniche a livello nazionale e internazionale sono infatti basate sugli standard prodotti dall'IEC.

La commissione elettrotecnica internazionale, tra le altre cose, ha prodotto il vocabolario elettrotecnico internazionale (IEV, IEC 60050), detto anche *Electropedia*, che contiene tutti i termini e le definizioni del vocabolario elettrotecnico. Anche lo IEC definisce un significato di affidabilità che nel vocabolario elettrotecnico internazionale prende il nome di *dependability* (192-01-22). Essa viene definita letteralmente come "*ability to perform as and when required*".

Il concetto di *dependability*, come riportato nelle note da definizione, include:

- **Availability** (192-01-23) *<of an item> ability to be in a state to perform as required*
- **Reliability** (192-01-24) *<of an item> ability to perform as required, without failure, for a given time interval, under given conditions*
- **Recoverability** (192-01-25) *>of an item> ability to recover from failure, without corrective maintenance*
- **Maintainability** (192-01-27) *<of an item> ability to be retained in, or restored to a state to perform as required, under given conditions of use and maintenance*
- **Maintenance support performance**: *effectiveness of an organization in respect of maintenance support*

Si nota quindi come la fidezza di un impianto (*dependability*) sia un argomento centrale, nell'ingegneria elettrica, definito e trattato già da diversi anni. Questo chiaramente porta ad una maggiore consapevolezza da parte dei progettisti e dei tecnici nella progettazione, nella realizzazione e nella manutenzione di schemi impiantistici che, soprattutto in caso di guasto di uno o più elementi dell'impianto, siano in grado di garantire delle prestazioni consone ma che allo stesso tempo possano permettere una manutenzione sicura per gli operatori e non solo.

1.2 L'importanza degli schemi funzionali e dei componenti in un impianto elettrico per l'affidabilità

Come si è sottolineato in precedenza, per la realizzazione di un impianto elettrico che garantisca livelli di fidatezza consoni è necessario che i progettisti studino e progettino degli schemi elettrici di potenza adeguati così come è necessario installare dei prodotti e dei sistemi che abbiano dei requisiti di sicurezza funzionale.

Per quanto concerne la sicurezza e l'affidabilità dei componenti di un sistema elettrico, le normative IEC 61508 e IEC 61511, forniscono degli standard internazionali per la sicurezza funzionale di apparecchiature elettriche, elettroniche o elettroniche programmabili. Questa norma internazionale ha inoltre lo scopo di quantificare tramite i SIL (*Safety Integrity Level*) le prestazioni di determinate funzioni di sicurezza di un componente.

In relazione all'affidabilità o fidatezza degli schemi elettrici di potenza, non è presente in normativa nessuna modalità di analisi o di valutazione sia in termini quantitativi che qualitativi. L'argomento, introdotto nel seguente capitolo, viene trattato dallo standard IEEE 3006.5 che indica delle buone pratiche, per progettisti e addetti ai lavori, per condurre delle analisi sulla fidatezza di schemi elettrici basati su calcoli probabilistici. Si analizzeranno però altri due metodi di classificazione di cui uno sviluppato a livello nazionale (*Cap. 2.3*) ed un altro statunitense valido per la progettazione di schemi elettrici a servizio di Data center (*Cap. 2.2*).

1.2.1 IEC 61508: Standard per la sicurezza Funzionale di Sistemi di Sicurezza

La sicurezza è la condizione per cui non è accettabile la presenza di un rischio o di un infortunio per le persone. Sensori per la rilevazione di fumo che permettano di attivare un impianto antincendio, così come sistemi di chiusura automatici delle porte di un treno oppure un sistema di messa a terra di una presa elettrica che potrebbe causare rischio di folgorazione, sono solo alcuni degli esempi che utilizzano strumenti elettronici per garantire la sicurezza delle persone, di grosse infrastrutture, di valori economici e ambientali. È importante, quindi, ottenere dei sistemi e dei dispositivi che non hanno il compito di evitare un eventuale guasto ma, piuttosto, di attivarsi e funzionare automaticamente al fine di ridurre l'impatto e le conseguenze che lo stesso potrebbe causare.

Lo standard IEC 61508 ha come oggetto i sistemi di sicurezza per la protezione di impianti o processi industriali che vengono installati nel momento in cui, in caso di malfunzionamento dello stesso, esiste un rischio potenziale per le persone o per l'ambiente. Questi sistemi hanno quindi il solo scopo di rendere sicuro l'impianto in caso di malfunzionamento. Lo standard internazionale IEC 61508 disciplina l'intero ciclo di vita dei prodotti e dei sistemi elettrici, elettronici o elettronici programmabili e, così come la IEC 61511, definisce un metodo più tecnico e scientifico nella formulazione delle specifiche e nella progettazione, una definizione di rischio più precisa, una progettazione dei sistemi di prevenzione più valida ed aspetti legati all'utilizzo e alla manutenzione degli stessi.

Lo standard si basa su due concetti fondamentali:

- L'uso dei cicli di vita di sicurezza "*safety lifecycle*"
- Livelli di integrità della sicurezza "*safety integrity levels*"

Il primo ha la funzione di definire, a partire dalla progettazione fino alla dismissione dell'impianto, tutti i processi e le fasi necessarie allo sviluppo e alla realizzazione di un piano di sicurezza che diventi esecutivo e funzionale. Il piano di sicurezza va, quindi, seguito durante tutto il ciclo di vita dell'impianto con documentazione appropriata e in modo che eventuali modifiche che si realizzano nel corso della vita dell'impianto seguano la via della programmazione, esecuzione, documentazione e validazione.

I SIL (*safety integrity levels*) sono indicatori delle prestazioni di una determinata funzione di sicurezza e ci sono 4 livelli definiti dallo standard IEC 61508: dal SIL 1 che indica il più basso livello di integrità della sicurezza, al SIL 4 che risulta essere il più alto. Per definire il livello SIL di un prodotto è necessario condurre un'analisi dei rischi e pericoli di processo che si basa sul valore di riduzione del rischio (RRF). Questo indica di quanto è necessario ridurre il rischio per portarlo ad un livello accettabile.

FUNZIONAMENTO IN MODO SU DOMANDA		
Livello di integrità di sicurezza (SIL)	Obiettivo di probabilità media di guasto su domanda	Obiettivo di riduzione del rischio
4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$> 10\ 000$ to $\leq 100\ 000$
3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$> 1\ 000$ to $\leq 10\ 000$
2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	> 100 to $\leq 1\ 000$
1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	> 10 to ≤ 100

Figura 2. Tabella livelli SIL con relativo valore di probabilità media di guasto per domanda e fattore di riduzione del rischio

Il valore di riduzione del rischio si ricava dall'espressione del PFDavg (probabilità media di guasto) che indica la probabilità media che un sistema, progettato per prevenire un incidente, fallisca quando ne venga richiesto l'intervento. Il calcolo del valore di PFDavg, fondamentale per quantificare l'affidabilità e la disponibilità di un sistema, è strettamente dipendente dal valore del rateo di guasto (λ). Il rateo di guasto è dato dal reciproco del valore di MTTF (*Mean Time to Failure*) ovvero del tempo medio che trascorre tra due guasti funzionali successivi.

La relazione tra il PFDavg e il valore di RRF può essere espressa secondo la relazione:

$$RRF = \frac{1}{PFDavg}$$

Il concetto di probabilità media di guasto deriva da quella che viene definita *disponibilità* di un sistema. La *disponibilità (availability)* che indica la probabilità che esso funzioni in un determinato istante di tempo può essere espresso dalla seguente relazione:

$$Disponibilità = \frac{\text{tempo operatività}}{\text{tempo operatività} + \text{tempo di riparazione}}$$

Un buon dispositivo avrà quindi un valore della disponibilità molto vicina ad 1.

Come accennato in questo paragrafo, è necessario un approfondito studio del funzionamento di un sistema o di un componente basato su concetti ben specifici quali affidabilità, disponibilità, MTTF (*Mean Time to Failure*), MTTR (*Mean Time to Repair*), rateo di guasto così come modelli di analisi basati ad esempio su diagrammi a blocchi per quantificare il livello di affidabilità. Queste sono solo alcune delle conoscenze necessarie per assegnare un livello di sicurezza (SIL) ad un elemento che si basa quindi su teorie e di calcoli molto solidi e specifici.

Tutte le aziende sono tenute, in funzione delle disposizioni legislative in materia (DPR 547/55, DPR 303/56, D.Lgs. 626/94, D. Lgs. 494/96...) a rispettare principi generali di prevenzione in materia di sicurezza e salute. Uno degli aspetti fondamentali in questo campo è la sicurezza funzionale dei prodotti stessi, specie se utilizzati in applicazioni di sicurezza.

Per questi prodotti e sistemi, sta diventando sempre più utilizzata la norma IEC 61508 che è applicabile ai più svariati settori industriali, dal settore dell'industria di processo (ad esempio chimico e petrolchimico), ai macchinari, al settore dei trasporti (e sono già uscite alcune norme specifiche di settore, come la IEC 61511 per l'industria di processo, e la IEC 62061 per i macchinari).

1.2.1.1 UNI EN ISO 13849-1. Sicurezza del macchinario – Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza.

L'aspetto della sicurezza di un impianto così come l'individuazione di livelli di prestazione richiesti è un aspetto che viene analizzato anche per le *parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza*¹ (SRP/CS), incluso il software, dalla UNI EN ISO 13849. La presente norma propone un procedimento di progettazione della macchina (ISO 12100) al fine di conseguire obiettivi di sicurezza. Si fa quindi riferimento alla progettazione di comandi o dispositivi di protezione di modo da ridurre i possibili rischi per persone e cose. La norma impone che per ogni funzione di sicurezza che deve essere svolta da una SRP/CS deve essere determinato un livello di prestazione richiesto (PL_r) che deriva dalla valutazione del rischio precedentemente svolta. Il *livello di prestazione* fa riferimento all'entità della riduzione del rischio a carico delle parti del sistema di comando legate alla sicurezza. Più sarà alto il livello di sicurezza richiesto più PL_r dovrà essere alto. Nella tabella seguente si rapportano i livelli di PL con i livelli SIL affrontati nel paragrafo precedente.

EN ISO 13849-1 Performance Level (PL)	Average probability of a dangerous failure per hour [1/h]	EN 62061 Safety Integrity Level (SIL)
a	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	no special safety requirements
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$	1
c	$\geq 10^{-6}$ to $< 3 \times 10^{-6}$	1
d	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$	2
e	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$	3

Figura 3. Tabella dei livelli di prestazione (PL) con probabilità media di guasto oraria e rapporto con livelli SIL

¹ Nel cap. 3, paragrafo 3.1.1 della UNI EN ISO 13849-1 vengono definite come *“parti di un sistema di comando che rispondono a segnali in ingresso legati alla sicurezza e generano segnali in uscita legati alla sicurezza”*.

1.2.2 L'affidabilità di uno schema funzionale

Lo schema elettrico di alimentazione di un impianto, principalmente in ambiti industriali o in caso di edifici strategici come ospedali, aeroporti e data center, deve poter soddisfare le richieste di potenza sia in casi ordinari ed anche in caso di anomalie, malfunzionamenti o manutenzione. Partendo dall'idea dell'impossibilità di avere un sistema elettrico capace di assicurare le potenze richieste in qualsiasi condizione, è necessario identificare le conseguenze che un eventuale mal funzionamento o mancanza di potenza da parte del sistema elettrico possono avere sul funzionamento dell'impianto che servono.

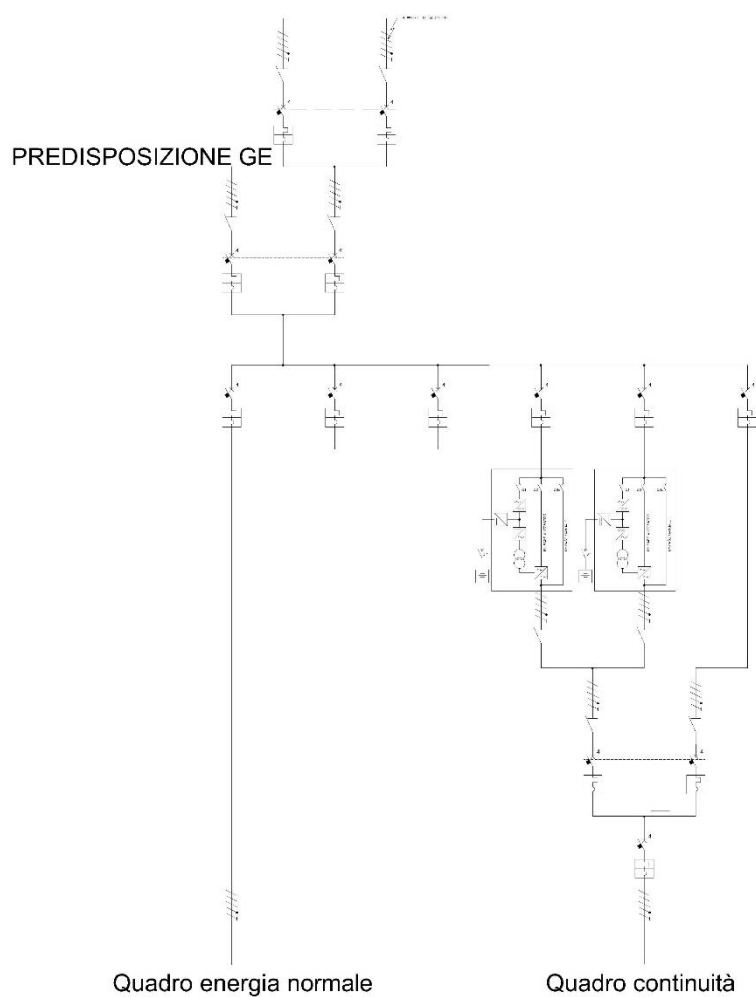


Figura 4. Esempio di schema elettrico di potenza con differenziazione tra rete normale e rete sotto continuità

In caso di guasto del sistema elettrico, infatti, si possono verificare problemi non solo legati alla non completa produzione dell'impianto ma anche ai sistemi di protezione e sicurezza dello stesso. Il sistema elettrico, per impianti di questo tipo, in base alle diverse esigenze che si intende

soddisfare, oltre che garantire il funzionamento ordinario potrebbe dover assicurare un funzionamento ridotto al fine di ridurre al minimo i danni sulla produzione, o un funzionamento in caso di emergenza per evitare l'usura dell'impianto così come un funzionamento di sicurezza che eviti danni anche ingenti alle persone e all'impianto stesso. In fase progettuale risulta essere molto importante definire le cause che una mancanza di alimentazione da parte del sistema elettrico causa all'impianto ed individuare così la possibilità, al fine di garantire la sicurezza e di ridurre i danni, di rinunciare ad alcuni elementi dell'impianto o comunque di attuare una certa modalità di funzionamento in caso di condizioni anomale. Risulta quindi centrale la conoscenza della tipologia di impianto che il sistema elettrico serve sempre al fine di studiare il modo migliore e più sostenibile di garantire sicurezza e riduzione dei danni

In caso di disservizio parziali del sistema elettrico, si possono individuare quegli elementi dell'impianto che, in caso di produzione del sistema elettrico di carichi ridotti rispetto al funzionamento ordinario, garantiscano un regolare funzionamento. Questi utilizzatori vengono definiti *preferenziali*.

Se il sistema elettrico incorre in un ingente danno al sistema di alimentazione di potenza (rete nazionale, gruppi elettrogeni, batterie...), quindi in una *modalità di funzionamento di emergenza*, bisogna garantire il funzionamento di specifici utilizzatori e dei loro relativi sistemi di alimentazione essenziali per la sicurezza degli impianti.

Nel caso invece un malfunzionamento del sistema elettrico e della sua alimentazione possa causare danni gravi alle persone e agli impianti come incendi, esplosioni, crolli o gravi guasti, si parla di *modo di funzionamento di sicurezza*. Questa modalità di funzionamento è certamente quella che richiede più attenzione. A tale scopo bisogna assicurare il completo funzionamento di una categoria ristretta di utilizzatori, detti *privilegiati*, che hanno funzione di controllo, di comunicazione e di sicurezza. Tra questi potremmo citare strumentazioni necessarie a mantenere sotto controllo i parametri critici di alcune parti dell'impianto (temperatura, pressione...) o sistemi di illuminazione di sicurezza o telefoni e altoparlanti.

Bisogna quindi tener conto della possibilità di una completa mancanza di alimentazione di potenza del sistema elettrico e che non sia altresì possibile fermare l'impianto.

Una volta definiti questi scenari, bisogna definire i diversi tipi di utilizzatori e di alimentazione nei vari casi.²

- *Utilizzatori ed alimentazioni ordinarie*: il loro funzionamento deve essere garantito solo per il funzionamento ordinario e non in caso di guasti o malfunzionamenti;
- *Utilizzatori ed alimentazioni preferenziali*: il loro funzionamento deve essere garantito in caso di funzionamento ridotto e quindi a disservizi parziali del sistema elettrico. A tale scopo si può prevedere un'alimentazione di tipo *doppio radiale* (doppia linea di alimentazione separata che commuta automaticamente in caso di guasto di una delle due);
- *Utilizzatori ed alimentazioni essenziali*: questi devono poter funzionare regolarmente al fine di garantire una buona conservazione dell'impianto. Per ottenere questo potrebbe essere necessario collegare l'utilizzatore oltre che al sistema di alimentazione ordinaria o preferenziale (tipo rete nazionale) anche ad una alimentazione indipendente dalla prima (tipo gruppo elettrogeno). Questa seconda linea di alimentazione non è quindi influenzata dall'eventuale guasto della linea ordinaria/preferenziale;
- *Utilizzatori e alimentazioni privilegiati*: anche in condizioni eccezionali questi utilizzatori e alimentazioni devono poter funzionare. Il sistema di alimentazione degli utilizzatori privilegiati è unico e solo al loro servizio. Questo sistema di alimentazione può essere continuamente in funzione anche in caso di funzionamento ordinario oppure attivarsi tramite commutazione rapida nel caso in cui ci sia un guasto sulla linea ordinaria/preferenziale a cui è collegato l'utilizzatore stesso. Come nel caso dell'alimentazione essenziale si possono utilizzare gruppi elettrogeni o batterie come sorgenti di energia con la sola differenza che non sono solamente utilizzate come riserve e possono avere una potenza maggiore.

Nella progettazione di un sistema elettrico a servizio di impianti di una certa importanza, a seguito di questa trattazione, risulta evidente la necessità di identificare nello schema funzionale come si intende affrontare il problema dell'alimentazione. L'alimentazione elettrica, ad esempio dal sistema di rete elettrica nazionale, può essere utilizzata in caso di funzionamento ordinario, ridotto e, se lo schema funzionale prevede un'alimentazione di tipo doppio radiale, anche in caso di funzionamento di emergenza con l'eventuale ausilio di gruppi di alimentazioni di energia

² Queste categorie di utilizzatori e delle loro relative alimentazioni è stata proposta da Corbellini, G. & Tomazzoli, F. (1975). *Analisi dei sistemi elettrici industriali*. Milano: Tamburini editore.

esterne. Nel caso in cui attraverso l'alimentazione elettrica si voglia ricoprire esclusivamente le richieste ordinarie e ridotte, gli utilizzatori essenziali e privilegiati dovranno essere alimentati da macchine e dispositivi ausiliari il cui funzionamento viene sempre assicurato indipendentemente dalla disponibilità dell'alimentazione elettrica.

Come si può notare, la realizzazione di uno schema funzionale elettrico che risponda ad esigenze di natura prestazionale così come di sicurezza di persone e valori economici di una certa rilevanza, non è materia semplice. Per ottenere dei livelli di affidabilità e di sicurezza adeguati le uniche armi a disposizione del progettista, in questo specifico campo, sono la sua consapevolezza dell'importanza di queste problematiche e la sua conoscenza ed esperienza.

Nonostante tutte le normative a livello nazionale ed internazionale pongano il tema della sicurezza e dell'affidabilità in posizione evidentemente rilevante, non è tuttavia presente nessuna legge o standard che propone un metodo di valutazione quantitativo preciso e definito dell'affidabilità di uno schema elettrico di potenza.

Nel settore dell'ingegneria elettrica, o più generalmente industriale, queste problematiche sono comunque in parte trattate da altri standard o istituti privati di ricerca che, come vedremo, offrono delle modalità di valutazione della affidabilità di schemi elettrici di potenza. In materia di impianti meccanici e quindi relativi alla climatizzazione degli ambienti, il concetto di affidabilità non sembra essere una problematica particolarmente avvertita dagli addetti ai lavori. Seppure da un lato la mancanza di un sistema di raffrescamento all'interno di un comune edificio residenziale non provochi nessun rischio alla salute delle persone e nessun danno a beni materiali, andando così ad inficiare esclusivamente il comfort interno degli ambienti, d'altro lato la mancanza dello stesso può causare danni ben più gravi in termini di sicurezza e di perdite economiche in ambiti industriali (data center, ospedali, aeroporti...). Come quanto detto prima, sono definiti utilizzatori privilegiati tutti quegli apparecchi che devono funzionare anche in caso di un grave guasto dell'impianto di alimentazione, in quanto hanno funzione di controllo fondamentali per evitare danni catastrofici (materiali e immateriali). Certamente tutti gli impianti meccanici che hanno lo scopo di regolare la temperatura di un ambiente, in modo particolare del raffrescamento, ricadono in questa famiglia di utilizzatori. Nel momento in cui abbiamo a che fare con ambienti dove un forte aumento di temperatura potrebbe causare, ad esempio, l'innescò di incendi (presenza di numerose apparecchiature elettriche ovvero impianti che funzionano ad alte temperature) oppure delle condizioni ambientali interne che creano

grossi disagi alle persone (ospedale), è necessario garantire che questi impianti siano in grado di essere alimentati correttamente così come di funzionare allo stesso modo.

2. Metodi di classificazione degli schemi funzionali

A seguito di quanto esposto in precedenza, l'individuazione di strumenti pratici per classificare gli schemi funzionali (sia in ambito elettrico che meccanico) potrebbe certamente aiutare gli ingegneri nella progettazione di impianti più funzionali, più sicuri e che garantiscano livelli di affidabilità coerenti con quanto viene richiesto oltre che diffondere una maggiore cultura e consapevolezza non solo in ambito industriale, dove è già in parte diffusa, ma anche nell'ambito di contesti con meno risorse. Verranno di seguito descritti e analizzati dei possibili schemi e metodologie di classificazione degli schemi funzionali in ambito elettrico proposti a livello nazionale ma soprattutto internazionale da enti e società che si occupano di questo tipo di problematiche.

2.1 IEEE Standard 3006.5: Recommended Practice for the Use of Probability Methods for Conducting a Reliability Analysis of Industrial and Commercial Power Systems

L'IEEE, acronimo di *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, è una delle più grandi associazioni professionale internazionale di tecnici che operano nell'ambito elettrico, elettronico e informatico. Lo scopo principale dell'IEEE, sin dall'inizi del secolo scorso, è quello di diffondere lo sviluppo di tecnologie innovative ed eccellenze tecnologiche che possano migliorare la qualità della vita dell'uomo così come elevare le professionalità che operano in questi ambiti. A questo scopo l'organizzazione conta sul lavoro di numerose figure che includono, informatici, sviluppatori, fisici, medici e ingegneri e professionisti che operano nel mondo elettrico ed elettronico. Questa istituzione, tramite numerosissime pubblicazioni, riviste, conferenze annuali e tramite i suoi standard, vuole diffondere le proprie conoscenze e la propria professionalità dal mondo industriale ad un pubblico più ampio sempre al fine di cercare e studiare nuove applicazioni e teorie nella scienza elettrotecnica, elettronica, informatica, biomedica e delle telecomunicazioni.

Nel 2014 l'IEEE ha pubblicato lo standard 3006.5 dal titolo "*Pratiche consigliate per l'uso di metodi probabilistici per condurre un'analisi di affidabilità su sistemi di alimentazione industriali e pubblici*". Come dichiarato nello stesso standard, il suo scopo è quello di aiutare ingegneri che hanno poca esperienza in materia di affidabilità dei sistemi di alimentazione così come tutti

coloro che dovessero progettare un sistema di alimentazione elettrica dall'ambito pubblico a quello industriale.

Per quantificare il livello di affidabilità di un sistema di alimentazione, e quindi di uno schema elettrico di potenza, lo IEEE 3006.5 parte operando una prima revisione di concetti base del calcolo della probabilità che risultano essere la base teorica per il calcolo sull'affidabilità di uno schema elettrico. Vengono introdotti i concetti di *sample space* (spazio campionario), *event* (evento), *addition and multiplication rule of probabilities* (regole di addizione e moltiplicazione del calcolo probabilistico) e *complementation* (complementarità) che sono concetti basilari nella scienza della probabilità.

Purtroppo, generalmente, l'affidabilità (*reliability*) in ingegneria non viene intesa come una vera e propria caratteristica figlia di una progettazione accurata basata su conoscenze scientifiche specifiche. Essa ha lo scopo di garantire che un elemento del sistema svolga la funzione per cui è stato progettato e concepito nei limiti di tempo e di ambiente specificati. Questo include la progettazione di come questo elemento deve essere soggetto a manutenzione o testato durante tutto il suo ciclo di vita così come la scelta dell'architettura del sistema stesso (schema funzionale), dei materiali e di tutti i suoi componenti. Diverso è invece il concetto di disponibilità (*availability*) che indica l'abilità di un elemento di svolgere la sua funzione in un dichiarato istante di tempo. L'affidabilità quindi indica che un elemento svolga la sua funzione per un lasso di tempo ben definito; la disponibilità fa invece riferimento al funzionamento dell'elemento in un preciso istante di tempo.

Vediamo ora come possiamo definire matematicamente i concetti di affidabilità e di disponibilità di un elemento.

L'*affidabilità* può essere quantificata tramite quella che viene definita funzione di densità di probabilità (PDF). Questa funzione, per una qualsiasi variabile di tempo T, è definita come la derivata della distribuzione cumulativa F(t) ad un determinato valore di t. La funzione di densità di probabilità può essere utilizzata per rappresentare la frequenza con cui un elemento si guasta in un determinato lasso di tempo. Se siamo quindi a conoscenza dell'intervallo di tempo in cui l'elemento deve funzionare e della distribuzione temporale con cui si guasta, è possibile, integrando l'equazione sottostante per un intervallo di tempo da t a ∞ , calcolarne l'affidabilità.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

La *disponibilità*, nello standard IEEE 3006.5, si identifica matematicamente sia come la percentuale di tempo in cui il sistema è immediatamente disponibile per l'uso, sia come l'istantanea probabilità che lo stesso sistema sia immediatamente pronto all'uso. Si parla inoltre di *inherent availability* (A_i) che tiene conto del rateo di guasto (λ^3) e della media del tempo necessario per le riparazioni, e di *operational availability* (A_o) che oltre ai tempi necessari per la riparazione, tiene conto dei tempi di richiesta dei nuovi componenti, della logistica degli stessi, etc. A_i viene calcolato tramite l'espressione seguente:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

MTBF (*Mean time between to failure*) indica il tempo medio che trascorre tra tutti gli interventi di manutenzione sia di tipo ordinaria che straordinaria, mentre MTTR (*mean time to repair*) è il tempo medio di riparazione. Un buon dispositivo avrà quindi un valore della disponibilità molto vicina ad 1.

Il MTBF, storicamente, indica la distribuzione di guasto di un sistema secondo una funzione di tipo esponenziale. Si parla quindi di un tasso di probabilità di guasto costante che ha una distribuzione casuale durante l'intero ciclo di vita del sistema. Allo stesso modo il tempo medio di riparazione viene descritto tramite una funzione di tipo esponenziale. In entrambi i casi questo può apparire un metodo alquanto semplicistico ma questo è dovuto al fatto che vi è una mancanza di dati più specifici e dettagliati riguardo i tempi di guasto e di riparazione di elementi che compongono un sistema di alimentazione.

1.1.1 Equazioni di calcolo dell'affidabilità

2.1.1.1 Affidabilità per un sistema con distribuzione esponenziale

Lo standard propone ora dei metodi di calcoli per quantificare l'affidabilità di un sistema. Il primo caso, nonché quello più semplice, riguarda un sistema i cui componenti hanno una funzione di

³ Il rateo di guasto è definito come la media di numero di guasti di un componente o di un sistema per unità di tempo. Generalmente viene espresso in guasti ora (*failure/hour*) o guasti anno (*failure/year*). Il suo valore è dato dal reciproco del *MTBF*.

densità di probabilità di guasto (PDF) di tipo esponenziale nota, così come è noto il loro rateo di guasto (λ). L'affidabilità può essere quindi calcolata tramite l'espressione:

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

La caratteristica principale della distribuzione esponenziale, particolarmente diffusa nel calcolo dell'affidabilità dei sistemi, è che il tasso di guasto di un componente risulta essere costante nel tempo (ha la stessa probabilità di guastarsi durante i primi anni di funzionamento così come dopo 20 anni di operatività). Anche se questo tipo di distribuzione non è di fatto particolarmente corretta e non descrive correttamente il tasso di guasto di un componente del sistema durante il suo ciclo di vita, la funzione di densità di guasto di tipo esponenziale viene molto utilizzata in quanto più facilmente ottenibile dai dati a disposizione riguardanti l'affidabilità dei componenti di un sistema di alimentazione. Essenzialmente basta essere a conoscenza del MTBF (*Mean time between to failure*) di un componente che è facilmente calcolabile sapendo la vita utile del componente ed il numero di volte in cui si è presentato un guasto durante questo lasso di tempo.

Lo schema con cui sono collegati tra loro i diversi componenti può presentare caratteristiche differenti e di conseguenza valori diversi di affidabilità. Partendo quindi dal valore di affidabilità dei diversi componenti, calcolato tramite l'equazione (1), il livello di *reliability* di un sistema si può calcolare tramite l'utilizzo di diagrammi a blocchi detti anche RBD (*reliability block diagram*). In un diagramma RBD si specifica, per ogni componente (rappresentato tramite rettangolo nello schema), il suo valore di affidabilità (numero al di sotto del singolo rettangolo calcolato per un tempo $t= 10$ milioni di ore), il valore di λ (anche questo calcolato come numero di guasti su milioni di ore) ed anche il modo in cui i diversi componenti sono collegati tra loro (schema funzionale). Lo schema del modo in cui sono collegati tra loro i diversi componenti ha una importante ricaduta su come deve essere calcolato il valore di affidabilità dell'intero sistema.

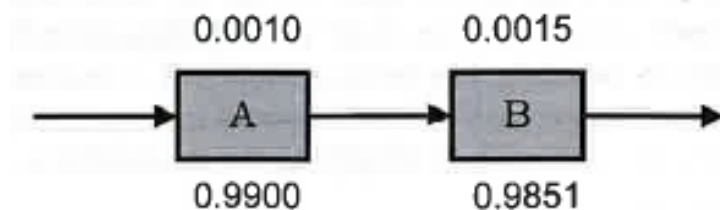


Figura 5. Esempio di diagramma a blocchi di affidabilità

2.1.1.2 Affidabilità in serie

Consideriamo un sistema composto da due componenti in serie come nel diagramma RBD sottostante.

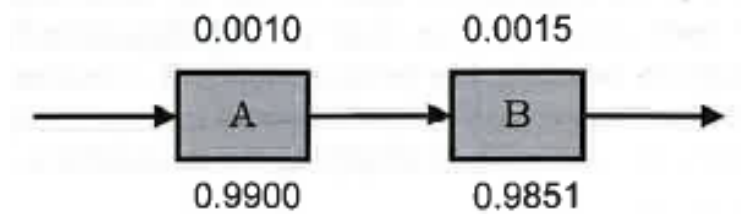


Figura 6. Diagramma a blocchi di affidabilità per un sistema composto da elementi in serie

I componenti del sistema A e B sono detti in serie il che significa che per garantire il corretto funzionamento dell'intero sistema, entrambi devono funzionare. L'affidabilità di un sistema di questo tipo non può essere mai maggiore dell'affidabilità dell'elemento più debole che lo compone. Per questo motivo, questo tipo di configurazione è considerata la più debole in termini di affidabilità.

Per calcolare l'affidabilità di un sistema composto da elementi in serie, è necessario applicare la formula (1) tenendo conto che il valore di λ è dato dalla somma del rateo di guasto del componente A e B.

$$R(t) = e^{-0.0025 \times 10} = 0.9753$$

Allo stesso modo basterebbe moltiplicare tra loro i valori di affidabilità dei singoli componenti per ottenere lo stesso risultato.

$$0.9900 \times 0.9851 = 0.9753$$

2.1.1.3 Affidabilità in caso di ridondanza

Consideriamo ora un RDB di questo tipo:

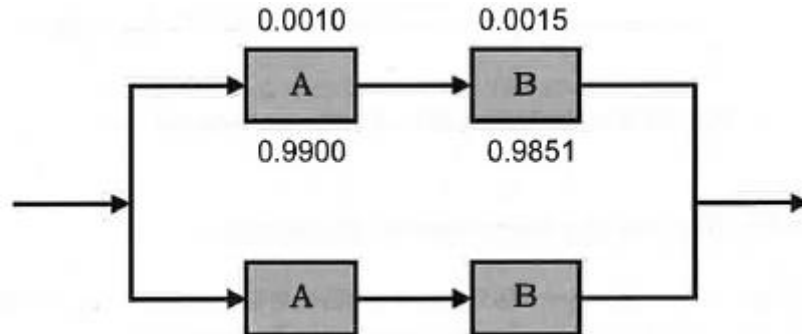


Figura 7. Diagramma a blocchi di affidabilità di un sistema caratterizzato da ridondanza

Una configurazione di uno schema di questo tipo è detta ridondante o in parallelo. Entrambi i due percorsi possibili sono composti dagli stessi due elementi (A e B). Affinché il sistema funzioni correttamente, basta che uno dei due rami del sistema sia funzionante.

L'affidabilità di un singolo ramo di un sistema di tipo ridondante è solitamente calcolata come segue:

$$R'(t) = (1 - R(t)) = 1 - 0.9753 = 0.0247$$

Si sottrae così ad uno il valore di $R(t)$ calcolato come nel caso precedente (moltiplicando i valori di affidabilità dei due elementi in serie A e B). La probabilità invece che entrambi i rami si guastino è data dalla moltiplicazione tra i valori di $R'(t)$ dei due rami (in questo caso essendo composti dagli stessi componenti, A e B, risultano essere uguali).

$$0.0247 \times 0.0247 = 0.0006$$

In fine, l'affidabilità di un sistema ridondante si calcola sottraendo ad uno il valore della probabilità che entrambi i rami si guastino.

$$1 - 0.0006 = 0.9994$$

Si nota, quindi, che in caso di presenza di due rami in parallelo con gli stessi elementi A e B, vi è una crescita del livello di affidabilità che passa da 0.9753 in caso di singolo ramo (in serie) a 0.9994 in caso di sistema ridondante.

La ridondanza di un sistema può essere ottenuta non solo mettendo in parallelo due componenti identici necessari per il funzionamento dello schema. Negli schemi seguenti presenti nello standard, si nota come al variare del numero N di componenti necessari per il funzionamento dell'impianto (in questo esempio si fa riferimento a generatori di corrente che devono garantire una potenza totale di 1000 kVA) e al livello di ridondanza presente (N + x) vi è un aumento o una diminuzione del livello di disponibilità (*availability*).

Case 1: Use 1000 kVA generators → N = 1

Number of generators	Redundancy	Requirement	Availability
1	N	1 of 1	0.99
2	N + 1	1 of 2	0.9999
3	N + 2	1 of 3	0.999999

Case 2: Use 500 kVA generators → N = 2

Number of generators	Redundancy	Requirement	Availability
2	N	2 of 2	0.98
3	N + 1	2 of 3	0.9997
4	N + 2	2 of 4	0.999996

Case 3: Use 250 kVA generators → N = 4

Number of generators	Redundancy	Requirement	Availability
4	N	4 of 4	0.96
5	N + 1	4 of 5	0.9990
6	N + 2	4 of 6	0.99998

Figura 8. Tabelle che indicano il rapporto tra numero di generatori presenti, livello di ridondanza e disponibilità

Il livello di affidabilità di un sistema ridondante viene espresso dalla seguente equazione:

$$R(t) = \sum_{x=k}^n \frac{n!}{x!(n-x)!} e^{-\lambda x t} (1 - e^{-\lambda t})^{(n-x)}$$

Dove n indica il numero totale di componenti presenti e k è il numero minimo degli stessi componenti richiesti al fine di garantire il funzionamento dell'impianto.

La ridondanza di un sistema può essere garantita secondo due tipologie di schemi differenti.

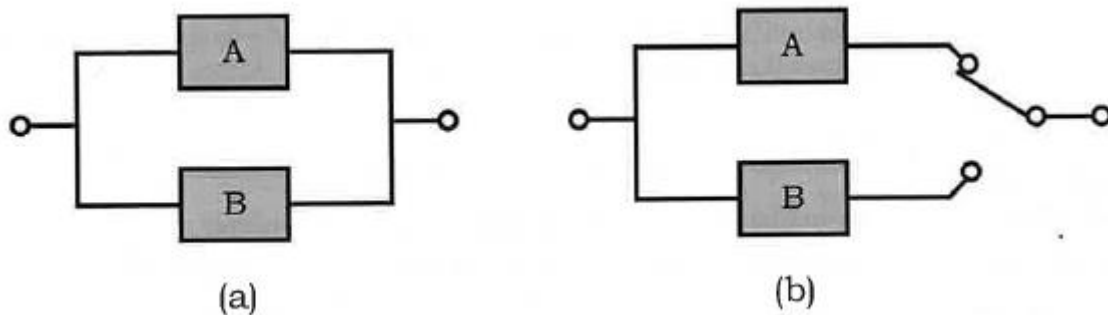


Figura 9. Diagramma a blocchi di affidabilità nel caso di "parallel redundancy" (a) e "standby redundancy" (b)

Nel caso della figura (a) entrambi i componenti A e B sono in servizio contemporaneamente ed in caso di guasto di uno dei due l'altro continuerà a lavorare senza nessun tipo di interruzione. Questa prende il nome di *Parallel redundancy* e la probabilità che si guasti è data dalla moltiplicazione del valore di $(1-R(A))$ con $(1-R(B))$ come nel caso precedentemente analizzato.

Nel caso dello schema di tipo (b) l'unico componente che è in funzione è A ed il componente B entra in funzione solo in caso di guasto dell'elemento A. l'interruttore che permette di collegare automaticamente B, in caso A non funzioni, si assume che sia operativo in caso di necessità. Questo tipo di sistema prende il nome di *Standby redundancy*.

Le probabilità di guasto di queste due tipologie di sistemi risultano avere valori numerici differenti in quanto l'indice di affidabilità dell'elemento B è differente in caso operi continuamente o si trovi in modalità standby e si attivi quindi solo in caso di guasto di A.

Risulta quindi importante, nel caso di *Standby redundancy*, studiare le possibilità di guasto non solamente dei due componenti A e B ma anche dell'interruttore che garantisce il cambio automatico del ramo attraverso cui funziona l'intero sistema. Si deve quindi considerare sia il valore della probabilità di funzionamento dell'interruttore in caso di guasto del componente A (P_s), sia la possibilità che l'interruttore stesso durante la fase operativa ordinaria (A è in funzione e B in standby). Di conseguenza il diagramma a blocchi di tipo (b) può essere rappresentato come segue:

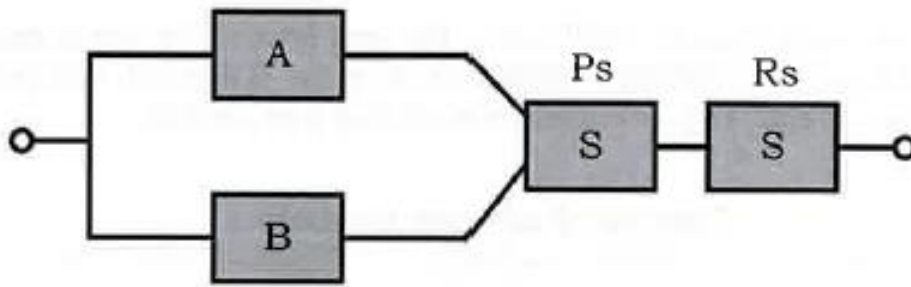


Figura 10. Diagramma a blocchi di affidabilità nel caso di "standby redundancy" con interruttore "imperfetto"

2.1.2 Metodi qualitativi per l'analisi di affidabilità e disponibilità

Lo standard IEEE 3006.5 propone diversi metodi sia per un'analisi qualitativa che quantitativa delle caratteristiche di affidabilità e disponibilità di uno schema funzionale elettrico. Di seguito, verranno introdotti i numerosi metodi di analisi elencati nello standard di carattere qualitativo. Il fine per cui vengono effettuate queste tipologie di analisi è sempre legato alla capacità dell'ingegnere di identificare le possibili cause di guasto o di mal funzionamento di un impianto e di prevenirne l'accadimento.

2.1.2.1 Fault tree analysis

La *fault tree analysis* (FTA) è una metodologia di analisi del guasto di tipo deduttiva. Essa segue un approccio di tipo "top-down" che parte quindi dall'individuazione di un determinato evento non desiderato, chiamato *TOP event*, e stabilendo tutte le cause che potrebbero scatenare questo evento. Questa analisi di tipo qualitativo può essere anche successivamente accompagnata da un'analisi quantitativa che determini le probabilità che questo evento accada.

Si parte così dalla definizione del *TOP event* (evento indesiderato) descrivendone le modalità, il luogo e il momento con cui avviene (ad esempio perdita di olio dal trasformatore, alla base del suo radiatore, durante la fase di manutenzione). Fondamentali sono anche le condizioni al contorno in cui l'elemento opera dovute ad esempio all'ambiente in cui è collocato. Il livello successivo per la costruzione dell'albero di guasto è composto da tutti quegli eventi di danno che possono causare il *TOP event*. Si passa così a identificare il cosiddetto *cut set* che è definito come l'insieme degli eventi il cui accadimento simultaneo causa l'avvenimento del *TOP event*.

L'analisi qualitativa dell'albero di guasto termina con la revisione dei *minimal cut set*⁴ classificandoli in base al loro ordine di criticità. Per un'analisi quantitativa si seguono invece i calcoli di affidabilità visti precedentemente.

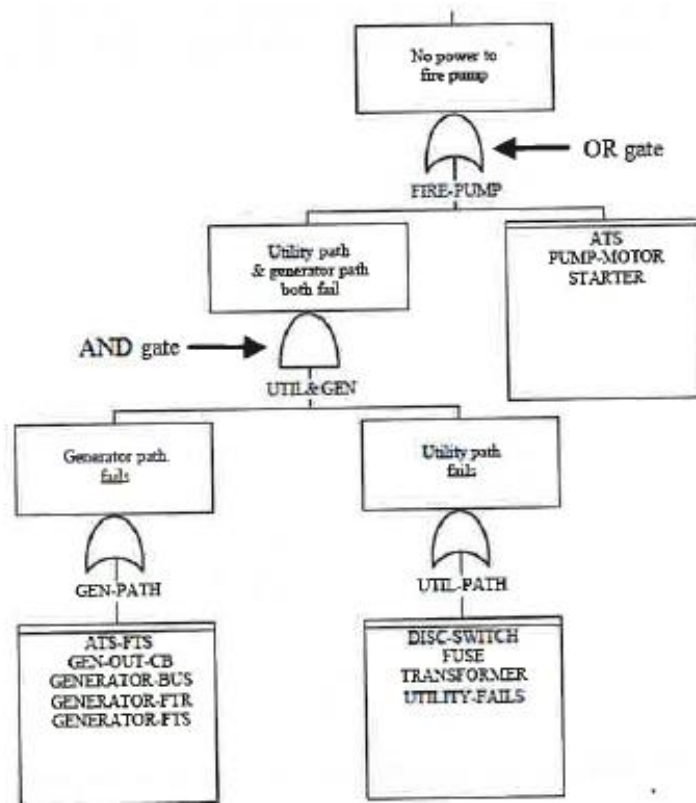


Figura 11. Esempio di diagramma di guasto ad albero di un sistema di alimentazione di una pompa antincendio

Un albero di guasto può apparire simile ad un diagramma a blocchi di tipo RBD (*reliability block diagram*) visti in precedenza. La differenza sostanziale tra i due è che il primo si focalizza sul percorso di guasto mentre il secondo sul successo dei diversi rami del diagramma. Inoltre, un diagramma RBD, a differenza di un albero di guasto, può includere distribuzioni variabili di tempo ed infine è più facile costruire un diagramma di guasto di tipo ad albero da uno di tipo RBD che viceversa.

⁴ Un *cut set* è definito *minimal* se questo non può essere ridotto senza perdere il suo stato di *cut set*.

2.1.2.2 Event tree analysis

L'analisi dell'albero degli eventi (ETA) è una procedura che mostra tutti gli esiti possibili risultanti da un evento iniziale. L'albero degli eventi mostra, partendo da sinistra verso destra, l'evento iniziale seguito da diversi nodi che indicano ognuno un evento conseguente al precedente basandosi sul fatto che questo accada o meno. È sempre possibile, terminata l'analisi qualitativa, effettuare un'analisi quantitativa della frequenza con cui le diverse serie di eventi possono accadere su base annua.

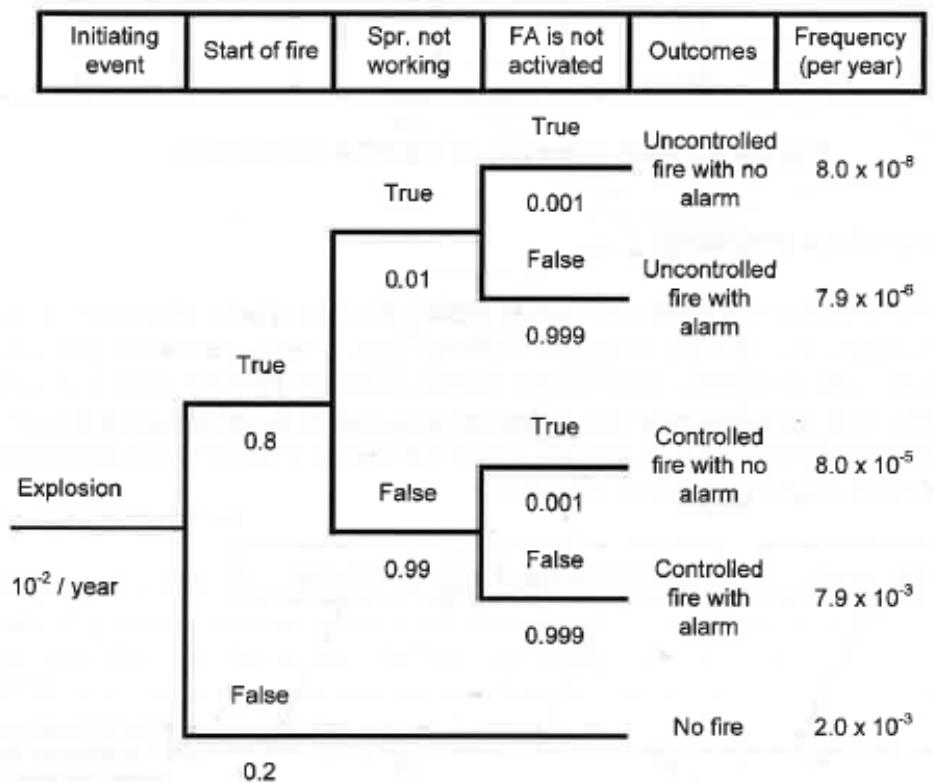


Figura 12. Esempio di diagramma ad albero degli eventi

2.1.2.3 Failure mode, effect, and criticality analysis (FMECA)

Questa metodologia ha lo scopo di identificare e analizzare tutti i possibili modi di guasto dei diversi elementi che compongono un sistema, gli effetti che questi guasti o disservizi causano al sistema stesso così come l'individuazione di come evitare questi guasti e come mitigarne gli effetti sul sistema in cui operano. La FMECA è stata una delle prime tecniche di analisi delle

modalità di guasto o più in generale di fallimento di un sistema di qualsiasi tipo. Infatti, è stata sviluppata negli Stati Uniti intorno alla metà del secolo scorso ed utilizzata in ambito militare. Tuttora la FMECA è ampiamente diffusa per definire l'affidabilità nelle fasi iniziali di sviluppo di un prodotto o di qualsiasi sistema.

Si possono seguir due differenti strade per realizzare un'analisi di questo tipo:

- a) Di tipo *bottom-up* nel momento in cui un sistema è già stato progettato e studiato anche nei suoi componenti;
- b) Di tipo *top-down* che viene utilizzato quando ci si trova nelle fasi iniziali di progettazione di un sistema e non sono stati definiti in maniera completa tutti i suoi componenti.

Description of unit			Description of failure			Effect of failure		Failure rate	Severity ranking	Risk reducing measures	Comments
Ref. No.	Function	Oper. Mode	Failure mode	Failure cause or mechanism	Detection of failure	On the subsystem	On the system function				

Figura 13. Esempio di foglio di lavoro per eseguire un'analisi di tipo FMECA

2.1.2.4 Cause and effect diagrams

Il diagramma causa e effetto è uno strumento grafico molto utilizzato dagli ingegneri del controllo qualità per identificare le varie tipologie e le cause di problematiche che potrebbero insorgere all'interno di un sistema. Questo diagramma, di facile intuizione e comprensione, aiuta nel definire le radici di una qualsiasi problematica oltre che individuarne diverse origini ed aiuta il processo di consapevolezza dei diversi ambiti disciplinari connessi ad essa. Questo tipo di diagramma non può però essere alla base di un'analisi di tipo quantitativo più specifica e completa come visto nei casi precedenti.

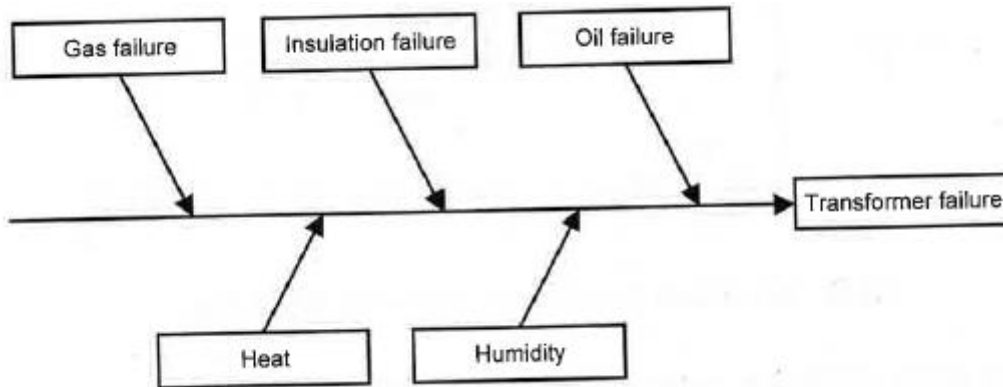


Figura 14. Esempio di diagramma causa-effetto

2.1.2.5 Bayesian belief networks

La rete Bayesiana (BN) è un metodo grafico tramite il quale si rappresentano diversi nodi che indicano variabili stocastiche, e degli archi che rappresentano le relazioni di dipendenza tra le diverse variabili e di conseguenza le distribuzioni di probabilità delle diverse variabili.

Abbreviations:

Hum_in_oil: Humidity in oil

Oil_Fail: Oil failure

Sys_Fail: System failure

Ins_pap_Fail: Insulation paper failure

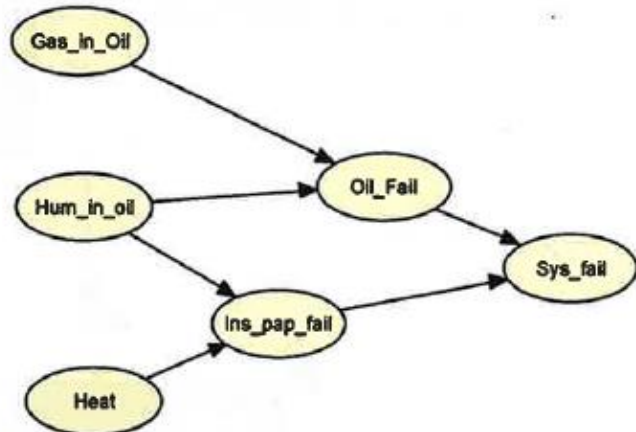


Figura 15. Esempio di rete Bayesiana

2.1.2.6 GO algorithm

Il *Go algorithm* è una tecnica di analisi finalizzata allo studio del successo di un sistema ed è stata sviluppata intorno al 1960 in ambito industriale. Lo sviluppo del metodo GO è connesso al fatto

che possiede delle caratteristiche di base che invece un sistema di tipo ad albero di guasto non ha. Queste possono essere sintetizzate in 3 punti fondamentali:

- 1) Le connessioni si modellano più o meno allo stesso modo con cui viene fatto graficamente per un diagramma ad albero;
- 2) È più facile introdurre delle modifiche che variano la configurazione del sistema;
- 3) È un modello estremamente flessibile.

La rappresentazione di tipo GO di un sistema può essere costruita direttamente nei disegni dei progettisti in quanto relativamente semplice e facile da riesaminare.

La metodologia GO utilizza un approccio di tipo *top-down* partendo dalla definizione delle funzioni richieste al sistema e successivamente, in base al livello di dettaglio richiesto, analizza ogni sistema, sottosistema o componente necessario per la sua corretta operatività.

I modelli utilizzati per un'analisi di tipo GO sono costruiti tramite software che sostituiscono alla simbologia utilizzata dall'ingegnere (valvole, generatori, interruttori...) dei simboli specifici interconnessi tra loro al fine di rappresentare la logica e le modalità di funzionamento con cui il sistema è stato progettato. In questo modo è possibile quantificare il livello di affidabilità, di disponibilità, identificare possibili guasti e classificare in base alla loro importanza tutti i componenti del sistema.

2.1.3 Metodi numerici per il calcolo dell'affidabilità e della disponibilità di un sistema

Lo studio della funzione di densità di probabilità di guasto (PDF) raggiunge il suo massimo potenziale utilizzando analisi numeriche, come la simulazione Monte Carlo, che verranno introdotte nei successivi paragrafi.

2.1.3.1 *State space*

La metodologia del cosiddetto Spazio di stato si fonda su un concetto matematico più generico che prende il nome di Catena di Markov. Le catene di Markov sono una tecnica di modellazione matematica che permette di descrivere un sistema attraverso i possibili stati che esso può

possedere. Nel caso specifico degli schemi elettrici di potenza, potremmo individuare due stati distinti con cui esso può presentarsi: *up* o *down*. L'affidabilità viene quindi quantificata tramite la probabilità di cambiamento da uno stato ad un altro in un dato lasso di tempo.

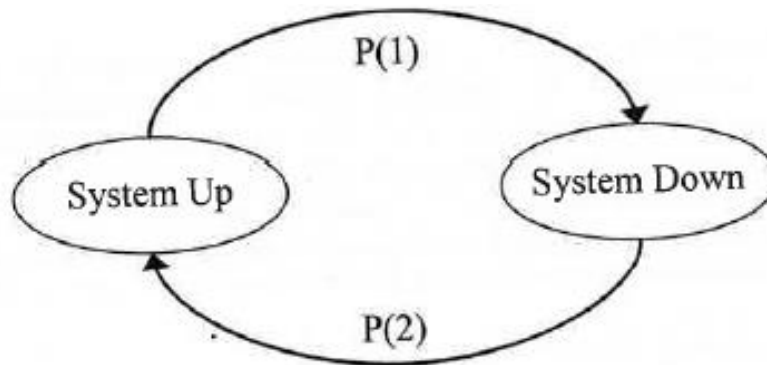


Figura 16. Esempio di modello di Markov

Da questo modello semplificato di Markov si individua con $P(1)$ la probabilità che il sistema passi dallo stato *down* (non in funzione) allo stato *up* (in funzione) e con $P(2)$ la probabilità che avvenga il contrario. Entrambi sono riferiti ad un periodo di tempo t predefinito.

Il principale obiettivo di un'analisi di affidabilità di un sistema è comunque quello di determinare la probabilità che esso si trovi nello stato *up*, cioè che sia in funzione per un determinato tempo t .

Un modello di Markov permette quindi di mostrare oltre che i due stati principali in cui può trovarsi il sistema (*up* o *down*) tutti i possibili stati intermedi tra i due che ovviamente devono essere conosciuti dal progettista. La soluzione del modello sarà quindi il rapporto tra il tempo speso dal sistema in uno stato di funzionamento ed il tempo in cui lo stesso non sarà in funzione.

Risolvere un modello di Markov, d'altro lato, però, risulta essere di facile soluzione, tramite un sistema di equazioni lineari, solo per modelli estremamente semplici. La complessità della dimensione del modello fa crescere proporzionalmente anche le difficoltà nel suo sistema di soluzione. Per poter risolvere dei modelli più articolati è necessario essere a conoscenza di metodi di analisi numerica complessi oppure si può utilizzare il metodo Monte Carlo.

2.1.3.2 Monte Carlo simulation

La simulazione Monte Carlo è la metodologia di modellazione più versatile attualmente disponibile. Questa può essere utilizzata sia per modelli semplici che per livelli di complessità più elevati oltre ad esserci una molteplicità di software per la simulazione che automaticamente svolgono l'analisi del sistema in oggetto.

La simulazione Monte Carlo opera tramite un processo iterativo dove ogni iterazione rappresenta ciò a cui un sistema potrebbe essere soggetto durante il suo ciclo di vita. Questo tipo di modellazione permette di considerare tutti gli scenari futuri possibili di un sistema in relazione alle caratteristiche di guasto intrinseche di ogni componente del sistema stesso. Tramite la simulazione è così possibile individuare il tempo in cui il sistema non sarà in funzione e i tempi necessari per la manutenzione dei singoli componenti al fine di calcolarne il livello di affidabilità e disponibilità.

2.2 Data Center Site Infrastructure. La classificazione secondo *Tier* dell'*Uptime Institute*

Uptime institute è un ente americano che propone un criterio di classificazione del grado di affidabilità degli impianti elettrici, con accenni anche agli impianti meccanici, per i data center. Una mancanza di alimentazione elettrica per infrastrutture di questo tipo potrebbe, infatti, causare danni rilevanti al sistema IT⁵ con gravi perdite di carattere economico e non solo. Questo standard definisce 4 distinti livelli (*Tier*) per classificare la tipologia di schemi elettrici in base alle richieste topologiche richieste per garantire il corretto funzionamento dei data center.

I data center, detti anche Ced (Centro elaborazione dati), sono dei locali adibiti ad ospitare server, storage, gruppi di continuità e tutte le apparecchiature che sono necessarie per governare i processi, le comunicazioni e i servizi a supporto di qualsiasi attività aziendale di modo da garantire il funzionamento continuo di qualsiasi sistema informativo.

Il corretto funzionamento di un data center dipende dalla presenza, integrazione e dal corretto funzionamento di diverse tipologie di impianti differenti (produzione di energia, raffrescamento, fonti di energia continue...). Lo standard non propone un approccio prescrittivo per la determinazione del livello o grado (*tier*) di affidabilità di un impianto a servizio di un data center ma, piuttosto, un approccio prestazionale che vedremo essere correlato ai diversi *Tier* (I, II, III, IV) definiti dallo standard.

Le differenti caratteristiche di configurazione e di ridondanza dei 4 diversi *Tier* sono sottoelencate. Con riferimento a questa classificazione è opportuno sottolineare come per componenti del sistema si intendano principalmente i generatori ausiliari che si attivano in caso di mancanza di alimentazione ordinaria da rete pubblica o in caso di guasto dell'UPS.

2.2.1 Classificazione dei *Tier*

Tier I: basic site infrastructure

- Requisiti fondamentali:
 - a) Un sistema classificato Tier I possiede un solo ramo di alimentazione senza presenza di ridondanza. Vi è uno spazio dedicato ai sistemi IT ed un UPS che

⁵ Il sistema IT (*information technology*) è l'insieme delle tecnologie utilizzate per archiviazione, trasmissione e elaborazioni di dati (reti internet, elaboratori, attrezzature per le telecomunicazioni).

garantisce comunque la corretta alimentazione del data center in caso di picchi e abbassamenti di tensione o mancanza di alimentazione.

- b) È garantito il funzionamento continuo per dodici ore dei generatori in caso di guasto del sistema di alimentazione principale
- Test di conferma delle performance:
 - a) Vi è una potenza capace a coprire i carichi richiesti dal sistema
 - b) In caso di manutenzione l'impianto necessita di essere spento causando possibili disservizi alle macchine e ai diversi utilizzatori.
- Impatti sulla fase di esercizio:
 - a) Un interruzione del funzionamento del sistema è causata da interventi pianificati e non così come l'errore umano causa un arresto del suo corretto funzionamento.
 - b) Un qualsiasi guasto di componenti o elementi dello schema di distribuzione causa un disservizio all'intero sistema.
 - c) L'intera infrastruttura deve essere spenta almeno una volta l'anno per permettere lavori di manutenzione ordinaria o, se necessario, più volte a causa di danni.

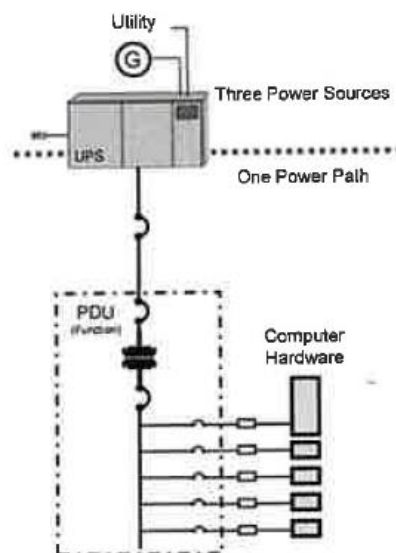


Figura 17. Esempio di schema elettrico Tier I

Tier II: Redundant site infrastructure capacity components

- Requisiti fondamentali:

- a) Il sistema di alimentazione, in questo caso, è garantito tramite un singolo ramo di distribuzione ma con presenza di componenti ridondanti. Gli elementi ridondanti sono altri generatori, UPS, batterie di accumulo, chiller, pompe, unità di raffreddamento...
- b) Sono garantite dodici ore di funzionamento dei generatori in sito (dodici ore per ogni N generatore)
- Test di conferma delle performance:
 - a) La presenza di elementi ridondanti garantisce che, anche a causa di manutenzione o guasto di alcuni componenti, il sistema garantisca la copertura dei carichi richiesti.
 - b) Il disservizio sui rami di alimentazione dell'impianto per manutenzione o altri motivi differenti provoca il suo spegnimento.
 - c) È garantita una potenza sufficiente al funzionamento dell'impianto anche in caso di sostituzione di componenti ridondanti del sistema.
- Impatti sulla fase di esercizio:
 - a) Un'interruzione del funzionamento del sistema è causata da interventi pianificati e non così come l'errore umano causa un arresto del suo corretto funzionamento.
 - b) Un qualsiasi guasto di componenti o elementi dello schema di distribuzione causa un disservizio all'intero sistema.
 - c) L'intera infrastruttura deve essere spenta almeno una volta l'anno per permettere lavori di manutenzione ordinaria o, se necessario, più volte a causa di danni.

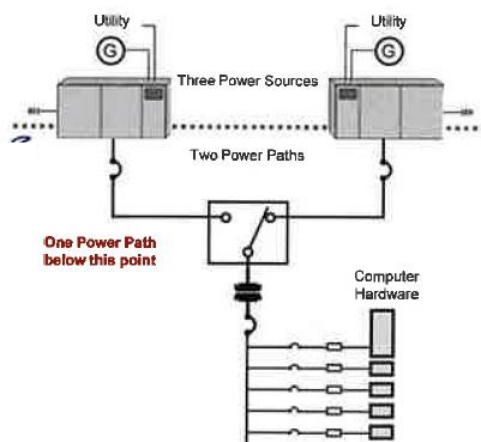


Figura 18. Esempio di schema elettrico Tier II

Tier III: Concurrently maintainable site infrastructure

- Requisiti fondamentali:
 - a) Un impianto di tipo Tier III, oltre ad essere caratterizzato dalla ridondanza dei suoi componenti fondamentali, possiede due o più rami di alimentazione indipendenti tra loro. Solo uno però è sufficiente per ricoprire i carichi richiesti (gli altri si attiveranno a seguito di un guasto del ramo di alimentazione principale).
 - b) Tutti i sistemi IT presenti possiedono una doppia alimentazione.
 - c) Sono garantite dodici ore di funzionamento dei generatori in sito (dodici ore per ogni N generatore)
- Test di conferma delle performance:
 - a) Ogni componente dei rami di distribuzione, così come elementi ridondanti presenti, possono essere rimossi e sostituiti senza impattare sul funzionamento dell'impianto e quindi sulla copertura dei carichi richiesti.
- Impatti sulla fase di esercizio:
 - a) Per guasti o mal funzionamenti imprevisti il sistema non garantisce il corretto funzionamento del data center così come potrebbe fare un possibile errore umano.
 - b) Un disservizio o guasto di componenti e elementi del sistema di distribuzione potrebbe avere conseguenze sull'alimentazione dei carichi.
 - c) Interventi di manutenzione previsti, per la presenza di elementi ridondanti e linee di alimentazione differenti, possono essere effettuati in maniera sicura.
 - d) Il rischio di disservizi durante la fase di manutenzione potrebbe essere elevato.

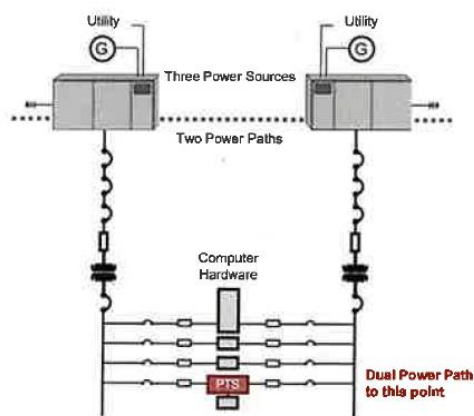


Figura 19. Esempio di schema elettrico Tier III

Tier IV: Fault tolerant site infrastructure

- Requisiti fondamentali:
 - a) Il sistema, in quest'ultima categoria, possiede differenti sistemi indipendenti e fisicamente isolati che garantiscono la ridondanza dei componenti, così come rami di alimentazioni diversi, indipendenti che siano contemporaneamente attivi durante la fase ordinaria di funzionamento del data center. Vanno quindi previsti N sistemi ridondanti e rami di alimentazione che garantiscano l'alimentazione ed il raffrescamento dopo ogni guasto.
 - b) Tutti i sistemi IT presenti possiedono una doppia alimentazione.
 - c) I rami ed i sistemi di alimentazione devono essere fisicamente separati e compartimentati in modo da evitare che un evento dannoso li coinvolga contemporaneamente.
 - d) È richiesto un sistema di raffrescamento continuo.
 - e) Sono garantite dodici ore di funzionamento dei generatori in sito (dodici ore per ogni N generatore).
- Test di conferma delle performance:
 - a) Un singolo guasto ai componenti o sistemi di alimentazione e generatore non causa alcun disservizio al data center.
 - b) L'impianto è dotato di un sistema di controllo automatico che garantisce la copertura dei carichi critici anche in caso di guasto.
 - c) Ogni elemento e componente del sistema può essere rimosso senza inficiare la copertura dei carichi critici.
 - d) Vi è una potenza sufficiente anche in caso di rimozione di elementi ridondanti o rami di alimentazione.
- Impatti sulla fase di esercizio:
 - a) Il sistema non interrompe le sue funzionalità in caso di un singolo evento dannoso non preventivato.
 - b) La copertura dei carichi critici è garantita durante qualsiasi fase di manutenzione.
 - c) Interventi di manutenzione previsti, per la presenza di elementi ridondanti e linee di alimentazione differenti, possono essere effettuati in maniera sicura.

- d) Durante la fase di manutenzione, mentre alcuni componenti ridondanti o rami del sistema sono disattivati, il rischio di disservizio è maggiore in caso dovesse subire danni la parte restante funzionante del sistema.
- e) L'attivazione di allarmi antincendio o sistemi di protezione attiva al fuoco o spegnimenti in caso di emergenza potrebbero causare disservizi.

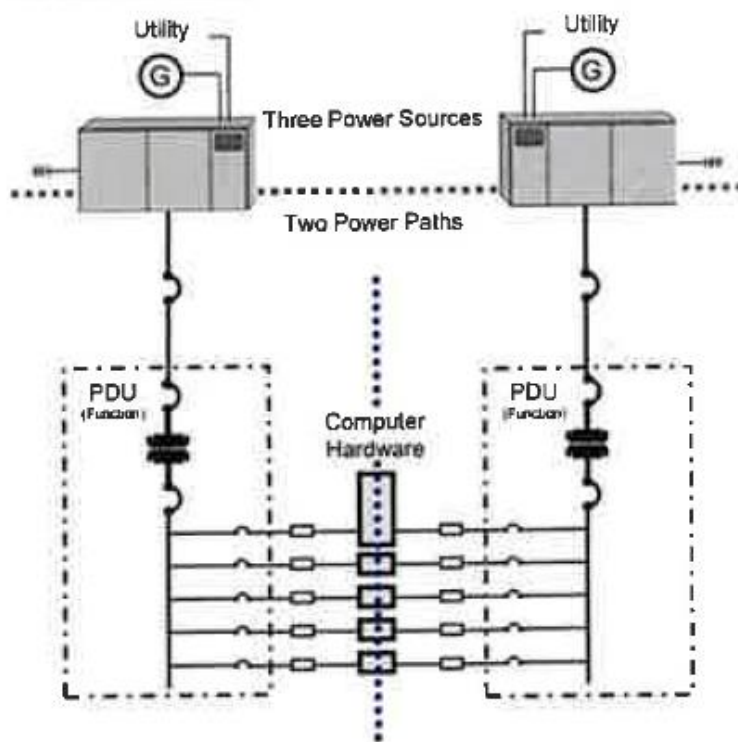


Figura 20. Esempio schema elettrico Tier IV

Di seguito una tabella riassuntiva dei quattro diversi Tier e delle loro caratteristiche principali.

	TIER REQUIREMENTS SUMMARY			
	TIER			
	I	II	III	IV
Active Capacity to support IT Load	N	N+1	N+1	N after any Failure
Distribution Paths	1	1	1 active + 1 alternate	2 simultaneously active
Concurrently Maintainable	No	No	Yes	Yes
Fault Tolerance (Single Event)	No	No	No	Yes
Compartmentalization	No	No	No	Yes
Continuous Cooling	Load Density Dependent	Load Density Dependent	Load Density Dependent	Yes (Class A)

Figura 21. Tabelle riassuntive delle caratteristiche principali dei 4 Tier

2.2.2 Sistemi di generazione

I generatori sono considerati la principale fonte di energia del sistema. Il collegamento alla rete di distribuzione nazionale (*utility*) è invece considerata come una soluzione alternativa. Un danno sulla rete di distribuzione nazionale non è quindi considerato come un possibile danno ma piuttosto una fase operativa prevista durante la vita dell'impianto. Per questo motivo è necessario che i generatori presenti si attivino automaticamente nel caso dovesse presentarsi questo tipo di situazione. Come visto nella classificazione precedente, nei sistemi *Tier III* e *tier IV* i generatori, ridondanti, operano tutti contemporaneamente per garantire la copertura dei carichi critici e non presentano alcuna limitazione in termine di ore consecutive di lavoro (da settimane a mesi) a differenza di quanto previsto per sistemi *Tier II* o *I*. L'attivazione dei generatori (i più utilizzati sono gruppi elettrogeni alimentati a gas) può avvenire non solo in caso di guasto sull'alimentazione da rete nazionale ma anche in caso del malaugurato guasto degli UPS (gruppo di continuità).

2.2.3 Temperature di progetto di un Data center

Per il corretto funzionamento di un Data center, oltre che prevedere un sistema di alimentazione elettrica progettato secondo le potenze necessarie, è necessario studiare un sistema di raffrescamento coerente alle condizioni ambientali in cui questo opera (picchi di carichi termici) e le condizioni a cui dovrebbe operare stabilmente l'infrastruttura. Tutte le attrezzature presenti devono essere in grado di sostenere livelli di temperatura adeguati. L'*Uptime institute*, a tale scopo, suggerisce di determinare le condizioni estreme annuali di progetto, in base alla localizzazione dello stesso, basandosi sull'*ASHRAE (the American society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers) Handbook – Fundamentals*. Tramite questa procedura è possibile determinare le temperature di bulbo secco e di bulbo umido di progetto.

Le condizioni climatiche che devono essere garantite da un sistema di raffrescamento di un Data center, secondo quanto sostiene l'ente americano, dovrebbero essere desunte dalla temperatura dell'aria di ritorno dal locale stesso e le condizioni di umidità interna definite in relazione alle operazioni che vengono abitualmente svolte al suo interno. In modo particolare queste valutazioni vanno fatte per degli impianti di dimensione notevole che devono quindi poter funzionare continuativamente tutto l'anno.

Generalmente i componenti di un Data center necessitano di livelli di energia maggiori all'aumentare dell'altitudine e della temperatura ambiente con una conseguente diminuzione della loro funzionalità.

Per impianti operativi 24 ore al giorno durante tutto l'anno, utilizzare per la progettazione valori di temperatura di bulbo secco che non tengano conto del contributo di aumento di temperatura de macchinari presenti può risultare particolarmente dannoso. Se vengono superate anche solo nel 2% annuo le temperature corrette a cui un macchinario o componente deve poter operare, vuol dire che di fatto questo sarà sottodimensionato (diminuendo all'aumentare della temperatura il suo rendimento) per 175 ore all'anno. Seppure inizialmente possa sembrare un rischio poco rilevante, parlando infatti di circa poco più di una settimana all'anno, con il passare degli anni questo aumenta in maniera importante.

Un ulteriore aspetto preso in considerazione riguarda sistemi di raffrescamento ad espansione diretta⁶ tipo split la cui potenza di raffrescamento viene calcolata tenendo conto di una temperatura esterna fissa di 35 °C. Il rendimento di questo impianti e di conseguenza la loro capacità di raffreddare l'ambiente dovrebbe essere studiata anche in caso di temperature esterne maggiori di 35 °C.

All'aumentare della potenza richiesta dal data center, la necessità di un sistema di raffrescamento diventa sempre maggiore. L'unico *Tier* di questa classificazione che richiede la presenza di un sistema di raffrescamento continuo è il *Tier IV*. La richiesta di raffrescamento differisce fortemente in base alle tecnologie di impianti meccanici scelti così come all'UPS presente. Un sistema *Tier IV* deve garantire la presenza di un accumulo di energia termica (*thermal energy storage*) in grado di garantire il funzionamento continuo del sistema di raffrescamento in caso di guasto sul sistema di alimentazione elettrica e conseguente attivazione dell'UPS. Ad esempio, un sistema di raffrescamento, in caso di guasto sull'alimentazione ordinaria di corrente, si collega ai generatori presenti. Sebbene questi si attivino immediatamente dopo il guasto, il sistema di raffrescamento potrebbe impiegare fino a 15 minuti prima di riattivare il proprio ciclo frigorifero e raffrescare nuovamente l'ambiente. Per questo, i sistemi di accumulo di energia termica devono garantire il raffrescamento per una durata pari al tempo di riavvio dell'impianto meccanico.

⁶ I sistemi ad espansione diretta distribuiscono energia termica e/o frigorifera tramite l'utilizzo di un gas refrigerante non tramite acqua come nei sistemi tradizionali detti idronici.

L'ASHRAE, insieme con i maggiori produttori di sistemi IT, ha stabilito delle linee guida per *data processing environments* definendo le condizioni migliori di temperatura e umidità relativa (18-27 °C. e U.R. 20-80%) di immissione in questa tipologia di ambienti. Da prove effettuate dall'*Uptime institute* per un locale computer con carichi di 6 kW/ si è notato come la mancanza di un sistema di raffrescamento o di ricambi di aria provoca un superamento delle caratteristiche ottimali di temperatura e U.R. sopra citate già a partire dai 60 secondi.

2.3 Classificazione degli schemi elettrici di potenza

A livello nazionale nella rivista ufficiale dell'AEIT (Associazione italiana di Elettrotecnica, Elettronica, Automazione, Informatica e Telecomunicazioni) del 2015 sono stati pubblicati i lavori presentati durante il Convegno nazionale AEIT 2014. Tra questi "La classificazione degli schemi elettrici di potenza proposta" (Corbellini, U., 2014) che si basa sulla relativa "fidatezza", secondo sette categorie cui assegnare determinati punteggi, per acquisire elementi sulla qualità dei sistemi elettrici.

La classificazione suggerita parte dall'idea che il sistema elettrico, ed in modo particolare l'alimentazione elettrica, è alla base del funzionamento di ogni sistema impiantistico compresi impianti tecnologici, speciali e di sicurezza.

Questo tipo di classificazione si basa su sette categorie differenti e, al fine di valutare la fidatezza di uno schema, vanno valutate nello stesso ordine con cui sono disposte nella tabella sottostante. Nel caso una delle categorie non fosse valutabile non è possibile procedere con quella successiva.

	Categorie		Criteri di classificazione
1	Guasti elettrici	α	Indipendenza topologica dei rami e fidatezza dei componenti
2	Temperatura ambiente	β	Indipendenza topologica dei rami e fidatezza dei componenti
3	Incendio	γ	Indipendenza topologica dei rami e fidatezza dei componenti
4	Sisma, alluvione	δ	Pericolo, vulnerabilità e esposizione
5	Sostenibilità	ϵ	Efficienza
6	Fattore umano	ζ	Manutenzione e formazione
7	Sicurezza (Security)	η	Accessibilità per gli operatori e inaccessibilità al sabotaggio

Figura 22. Tabella delle sette categorie dei criteri di classificazione

La classificazione qui proposta prende spunto da quella descritta precedentemente sviluppata dall'*Uptime Institute* valida per i data center ponendo particolare attenzione al concetto di ridondanza di un sistema. Si sottolinea infatti come la ridondanza di un sistema non è sempre indice di maggiore affidabilità a meno che essa non sia accompagnata al concetto di *Indipendenza topologica* (indipendenza da cause comuni di guasto) e che comunque tutti i componenti del sistema abbiano livelli certificati di affidabilità come i quattro livelli SIL proposti dalla IEC 61508. Questo concetto rende quindi gran parte delle soluzioni proposte dall'*Uptime Institute* poco affidabili rispetto a quanto viene sostenuto. La classificazione secondo *Tier* reputa la sola ridondanza di un componente (generalmente si fa riferimento ai generatori del sistema) un fattore di maggior pregio indipendentemente dal fatto che i due generatori, posti così in parallelo, non siano indipendenti da cause comuni di guasto. In modo particolare si potrebbe sostenere che due elementi posti in parallelo non garantiscono livelli di affidabilità adeguati in quanto in caso di guasto di uno dei due il circuito non potrebbe chiudersi correttamente garantendo l'alimentazione del sistema ma, piuttosto, causare lo spegnimento anche dell'altro generatore ausiliario.

Ognuna delle sette categorie può ottenere quattro diversi punteggi in base alla classe (assimilabili ai quattro differenti *Tier*) come visibile in tabella.

	Categorie		Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
1	Guasti elettrici	α	(4/4) 1.00	(3/4) 0.75	(2/4) 0.50	(1/4) 0.25
2	Temperatura ambiente	β	(4/4) 1.00	(3/4) 0.75	(2/4) 0.50	(1/4) 0.25
3	Incendio	γ	(4/4) 1.00	(3/4) 0.75	(2/4) 0.50	(1/4) 0.25
4	Sisma, alluvione	δ	(4/4) 1.00	(3/4) 0.75	(2/4) 0.50	(1/4) 0.25
5	Sostenibilità	ϵ	(4/4) 1.00	(3/4) 0.75	(2/4) 0.50	(1/4) 0.25
6	Fattore umano	ζ	(4/4) 1.00	(3/4) 0.75	(2/4) 0.50	(1/4) 0.25
7	Sicurezza (Security)	η	(4/4) 1.00	(3/4) 0.75	(2/4) 0.50	(1/4) 0.25

Figura 23. Tabella delle classi e punteggi di valutazione per ogni categoria

Si utilizza così l'indice τ_i per esprimere il punteggio di ognuna delle sette categorie i -esime che sarà ottenuto combinando i valori dei parametri precedentemente quantificati (α , β , γ , δ , ϵ , ζ , η). Tanto più la classificazione procede verso più categorie, maggiore sarà il livello

di fidatezza del sistema analizzato anche se sono previste delle penalizzazioni alla categorie antecedente nel caso in cui le successive dovessero trovarsi in una classe più bassa (tipo classe I).

Per poter ottenere un punteggio di questo tipo è necessario svolgere delle valutazioni critiche e di pianificazione sia in fase di progetto che in fase di esercizio dell'impianto ma ancora più importante la redazione di specifiche tecniche, validazione del progetto, verifiche in fase di progettazione e di collaudo e modalità di operatività e manutenzione durante la fase di esercizio al fine di garantire un livello di qualità e di affidabilità dell'impianto durante tutto il suo ciclo di vita.

2.3.1 Guasti elettrici α

Per garantire un buon livello di fidatezza di uno schema elettrico sono necessarie una accurata progettazione del sistema stesso così come l'utilizzo di componenti che abbiano livelli di affidabilità adeguati. Troppo spesso però ci si imbatte in errori di carattere progettuale a causa di cattive pratiche di progettazione e di conseguenza l'affidabilità di un sistema elettrico è sempre più spesso affidata al solo livello di fidatezza e di qualità dei suoi componenti. Vengono di seguito elencati i criteri secondo cui assegnare un determinato punteggio alla categoria dei guasti elettrici α .

- **Classe IV**, $\alpha=0,25$. Il sistema è dotato di un solo ramo di alimentazione o più rami (presenza quindi di ridondanza) che però non sono caratterizzati da indipendenza da cause comuni di guasto. A causa di interventi di manutenzione di tipo ordinario o straordinario o anche per guasti dei componenti, l'intero sistema non è in grado di funzionare correttamente (*colli di bottiglia*).
- **Classe III**, $\alpha=0,50$. Anche in questo caso il sistema prevede un unico ramo di alimentazione o più rami non caratterizzati da indipendenza topologica ma, diversamente dalla classe IV, i componenti, soprattutto quelli di fondamentale importanza per il funzionamento a regime del sistema elettrico (generatori, commutatori...), sono caratterizzati da livelli di affidabilità e disponibilità noti e definiti (ad esempio tramite classificazione SIL). Così come per la classe precedente, a causa di

guasti o interventi manutentivi il sistema non è in grado di rispondere alle esigenze di progetto.

- **Classe II**, $\alpha=0,75$. Per rientrate in questa classe il sistema deve prevedere oltre che una classificazione del livello di affidabilità dei componenti, anche la presenza di uno o più rami di alimentazione indipendenti e doppi congiuntori sulle eventuali sbarre in parallelo. Ogni ramo di alimentazione è quindi indipendente dagli altri sia a monte (sorgenti) che a valle (utilizzatori) garantendo una connessione continua alla rete di distribuzione pubblica. I due rami però non sono caratterizzati da indipendenza topologica e quindi si possono presentare disservizi a causa di guasti che compromettono la copertura dei carichi critici.
- **Classe I**, $\alpha=1$. Per ottenere la classe più alta è necessario che il sistema sia alimentato da almeno due rami (ridondanza con $N > 2$) caratterizzati da indipendenza da cause comuni di guasto oltre che possedere dei componenti con livelli di fidatezza classificati e analizzati. Anche in caso di guasto di uno dei due rami, il sistema è in grado di ricoprire i carichi critici e quindi sono necessarie fonti di alimentazione di energia differenti oltre la distribuzione pubblica. Il livello di affidabilità di questa classe è chiaramente fortemente dipendente dal tipo di commutazioni presenti (vedi la valutazione dell'affidabilità riportata dallo standard 3006.5 per sistemi caratterizzati da ridondanza).

2.3.2 Temperatura β

I livelli di temperatura di locali in cui sono presenti accumulatori o sale apparati (data center) devono essere ben definiti e verificati per evitare danni, in alcuni casi anche molto gravi, al sistema elettrico a causa di sovratemperature. L'alimentazione elettrica degli impianti tecnologici atti al raffrescamento di questi ambienti è quindi la caratteristica fondante di questa categoria. Le quattro classi vengono di seguito descritte.

- **Classe IV**, $\beta=0,25$. Il sistema di raffrescamento presenta un solo ramo di alimentazione o più rami non caratterizzati da indipendenza topologica. I componenti del sistema non sono stati soggetti a studi di affidabilità.
- **Classe III**, $\beta =0,50$. Il sistema di alimentazione presenta le stesse caratteristiche della classe precedente ma con valutazione dell'affidabilità dei suoi componenti.

- **Classe II**, $\beta = 0,75$. In questa classe oltre aver determinato l'affidabilità dei diversi componenti, il sistema di raffrescamento del locale è alimentato da due o più rami indipendenti ma senza indipendenza da cause comuni di guasto.
- **Classe I**, $\beta = 1$. Questa classe presenta caratteristiche simili alla precedente ma con la sostanziale differenza che i rami di alimentazione sono caratterizzati da indipendenza topologica e rispondono automaticamente in caso di guasto (commutazione).

2.3.3 Prevenzione incendi γ

Un incendio può causare evidenti malfunzionamenti e danni ad un sistema elettrico. Per questo motivo è importante analizzare l'affidabilità dei sistemi di rilevazione incendi, dei sistemi di compartimentazione e dei dispositivi di protezione attiva al fine di mitigare i rischi legati ad una mancata alimentazione del sistema elettrico così come della sua ventilazione. Il punteggio viene assegnato secondo i seguenti principi.

- **Classe IV**, $\gamma = 0,25$. L'alimentazione del sistema elettrico ed il suo sistema di ventilazione vengono in ogni caso danneggiati in caso di incendio.
- **Classe III**, $\gamma = 0,50$. Si studia l'affidabilità di tutti i componenti critici del sistema in grado di limitare la probabilità di incendio e favorire la ventilazione del sistema elettrico. Si fa quindi riferimento a sistemi di ventilazione naturale, all'utilizzo di materiale isolante con idonee caratteristiche di reazione al fuoco, di strutture portanti di compartimentazione, sistemi di rilevazione incendio e allarmi conformi alle normative....
- **Classe II**, $\gamma = 0,75$. Per rientrare in questa classe è necessario che sia garantita la copertura dei carichi critici da parte del sistema elettrico anche in caso di interventi di manutenzione o di soccorso in caso di incendio.
- **Classe I**, $\gamma = 1$. Il sistema di alimentazione è caratterizzato da almeno due rami con indipendenza topologica ed è determinata l'affidabilità dei componenti. Il sistema elettrico quindi, in caso di incendio, deve rimanere in funzione per almeno un periodo di tempo prestabilito in fase di progetto.

2.3.4 Sisma e alluvione δ

Il sistema di classificazione, per questa particolare categoria, propone una assegnazione della classe in base ai criteri sottoelencati.

- **Classe IV**, $\delta=0,25$. Per il sistema elettrico non è stata nessuna analisi di tipo sismico o legata a rischio di alluvioni.
- **Classe III**, $\delta=0,50$. I sistemi di supporto dei componenti dell'impianto elettrico sono stati studiati in modo da avere una risposta consona a quelle che sono le accelerazioni sismiche del sito in cui è ubicato l'impianto (interazione tra le componenti dell'impianto e la struttura dell'edificio).
- **Classe II**, $\delta=0,75$. Oltre alle valutazioni effettuate per la classe precedente, bisogna considerare *l'impatto che l'intervento umano, in caso di manutenzione o soccorso, può avere in corrispondenza di un sisma o di un alluvione sui disservizi ai carichi critici*.
- **Classe I**, $\delta=1$. Il sistema elettrico, così come l'edificio in cui è situato, sono stati progettati al fine di garantire la salvaguardia dello stesso in caso di sisma o alluvione.

2.3.5 Sostenibilità ε

- **Classe IV**, $\varepsilon=0,25$. Per il sistema elettrico non è stata effettuata nessuna analisi volta ad analizzare i consumi e l'impatto ambientale dello stesso.
- **Classe III**, $\varepsilon=0,50$. Viene effettuata una valutazione sui consumi e sull'impatto ambientale che hanno i componenti principali del sistema elettrico. Per fare questo si fa riferimento al livello GM2 della norma IEC 60364-8-1⁷.
- **Classe II**, $\varepsilon=0,75$. A differenza della classe precedente, viene richiesto una valutazione rispetto al livello GM3 dello stesso standard IEC.
- **Classe I**, $\varepsilon=1$. La progettazione e le previsioni legate ai consumi energetici e all'impatto ambientale del sistema elettrico, devono avere l'obiettivo di ridurre drasticamente i

⁷ Lo IEC 60364-8-1 è uno standard internazionale che fornisce dei criteri di misurazione e progettazione di sistemi elettrici a basso voltaggio al fine di ottimizzare e diminuire i consumi di energia elettrica.

consumi e l'utilizzo di risorse come, nell'ambito dell'ingegneria delle costruzioni, viene fatto per edifici di tipo nZEB.

2.3.6 Fattore umano ζ

Questa categoria fa riferimento all'incidenza che l'intervento umano ha sul sistema elettrico sia in termini di mitigazione dei danni in caso di guasto sia in relazione ai malfunzionamenti causati da un errore umano.

- **Classe IV**, $\zeta=0,25$. Il fattore relativo all'intervento umano sul sistema, per questa classe, non è stato in alcun modo considerato per quantificare il suo livello di affidabilità.
- **Classe III**, $\zeta=0,50$. In questo caso vengono effettuate delle valutazioni, per i componenti principali del sistema, sul supporto umano in relazione al funzionamento dell'impianto come ad esempio nel caso di interventi manutentivi.
- **Classe II**, $\zeta=0,75$. Per ricadere in questa classe è necessario implementare le caratteristiche della classe III con adeguate valutazioni di addestramento degli operatori e procedure di emergenza oltre che garantire la copertura dei carichi critici anche durante la fase di manutenzione.
- **Classe I**, $\zeta=1$. Il sistema, oltre garantire le caratteristiche precedentemente specificate, deve possedere una *doppia barriera* contri i disservizi in modo da prevedere un possibile errore umano e allo stesso modo di supportare gli operatori durante le fasi di manutenzione.

L'analisi dei rischi legati a questa categoria può portare alla definizione di nuove pratiche progettuali e criteri di misurazione sull'affidabilità di un sistema elettrico oltre che ad una maggiore consapevolezza dei possibili danni creati dall'errore umano. Per fare questo faremo riferimento ad un articolo presentato durante la conferenza internazionale dell'IEEE tenutasi a Firenze nel 2016⁸. Lo scopo di questo studio era quello di individuare la combinazione di fattori

⁸ Polignani, S. & Corbellini, U., (2016), *Power System Schematics Standardization. Human factor*, IEEE, Firenze 2016

e le cause che provocano un malfunzionamento dell'impianto da parte di un operatore umano e quindi di proporre delle nuove misure di sicurezza atte a mitigare questa tipologia di rischi. Si parte quindi dall'analisi critica di un disservizio di un impianto elettrico avvenuto in Ospedale nell'Ottobre del 2012. Il guasto è avvenuto durante la fase di sostituzione della cabina della centrale. Nella figura seguente è mostrato lo schema elettrico al momento del guasto.

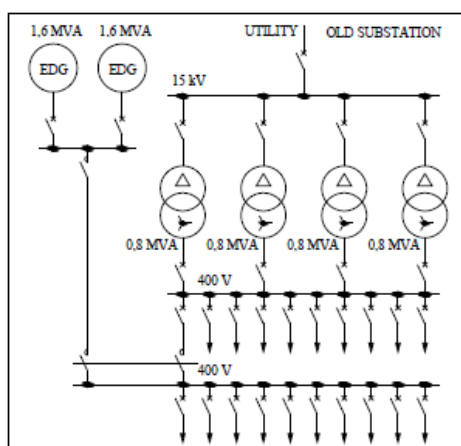


Figura 24. Schema funzionale originale del sistema con singolo ramo di alimentazione

L'alimentazione dell'impianto era garantita tramite due generatori a diesel (EDG) in parallelo di cui: uno in stand by necessario in caso di guasto del principale che, da solo, era in grado di sostenere i carichi critici del sistema. In caso di malfunzionamento del generatore principale, il sistema di controllo dell'impianto si sarebbe bloccato costringendo gli operatori a riavviarlo tramite un interruttore apposito. Non appena il sistema di controllo avrebbe avvertito il guasto del generatore principale, si sarebbe attivato il generatore ausiliario in stand by.

Il nuovo schema funzionale progettato per la centrale dell'ospedale è il seguente mostrato in figura.

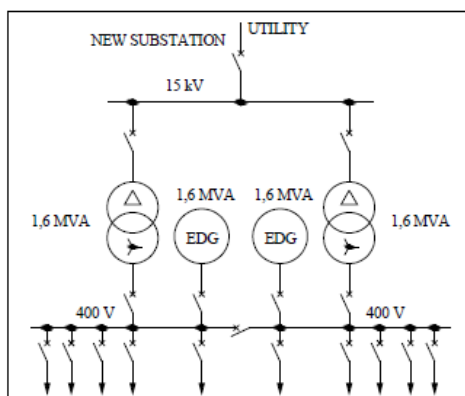


Figura 25. Schema funzionale della nuova centrale elettrica

Il nuovo schema prevede che i due generatori, ognuno dimensionato per coprire tutti i carichi richiesti dall'intero ospedale, siano entrambi operativi durante la fase ordinaria di utilizzo e quindi ognuno dei due sia in grado di portare la metà dei carichi di picco (due semi sbarre visibili nello schema) In caso di guasto di un generatore, il sistema di controllo chiude automaticamente il *congiuntore di sbarra* e permette così ad un solo generatore di ricoprire tutti i carichi.

Durante la fase di sostituzione della cabina elettrica, lo schema si presentava in questo modo.

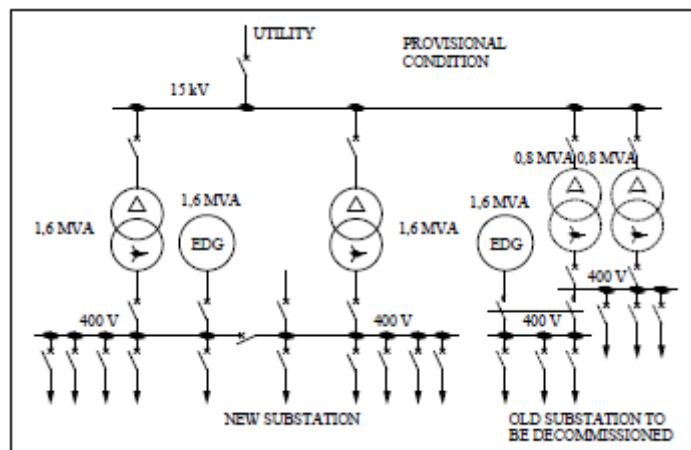


Figura 26. Schema funzionale durante la fase transitoria

Uno dei due generatori era a servizio della vecchia cabina mentre l'altro a servizio della nuova durante la fase di sostituzione.

Nel tre casi le procedure di sicurezza per garantire l'alimentazione dell'ospedale, come visto, sono differenti. Se nel primo caso era necessario che un operatore riattivasse manualmente il sistema di controllo, capace poi di avviare il generatore in stand by, nel caso della nuova cabina il sistema di controllo è in grado di chiudere automaticamente il ramo del generatore guasto e mettere a pieno carico l'altro generatore presente. Nella fase di transizione entrambe le procedure espresse sono di fatto inutili.

Il guasto è avvenuto nella fase transitoria di sostituzione della cabina elettrica. A seguito di un guasto all'alimentazione da rete nazionale (*utility*), entrambi i generatori sono entrati in funzione. Ma, nel caso del generatore a servizio della nuova cabina, il congiuntore di sbarra non si è chiuso, non alimentando così il ramo destro della sbarra, a causa di un guasto del relè di protezione⁹

⁹ I relè di misura sono i componenti essenziali di un sistema di protezione. Essi intervengono quando una grandezza elettrica che li alimenta supera il valore di taratura, disinserendo la porzione di impianto

L'operatore quindi, al fine di rialimentare parte della porzione servita dal generatore della nuova centralina, ha applicato la procedura di emergenza che era prevista per la vecchia sottostazione (spegnere e riaccendere tramite un interruttore il sistema). Questo, essendo cambiata la fisionomia dello schema dell'impianto, non ha portato alla risoluzione del problema ma, piuttosto, ha causato un disservizio all'intera parte dell'ospedale servita dal generatore della nuova cabina elettrica. Solo grazie all'attivazione dell'UPS si sono potute mantenere funzionanti le sale operatorie e le terapie intensive per oltre un'ora evitando conseguenze tragiche.

In questi casi, quindi, sarebbe necessario operare secondo criteri logici di conoscenza del funzionamento dell'impianto e non applicando in maniera meccanica le procedure consuete a cui si è abituati. Risulta evidente come però un processo decisionale di questo tipo non possa essere sempre a carico di un normale operaio sia per le sue capacità di analizzare in maniera lucida la situazione, sia per le sue conoscenze sia per l'importanza delle decisioni che deve prendere.

Lo scopo di questo studio era quindi di sottolineare l'importanza del fattore umano nell'analisi dell'affidabilità di un sistema elettrico. Purtroppo, la consapevolezza di questa tematica non è diffusa nell'ambito dell'ingegneria civile cosa che dovrebbe certamente essere maggiormente valutata soprattutto in caso di edifici strategici come ospedali o aeroporti. L'adeguata formazione degli operatori così come una progettazione più accurata dell'impianto può essere certamente d'aiuto al fine di limitare questa tipologia di rischi.

2.3.7 Sicurezza dal sabotaggio η

L'ultima categoria presa in considerazione da questo tipo di classificazione riguarda la sicurezza contro atti di sabotaggio o di matrice terroristica. Di seguito i criteri per l'assegnazione delle quattro classi possibili.

- **Classe IV**, $\eta = 0,25$. Per questa classe non sono state previste valutazioni o strategie legate al rischio di sicurezza e sabotaggio.

protetta. Le norme CEI definiscono il relè come "*l'apparecchio destinato a provocare cambiamenti di stato nei suoi circuiti elettrici di uscita quando si verificano particolari condizioni nei suoi circuiti di entrata*".

- **Classe III**, $\eta = 0,50$. I componenti critici del sistema sono accessibili alla sorveglianza e inaccessibili da parte di estranei.
- **Classe II**, $\eta = 0,75$. Il sistema che ricade in questa classe è dotato di elementi ridondanti ed è possibile svolgere attività di sorveglianza durante le fasi manutentive.
- **Classe I**, $\eta = 1$. Anche in caso di sabotaggio del sistema di sicurezza e di sorveglianza, il sistema che si trova in classe I è in grado di garantire la sua corretta operatività.

Viene di seguito riportata una tabella riportante le sette diverse categorie e le rispettive classi e possibili casi di valutazione di un sistema elettrico secondo questo tipo di classificazione.

		Classe I $1,0 < \tau_i < 0,8$	Classe II $0,8 < \tau_i < 0,6$	Classe III $0,6 < \tau_i < 0,4$	Classe IV $0,4 < \tau_i < 0,2$	No classe $\tau_i < 0,2$	Possibili casi
Indipendenza da guasti elettrici	τ_1	1,00	0,75	0,50	0,25	< 0,20	4
e dalla temperatura ambiente	τ_2	1,00	0,75	0,56, 0,50	0,38, 0,25	< 0,20	11
e prevenzione incendi	τ_3	1,00	0,75	0,56, 0,50, 0,42	0,38, 0,28, 0,25	< 0,20	26
e prevenzione sisma/alluvione	τ_4	1,00	0,75	0,56, 0,50, 0,42	0,38, 0,32, 0,28, 0,25, 0,21	< 0,20	57
e sostenibilità	τ_5	1,00	0,75	0,56, 0,50, 0,42	0,38, 0,32, 0,28, 0,25, 0,24, 0,21	< 0,20	109
e valutazione del fattore umano	τ_6	1,00	0,75	0,56, 0,50, 0,42	0,38, 0,32, 0,28, 0,25, 0,24, 0,21	< 0,20	250
e sicurezza (<i>Security</i>)	τ_7	1,00	0,75	0,56, 0,50, 0,42	0,38, 0,32, 0,28, 0,25, 0,24, 0,21	< 0,20	>1000

Figura 27. Tabella riassuntiva dei possibili valori derivati dalla classificazione di uno schema funzionale

3. La progettazione e il tema dell'affidabilità degli impianti meccanici

La progettazione di sistemi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione, che prendono il nome anche di HVAC (heating, ventilation and air conditioning), si basa principalmente sulla definizione di carichi termici e sull'esperienza dei progettisti. La definizione dei carichi termici però è figlia spesso di dati poco certi e di conseguenza le performance dell'impianto possono non essere sempre adeguate a quanto previsto in fase di progettazione. Allo stesso modo troppo poco spesso, principalmente nell'ambito degli impianti HVAC, non si affronta il problema dell'affidabilità legato alla scelta dei componenti dell'impianto ed al modo con cui essi sono collegati, il cosiddetto schema funzionale. Una progettazione differente, e quindi in grado di tener conto di questi due aspetti, può certamente condurre alla realizzazione di impianti più efficienti, più sicuri, che abbiano anche una maggiore sostenibilità in termini di consumi energetici e di costi. Gli impianti meccanici svolgono infatti una funzione centrale per l'ottenimento di gradi ottimali di comfort per le persone ma anche per garantire livelli di temperatura necessari al corretto funzionamento e alla sicurezza di macchinari e dispositivi specifici come vedremo soprattutto nel caso dei data center.

La pratica progettuale più diffusa per la realizzazione di un impianto meccanico si potrebbe tradurre nei tre passaggi seguenti:

- La definizione della potenza di picco del sistema di raffrescamento, che risulta essere più spesso quello con maggiori valori di carichi termici, viene calcolata tramite dati climatici del luogo in cui è situato l'edificio. Si applica così un fattore di sicurezza maggiorativo al valore di carico termico ottenuto dal calcolo precedente in modo da tener conto sia del grado di incertezza con cui questo è stato ottenuto e sia della presenza di perdite, ad esempio, attraverso l'involucro edilizio.
- Vengono così di conseguenza scelti il numero e la potenza dei macchinari necessari, quali ad esempio gruppi frigoriferi, pompe, torri evaporative, pozzi di falda...La scelta dei componenti è figlia spesso dell'esperienza o di formule empiriche che tengono conto delle ore di utilizzo dell'impianto durante il loro ciclo di vita.
- Si garantisce, in fine, la presenza di elementi ridondanti (*backup devices*) che garantiscano il corretto funzionamento dell'impianto anche nel caso in cui alcuni componenti e macchinari dovessero essere fuori servizio per guasti o manutenzione.

Solitamente la ridondanza è determinata seguendo la regola $n+1$, dove n è il numero di elementi determinati nel passaggio precedente.

Come si può notare da questa semplice schematizzazione del processo di progettazione di un sistema meccanico, i problemi legati all'incertezza dei carichi termici ottenuti ma soprattutto quello legato all'affidabilità sono spesso trattati con grande superficialità e poca attenzione. Come visto nei capitoli precedenti, il tema dell'affidabilità è figlio di studi che richiedono la conoscenza di numerosi dati e osservazioni riguardanti il funzionamento di componenti e macchinari che nonostante siano già abbastanza diffuse nell'ingegneria elettrica, elettronica, industriale, nucleare, petrolifera (solo per citare alcuni esempi) non sembrano essere studiati e osservati allo stesso modo per gli impianti meccanici. Una evidente prova del fatto che la "cultura" dell'affidabilità non sia ancora diffusa in questi ambiti, è data dalla mancanza di dati come λ (rateo di guasto), MTTF (*Mean time to failure*) e MTTR (*Mean time to repair*) da parte dei produttori di componenti meccanici di impianti HVAC. Per la stesura di questo elaborato si è infatti fatto richiesta ad alcuni grossi produttori del settore di ottenere dati di questo tipo per i loro prodotti ma risultano essere coperti da segreto industriale perché soggetti di indagini della ricerca e sviluppo. Mentre nel settore elettrico questo lavoro è stato fatto negli anni '70 (vedasi ad esempio i numerosi dati elencati nell' *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book)*), nel settore tecnologico il lavoro deve essere sostanzialmente ancora fatto.

Più in generale si può sostenere che nel settore edilizio e in tutti i suoi sottosistemi e prodotti non sia ad oggi riscontrabile un significativo apparato conoscitivo, di ricerca e sperimentazione legato agli aspetti di affidabilità. Altri settori industriali hanno invece da tempo metabolizzato e diffuso l'utilizzo delle teorie affidabilistiche allo scopo di ottenere prodotti sempre più performanti, sicuri e meglio gestibili. È opportuno riflettere sui motivi per cui i prodotti dell'edilizia e i suoi sub sistemi, quali gli impianti analizzati in questo elaborato, non sono attualmente comparabili a processi industriali dove l'affidabilità assume un ruolo centrale da decenni. Secondo Vittorio Manfron, già professore Ordinario di Tecnologia presso lo IUAV, sono principalmente tre le caratteristiche che differenziano i prodotti dell'edilizia da quelli industriali.

- *“La produzione in serie industriale è sempre preceduta da una fase di sperimentazione, talora molto lunga, su prototipi”*. Durante questa fase i prodotti industriali sono testati sotto determinate condizioni e questo permettere di ottenere valori di affidabilità

richiesti dai progetti già in fase di realizzazione. Questo processo di sperimentazione è invece più difficilmente realizzabile nel settore dell'edilizia.

- Una seconda difficoltà che frena lo sviluppo degli studi affidabilistici in edilizia, è data dalla lunghezza del ciclo di vita degli edifici e di molte loro parti. Essendo il ciclo di vita e di esecuzione piuttosto lungo, gli operatori del settore spostano più in là la verifica degli esiti della loro attività rendendo più difficoltosa l'acquisizione di dati e della loro variabilità nel tempo. Ne risulta così un maggiore atteggiamento di rinuncia nell'affrontare problemi di affidabilità e una visione strategica a medio-lungo termine.
- Il terzo aspetto è invece legato alla lentezza evolutiva del settore edilizio verso forme organizzative di tipo industriale.

Ulteriormente a questi aspetti, i prodotti edilizi sono soggetti ad un'estrema variabilità delle condizioni e delle modalità di impiego e funzionamento rendendo più difficoltoso un processo di modellazione e controllo cosa che però avviene, anche in condizioni più estreme, in settori industriali come quello aeronautico o automobilistico.

Infine, diversamente da altri sistemi tecnici, è diffusa la convinzione che l'affidabilità richiesta ad un componente edilizio, a maggior ragione in ambito impiantistico, possa assumere valori più bassi. I danni che derivano da un mancato funzionamento di un componente dell'organismo edilizio sono infatti spesso associati a danni funzionali ed economici di entità più o meno trascurabile e quindi legati esclusivamente al mantenimento di un determinato stato di comfort degli utilizzatori. Come si è detto, però, questo approccio non sembra essere più coerente con l'importanza strategica che ormai ricoprono gran parte delle opere civili che vengono realizzate. Una metodologia di progettazione, soprattutto in caso di edifici di una certa rilevanza strategica, che non tenga conto di queste problematiche può risultare in una consistente differenza di funzionamento dell'impianto rispetto a quanto previsto in fase progettuale così come a problematiche legate al sovradimensionamento o sottodimensionamento dello stesso. In letteratura sono presenti numerosi studi che dimostrano le differenti problematiche causate dalla mancata consapevolezza di problemi di affidabilità e di determinazione di carichi termici poco precisi. Allo stesso modo vi sono studi che propongono metodi di progettazione più sicuri che attraverso analisi probabilistiche e matematiche si pongono l'obiettivo di progettare impianti più funzionali, affidabili e sostenibili in termini di consumi energetici ed economici¹⁰.

¹⁰ Wenjie Gang, Shengwei Wang, Fu Xiao, Dian-ce Gao, (2015). "Robust optimal design of building cooling systems considering cooling load uncertainty and equipment reliability", Hong Kong.

Questa metodologia di progettazione prende il nome di *Robust optimal design* il cui obiettivo è “ottimizzare le diverse variabili della progettazione di modo che le variazioni di prestazione, basate su queste variabili e su fattori esterni, siano minime”¹¹. La progettazione di un sistema HVAC che segue queste linee guida ha lo scopo di garantire che l’impianto sia altamente affidabile sotto diverse condizioni, particolarmente per carichi parziali, e che tenga conto delle diverse variabili a cui è soggetta la progettazione e che garantisca affidabilità durante il suo ciclo di vita. Attraverso questa metodologia è possibile inoltre effettuare valutazioni di carattere economico. Lo scopo è quindi quello di quantificare il livello di affidabilità del sistema, cosa che viene raramente svolta per impianti tecnologici.

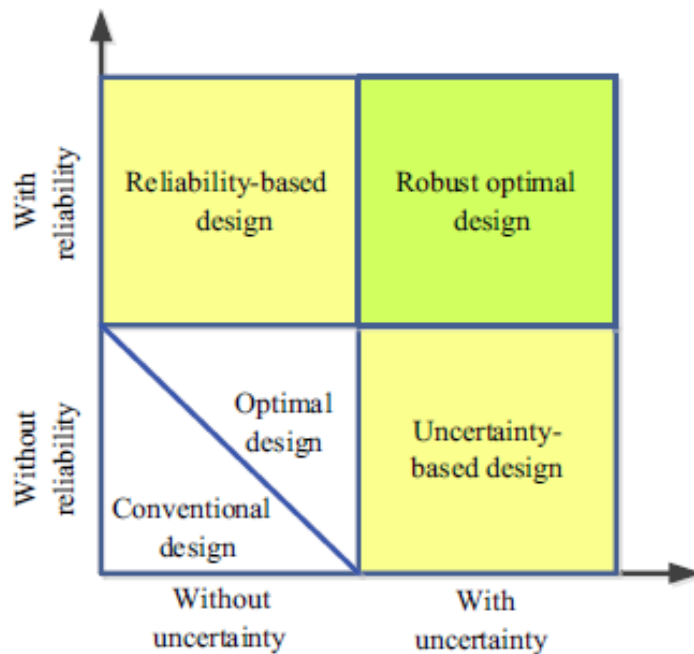


Figura 28. Rappresentazione dei differenti metodi di progettazione

Il seguente metodo di progettazione, quindi, prevede l’utilizzo del metodo Monte Carlo (2.1.3.2) per quantificare i carichi termici che sono dedotti da numerose variabili, non sempre troppo precise, quali il clima, la trasmittanza dell’involucro edilizio, fonti di carichi termici interne, ecc. Lo studio dell’affidabilità dei componenti e dell’intero schema impiantistico può essere invece effettuata tramite tre principali metodologie: *Fault tree analysis* (2.1.2.1), *reliability block diagrams* (2.1.1.1) e il metodo Markov (2.1.3.1). Per effettuare queste analisi è necessario avere

¹¹ Han H, Park T, (2004). Robust optimal design of multi-body systems. Multibody SysDyn.

a disposizione valori di λ , MTTR e MTTF in modo da ottenere un valore quantitativo del livello di affidabilità di un impianto che quindi non tenga solo conto dei suoi componenti ma anche del modo in cui essi sono collegati tra loro.

3.1 *Maintainability e Functional availability*: l'importanza della manutenzione ai fini dell'affidabilità

Il concetto di manutenibilità, dall'inglese *maintainability*, esprime *la facilità, l'accuratezza, la sicurezza e l'economicità con cui vengono svolte le azioni di manutenzione*¹². La manutenibilità si traduce quindi in termini qualitativi tramite la possibilità di effettuare interventi manutentivi di un qualsiasi dispositivo ed è valutata in termini di durata delle azioni di manutenzione. Essa risulta essere una caratteristica del progetto ed è influenzata fortemente dalla frequenza con cui devono essere effettuati gli interventi manutentivi, l'organizzazione della manutenzione, il costo degli interventi e il tempo necessario al loro svolgimento. L'aspetto legato alla frequenza con cui questi interventi devono essere effettuati è strettamente correlato al tema dell'affidabilità e quindi esprimibile in termini di rateo di guasto che, come vedremo, sarà la base per il calcolo quantitativo dell'affidabilità di un sistema (4.1). Ma la definizione quantitativa del concetto di manutenibilità dipende dal tempo necessario ad effettuare l'intervento manutentivo.

Questo aspetto di durata è correlato a quello della *Functional availability*. La *disponibilità funzionale* oltre a tenere conto del livello di affidabilità, prende in considerazione l'*operational availability* che mostra la capacità di un impianto di garantire il corretto funzionamento anche in caso di manutenzione di alcuni componenti. Sistemi che possono essere anche altamente affidabili non è detto che garantiscano la possibilità di operare interventi manutentivi senza causare grossi disservizi. Tramite la *functional availability* si è così in grado di descrivere la disponibilità di un sistema sia in caso di funzionamento ordinario che in caso di manutenzione. Sono stati a tale scopo effettuati degli studi basati su numerosi dati di impianti HVAC ottenuti da compagnie immobiliari e aziende addette alla manutenzione che per più di cinque anni hanno collezionato dati relativi a più di cento impianti HVAC con un totale di oltre 400000 ore di

¹² Blanchard, Verma, Peterson, 1995, p.1.

operatività¹³. Per poter effettuare un'analisi di questo tipo è necessario essere a conoscenza dei tempi che concorrono tra il guasto e la riparazione dello stesso che possono essere suddivisi come segue:

- MTD (*Mean time to detect*): tempo necessario per rilevare il guasto.
- *Mean decision time*: tempo necessario per decidere come operare sul guasto.
- MTTR (*Mean time to repair*)
- MFTT (*Mean function test time*): tempo necessario per effettuare prove di funzionamento.

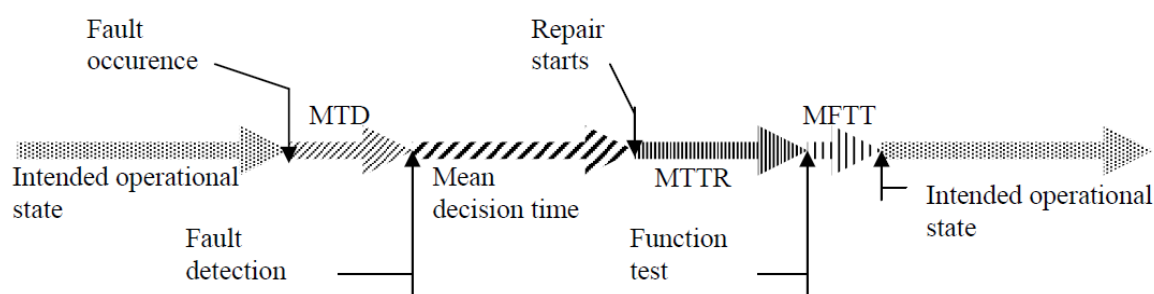


Figura 29. Diagramma di rappresentazione delle fasi necessarie alla riparazione di un dispositivo

Per poter calcolare la *disponibilità funzionale* si devono sommare i contributi di MTTR, MTD, il Mean decision time ed in fine il MFTT. Come si può notare ricorre il concetto di fattore umano già visto nel caso della classificazione degli schemi elettrici di potenza del capitolo precedente (2.3.6). La capacità e la prontezza con cui certe decisioni sono prese in caso di malfunzionamento hanno una ricaduta importante in termini di disponibilità e affidabilità dell'impianto. La valutazione dell'intervento umano ha così un valore tanto quanto ne hanno l'affidabilità dello schema impiantistico, che deve essere valutata quantitativamente, e dei suoi componenti. Il livello di *disponibilità funzionale* è così strettamente correlato alla capacità degli operatori di percepire la presenza di un guasto e dalla loro capacità di affrontarlo e correggerlo.

Per essere in grado di calcolare questo lasso di tempo si parte dalla definizione delle condizioni ambientali interne, ad esempio di temperatura, che si vogliono garantire. La definizione di queste caratteristiche, derivanti dalla progettazione dell'impianto, è correlata a numerosi fattori quali la destinazione d'uso, dati climatici, calcolo di carichi termici interni e così via. Per ognuno

¹³ S. Myrelfelt, (2004), "Reliability and functional availability of HVAC systems", Stoccolma

delle caratteristiche ambientali interne che si vogliono ottenere (temperatura, umidità, ricambi d'aria...) è possibile quantificare la *functional availability* dell'*i*-esima funzione tramite la formula seguente:

$$A_i = 1 - \frac{t_f}{t_{wt}}$$

Dove t_f indica il tempo, espresso in ore, in cui si evidenzia un mancato raggiungimento dei limiti prefissati in fase di progettazione (ad esempio se la temperatura di un ambiente è inferiore rispetto a quella prevista) e t_{wt} risulta essere il tempo totale per cui l'impianto dovrebbe garantire la copertura dello stesso limite progettuale (questo dipende dalle ore di operatività che sono richieste all'impianto). Più il valore di A_i sarà alto più le prestazioni attese dall'impianto saranno rispettate. Questa analisi richiede chiaramente la presenza di un sistema di controllo e sensori specifici per il parametro che si intende studiare oltre al tempo necessario per ottenere dati quanto più corretti possibile. Durante la fase di osservazione di questi dati è evidente come non vengano effettuate interventi di manutenzione o variazioni all'interno dell'impianto stesso e quindi può essere inteso come *decision time* allo scopo di individuare le problematiche e come si intenderà risolverle.

Le tempistiche necessarie ai manutentori per prendere decisioni in caso di guasto non sono però di facile definizione. Non è possibile definire un tempo massimo limite entro cui una decisione deve essere presa e allo stesso modo non è possibile quantificare quantitativamente questo parametro a differenza di quanto invece è possibile fare per l'affidabilità. I tempi con cui si interviene e il processo decisionale di intervento di manutenzione sono una caratteristica variabile da manutentore a manutentore. Per poter ottenere valori più o meno validi sono necessarie numerosissime osservazioni per impianti differenti e con più manutentori. Si è notato che, attraverso la disponibilità di numerosi dati forniti da gestori e manutentori di impianti HVAC, è possibile definire una distribuzione lognormale dei valori di MTTR e MTBF¹⁴. Questa funzione sembra essere la più appropriata per descrivere questi due valori a causa della grossa incertezza a cui è associato un guasto. Infatti, in un sistema HVAC, come nella maggior parte di impianti tecnologici e meccanici, non è possibile conoscere a priori in quale particolare componente del sistema avvenga il guasto e quando questo potrà presentarsi, così come per

¹⁴ S. Myrefelt, (2004), "The reliability and availability of heating, ventilation and air conditioning systems), Stoccolma

alcuni elementi sono necessari tempi maggiori per individuarne il guasto come per altri può risultare particolarmente costoso effettuare delle misurazioni e indagini più specifiche.

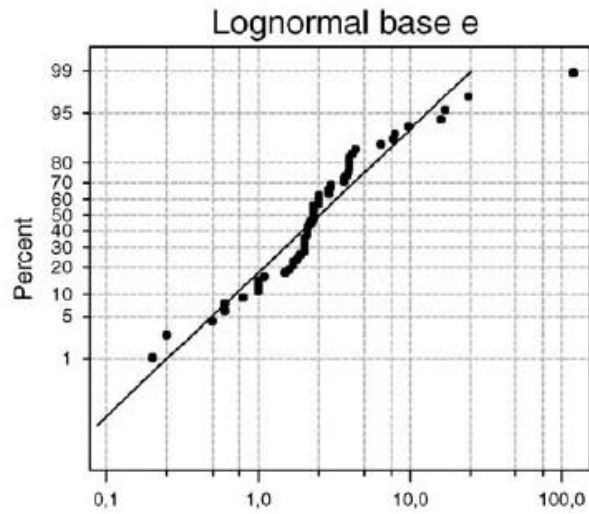


Figura 30. Distribuzione lognormale dei valori di MTTR

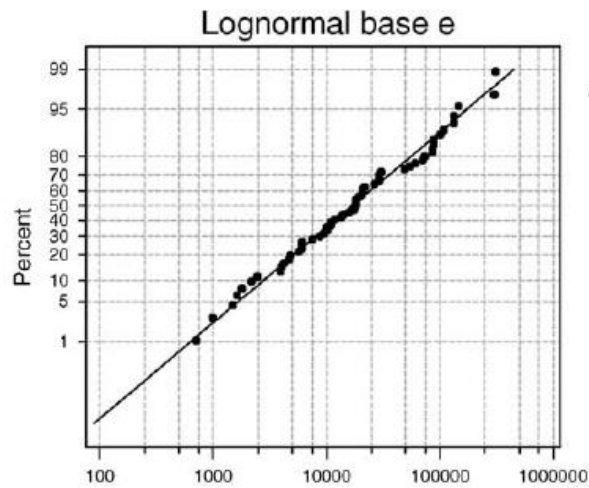


Figura 31. Distribuzione lognormale dei valori di MTBF

Tramite la stessa distribuzione è possibile descrivere il tempo medio impiegato da un manutentore per decidere come intervenire in caso di guasto. In base anche alle considerazioni fatte precedentemente la capacità decisionale di un manutentore può essere espressa, per il componente i -esimo, come segue:

$$D_i(t_a) = \Phi \left[\frac{1}{s} \ln \left(\frac{t_a}{t_{A,i}} \right) \right]$$

Dove Φ indica la distribuzione normale, s la deviazione standard della distribuzione logaritmica del tempo decisionale, t_a il tempo "ammesso" per prendere la decisione e $t_{A,i}$ è il tempo medio

decisionale dell' i -esimo componente del sistema. Tramite la medesima espressione è possibile anche descrivere la manutenibilità di ogni componente prendendo ovviamente in considerazione la distribuzione logaritmica del MTTR e i tempi concessi e medi per la riparazione del componente. La capacità decisionale di un intero sistema è quindi data da:

$$D_{sys}(t_a) = \sum_{i=1}^n \frac{\overline{\Delta t_{F,sys}}}{\Delta t_{F,i}} D_i(t_a)$$

Il rapporto di cui è composta la sommatoria è indice della frequenza di accadimento di un guasto di ogni i -esimo componente del sistema.

In fine, si nota come il valore di *operational availability*, che tiene conto dei tempi di manutenzione di un impianto, ha una grande influenza sulla disponibilità funzionale. Se un sistema è caratterizzato da valori di *operational availability* alti, prossimi quindi ad 1, vuol dire che l'impianto funziona correttamente e che quindi sono garantiti livelli di affidabilità consoni così come la manutenzione viene effettuata correttamente. I tempi di inattività risultano essere così molto bassi e non inficiano la corretta funzionalità dell'intero sistema.

Come si è visto la manutenzione assume un'importanza strategica ai fini dell'affidabilità e della disponibilità dell'impianto. Questo aspetto è influenzato da tre aspetti fondamentali in caso di applicazione operativa: la facilità, l'organizzazione ed il tempo. Questi aspetti dovrebbero quindi studiati e analizzati sin dalle fasi di progettazione di un qualsiasi sistema. Dovrebbe quindi sempre essere garantita una facilità con cui operare interventi di manutenzione e quindi facilitare gli operatori in termini di spazi e condizioni di lavoro. L'organizzazione degli interventi manutentivi dovrebbe essere quindi sempre più incrementata e resa maggiormente efficiente non solo in termini di caratteristiche dell'elemento tecnico ma anche sulla struttura organizzativa predisposta per la sua manutenzione. In termini di tempi di manutenzione, l'obiettivo è sempre posto ad una loro riduzione che ha una ricaduta non solo in termini di affidabilità e disponibilità ma anche di costi.

Questi sono solo alcuni degli aspetti e delle problematiche legate alla manutenibilità e disponibilità di un sistema. Sebbene questi aspetti non siano oggetto di questo lavoro di tesi, s'è voluto dare una breve panoramica di questi concetti che risultano comunque essere centrali al concorrere di un impianto, o più generalmente un qualsiasi sistema, più affidabile.

3.2 I dati di affidabilità degli impianti meccanici

A differenza di settori dell'ingegneria che, sia in normative, standard internazionali e in letteratura, presentano numerosi dati in relazione all'affidabilità di singoli componenti, nel settore tecnologico questo non avviene ancora del tutto. Per poter effettuare studi sull'affidabilità di un qualsiasi tipo di sistema e impianto, come si è visto, possono essere utilizzati differenti metodi matematici e statistici più o meno complessi che hanno comunque alla loro base la conoscenza di dati specifici come il rateo di guasto, MTTR, MTTF...Questi dati derivano da numerosissime osservazioni su impianti realizzati e funzionanti che richiedono diversi anni di ricerca e analisi in modo da avere valori quanto più reali e precisi. Per ottenere tutto ciò è necessaria la collaborazione di produttori, manutentori e utilizzatori degli impianti. In ambito elettrico ed elettronico queste ricerche e, di conseguenza, la consapevolezza del concetto di affidabilità di un sistema, hanno avuto inizio sin dalla metà del secolo scorso. Un esempio è il *Gold Book* dell'*IEEE* la cui prima edizione è stata pubblicata nei primi anni '70. Per la realizzazione di tabelle che riassumessero tutti i dati sull'affidabilità di numerosi componenti di un sistema elettrico ci sono voluti circa vent'anni, partendo così dagli anni '50. Grossi passi in avanti in questi termini sono stati anche fatti dai produttori di questi sistemi che, anche per richieste di carattere normativo, hanno dovuto classificare i livelli di affidabilità e disponibilità dei propri prodotti (vedi livelli [SIL](#) e [PL](#)).

In ambito tecnologico gli unici dati disponibili sono dedotti da indagini svolte da associazioni o studi scientifici che hanno raccolto dati per diverse tipologie di edifici. Tra questi, potremmo citare il *"Survey of reliability and availability information for power distribution, power generation, and heating, ventilation and air conditioning (HVAC) components for commercial, industrial, and utility installations"* promosso dall' U.S. Army Corps of Engineers, in relazione al programma *PREP (power reliability enhancement program)*. La seguente ricerca aveva lo scopo di stabilire il livello di affidabilità, disponibilità e manutenibilità di più di 200 componenti con funzioni di comando, controllo, comunicazione, computer e intelligenze artificiali. La pubblicazione, avvenuta nel 1994 e aggiornata nel 2006, è avvenuta a seguito di una raccolta di dati incominciata nell'Ottobre del 1991. L'obiettivo era quindi quello di aggiornare i dati precedentemente ottenuti dalle ricerche dell'*IEEE* svolte trent'anni prima ed aggiornarli con dati più recenti ed inoltre prendere in considerazione gli aspetti legati alla manutenzione che svolgono un ruolo fondamentale in termini di disponibilità e affidabilità di un impianto. Tramite

il grafico qui sotto riportato è possibile vedere su quali tipologie di edifici sono stati raccolti i dati.

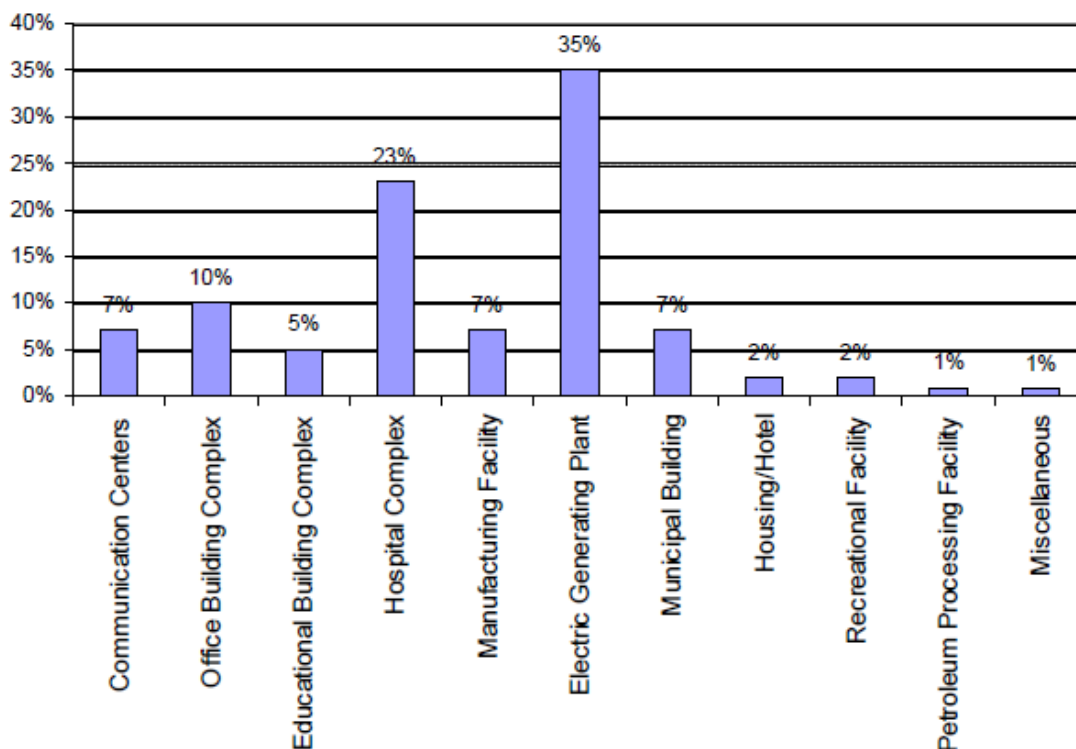


Figura 32. Distribuzione percentuale dei dati in base alla tipologia di edificio

Il processo di acquisizione e studio dei dati è culminato nella realizzazione di un database in cui è possibile, tra gli altri, ottenere valori di λ , MTTR, MTBF che sono alla base della quantificazione dell'affidabilità.

Sempre intorno alla fine degli anni '90 è stato pubblicato uno studio sull'affidabilità di componenti nell'ambito delle centrali di produzioni di energia atomica. L'IAEA (*International atomic energy agency*) ha pubblicato nel 1997 un report con lo scopo di fornire i dati necessari ad effettuare una valutazione probabilistica della sicurezza per i reattori di ricerca. La raccolta di dati è durata per circa quattro anni ed ha portato alla concretizzazione di un database che contiene valori di affidabilità di più di mille componenti presenti in reattori. La principale problematica è legata alla differenza che si riscontra tra progetti differenti e quindi dalla specifica applicazione di un componente nel singolo progetto così come dalla vasta varietà di componenti che sono presenti in un'infrastruttura di questo tipo. Per superare queste

problematiche l'IAEA ha finanziato un programma di ricerca apposito per la classificazione e lo studio di questi dati.

Come si può notare da questi esempi, gli unici dati disponibili riguardo l'affidabilità di componenti di impianti meccanici sono ottenuti tramite ricerche mirate da parte di enti pubblici o comunque collegati a settori dell'industria molto avanzati, quali quello dell'energia atomica. Allo stesso modo, anche se in quantità minore e per un numero minore di dati, questo viene fatto in letteratura a fini di ricerca. In normative o standard non è quindi affrontato il tema dell'affidabilità e allo stesso modo non sono presenti database aggiornati e completi che forniscano dati necessari per la quantificazione dell'affidabilità di un sistema. Sono in alcuni settori specifici la ricerca, l'acquisizione di dati e la realizzazione di banche dati in questo ambito viene affrontata. Si lascia così troppo spesso nelle mani dell'esperienza e della coscienza dell'ingegnere progettista la risoluzione del problema dell'affidabilità di sistemi a servizio di edifici strategici dove il controllo delle condizioni ambientali interne svolge un ruolo centrale non solo di comfort interno ma di sicurezza e funzionalità.

3.3 Gli impianti meccanici nei data center

Un settore in cui il problema dell'affidabilità risulta avere un'importanza strategica è quello riguardante la progettazione dei data center. Come si è visto precedentemente ([2.2](#)) sono presenti, soprattutto in ambito internazionale, associazioni e istituti privati che pubblicano e studiano l'affidabilità di queste infrastrutture. Oltre al sistema di classificazione secondo *Tier* proposto dall'*Uptime institute*, l'ASHRAE ha pubblicato numerose guide che indicano linee guida per la progettazione di data center soprattutto in relazione alle temperature di esercizio ammissibili e limite che devono essere garantite all'interno di questi locali. Come si evince da numerosi studi in letteratura, per garantire l'affidabilità e la funzionalità dei componenti di un data center, è fondamentale garantire delle temperature interne consone ed in particolare evitare eccessivi surriscaldamenti degli ambienti che possano inficiare la funzionalità e la disponibilità dei dispositivi presenti. Un grave danno in questo senso potrebbe avere conseguenze sia di tipo funzionale, interrompendo o riducendo l'operatività del data center, sia di carattere economico.

Il sistema di raffrescamento di un data center assume un'importanza strategica e ciò deve portare il progettista non solo a studiare un impianto che garantisca condizioni ambientali consone ma anche che si tenga conto dei cospicui costi legati alla produzione di energia e alle

sempre maggiori richieste di riduzione di emissioni di agenti inquinanti. A tale proposito si potrebbe citare la *Green Grid Association* che si pone l'obiettivo di studiare e promuovere l'efficienza di data center o sistemi IT con particolare riferimento all'utilizzo delle risorse¹⁵.

Il punto di partenza per ottenere un impianto efficiente e che garantisca il corretto funzionamento di tutti i componenti del data center, è il dimensionamento del sistema di raffrescamento secondo quelle che sono le indicazioni, relative a temperatura e umidità, fornite dai produttori di sistemi IT, server e sistemi di archiviazione digitale. È risaputo che far lavorare questi componenti, così come in generale i dispositivi elettronici ed elettrici, a temperature maggiori di quelle indicate dal produttore ha delle ricadute negative in termine di affidabilità del sistema. Ma sebbene ci sia coscienza di questo, troppo spesso gli operatori del settore, i progettisti e gli utilizzatori di questi sistemi non ne comprendono l'importanza e quanto le condizioni ambientali interne di un data center ne condizionino l'operatività e l'affidabilità.

Storicamente, secondo la prassi, il range di temperatura entro cui dovesse operare un data center era compreso tra i 20°C e i 22°C. Al fine di dettare delle linee guida più certe per gli operatori del settore, l'ASHRAE ha pubblicato un documento guida (*Technical Committee 9.9 – Mission critical facilities, technology spaces, and electronic equipment*) nel 2004, revisionato poi nel 2008, la cui stesura è stata concordata e accettata da tutti i produttori di sistemi IT facenti parte del comitato dell'ASHRAE.

	Recommended		Allowable	
	2004	2008	2004	2008
Temperature Range	20°C - 25°C	18°C - 27°C	15°C - 32°C	10°C - 35°C
Moisture Range	40% - 55% RH	5.5°C DP - 60% RH	20% - 80% RH	20% - 80% RH

Figura 33. Tabella dei valori guida ASHRAE 2004 e 2008

Operare nel range di temperature e umidità consigliato vuol dire garantire la massima affidabilità e durata della vita dei sistemi e, allo stesso tempo, ridurre il consumo di energia. Per

¹⁵ The green grid, "Data center efficiency and IT equipment reliability at wider operating temperature and humidity ranges", White paper #50.

il range definito ammissibile sono invece tollerati livelli di temperatura e umidità più ampi ma va tenuto conto della possibile riduzione di affidabilità del sistema a causa di scariche elettrostatiche, fenomeni corrosivi o guasti causati da alte temperature. Nel 2011 l'ASHRAE ha pubblicato una nuova guida che introdotto due nuove classi (A3 e A4) al fine di garantire ai produttori e agli utilizzatori range di temperatura più alti (è possibile arrivare fino a 45°C).

ASHRAE 2011 Equipment Environmental Specifications					
Classes	Product Operation				
	Dry-bulb temperature (°C)	Humidity range non-condensing	Maximum dew point (°C)	Maximum elevation (m)	Maximum rate of change (°C/hr)
Recommended					
A1 to A4	18 to 27	5.50C DP to 60% RH and 150C DP			
Allowable					
A1	15 to 32	20 to 80% RH	17	3040	5/20
A2	10 to 35	20 to 80% RH	21	3040	5/20
A3	5 to 40	8 to 85% RH	24	3040	5/20
A4	5 to 45	8 to 90% RH	24	3040	5/20
B	5 to 35	8 to 85% RH	28	3040	NA
C	5 to 40	8 to 85% RH	28	3040	NA

Figura 34. Tabella delle classi ASHRAE 2011

Sebbene vi siano in letteratura o degli standard, come quello proposto dall'ASHRAE, che individuano dei range di temperatura entro cui i sistemi di un data center devono poter operare, spesso tra gli operatori del settore, che possono essere progettisti, manutentori, utilizzatori o gli stessi produttori, non vi è piena coscienza e conoscenza di quanto le condizioni ambientali abbiano effetti sull'affidabilità del sistema. Per questo motivo si tendono ad utilizzare i limiti più alti per la progettazione in modo da diminuire possibili guasti in caso di malfunzionamento del sistema di raffreddamento e, più in generale, nel caso in cui dovessero registrarsi livelli di temperatura più alti della media. Secondo una ricerca condotta dal *Green Grid*, nel 90% dei data center la temperatura dell'aria immessa non è uniforme e i range di temperatura "permessi" sono spesso utilizzati per sopperire a problematiche legate alla cattiva gestione dei flussi d'aria all'interno di questi ambienti.

3.3.1 La riduzione dei consumi per il sistema di raffrescamento

Come si può notare sono numerose le difficoltà che si riscontrano per la progettazione, realizzazione e gestione di un impianto di raffrescamento a servizio di un data center soprattutto per la possibilità di quantificare i livelli di affidabilità in relazione alle condizioni interne di temperatura e umidità ma, anche, per progettare un impianto che possa ridurre i consumi di energia e con basse emissioni. A tale scopo si è notato come l'efficienza del sistema di raffrescamento di un data center cresce al migliorare della gestione dei flussi d'aria ed in modo particolare grazie all'utilizzo di economizzatori.

Gli economizzatori sono dei dispositivi meccanici destinati a ridurre il consumo di energia o a svolgere funzioni utili come il preriscaldamento di un fluido. Nei data center sono utilizzati degli economizzatori lato aria (*air-side*) che sono degli scambiatori che permettono di risparmiare consumi energetici utilizzando l'aria esterna per raffrescare l'ambiente. Questi dispositivi sono maggiormente efficienti con temperature esterne più basse e fredde ed hanno un'efficienza maggiore dal punto di vista energetico rispetto ad un normale sistema di ricircolo. In determinate condizioni di temperatura e umidità esterna è anche possibile raffrescare un ambiente senza bisogno di alcun condizionamento aggiuntivo (*Free cooling*). Per un economizzatore *air-side* l'aria esterna, più fresca dell'aria all'interno di uno spazio refrigerato, viene introdotta in quello spazio e la stessa quantità di aria interna più calda viene convogliata all'esterno. Il raffreddamento risultante integra o sostituisce il funzionamento di un sistema di refrigerazione basato su compressore. Se l'aria esterna non è abbastanza fredda per superare il carico di refrigerazione dell'ambiente, anche il sistema di compressione dovrà funzionare, altrimenti la temperatura all'interno dello spazio aumenterà.

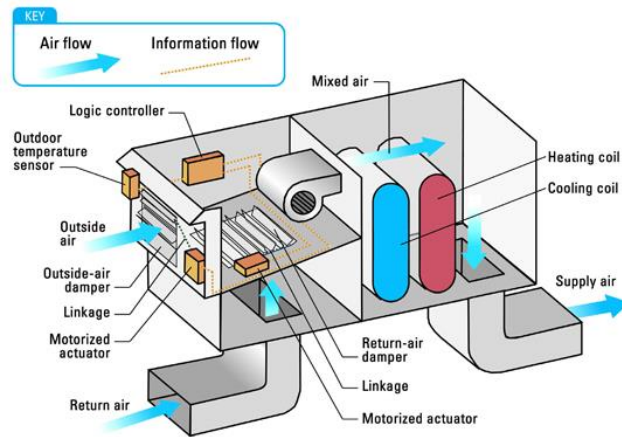


Figura 35. Schema di funzionamento di un economizzatore air-side

Gli economizzatori permettono di mantenere le condizioni di immissione dell'aria in ambiente costanti in modo da eliminare eventuali picchi di calore e ridurre i flussi di aria fredda richiesti seppur con una riduzione del controllo delle condizioni ambientali. La ricerca del *Green Grid* ha evidenziato che l'utilizzo degli economizzatori porta ad una riduzione del 20% di consumi energetici, economici e di emissioni di agenti inquinanti da parte del sistema di raffrescamento¹⁶. Come si è visto, però, questi dispositivi hanno un funzionamento ottimale con climi freddi ma, come vedremo, risultano avere ottimi rendimenti anche con climi più caldi sfruttando l'abbassamento di temperature notturno o le temperature invernali più basse. Considerando che il sistema di raffrescamento di un data center deve essere attivo continuamente durante tutto l'anno, perché questo sistema sia realmente efficace in termini di risparmi energetici e di funzionamento, esso deve essere funzionante per un numero di ore considerevole. A tale scopo il *Green Grid* ha pubblicato nel 2012 delle mappe che permettono di dedurre il numero di ore di funzionamento di un economizzatore di tipo *air-side* per data center in relazione ai range di temperatura definiti dalle tabelle ASHRAE. Per il limite di temperatura interna di 27°C raccomandato dall'ASHRAE, si nota come, in Europa, è possibile effettuare *free coolin* tramite un economizzatore con una media che va dalle 6500 alle 8000 ore all'anno.

¹⁶ The Green Grid White Paper #41, "Survey results: Data center economizer use".

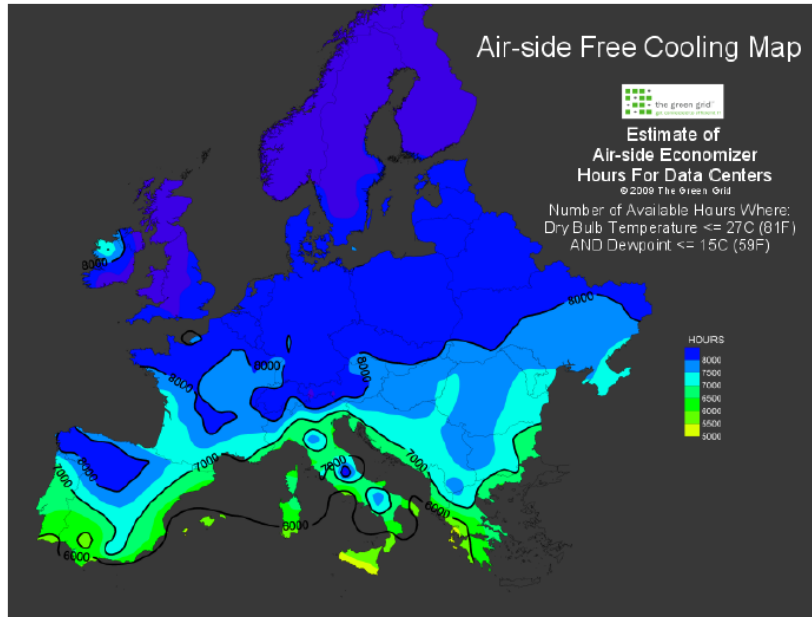


Figura 36. Mappa indice delle ore di funzionamento di un sistema free-cooling in Europa con temperatura operativa interna di 27°C

Nel caso in cui abbiamo a disposizione limiti di temperatura più alti, come per il livello ASHRAE A2, le ore/anno in cui l'economizzatore può funzionare sono in media molto più alte.

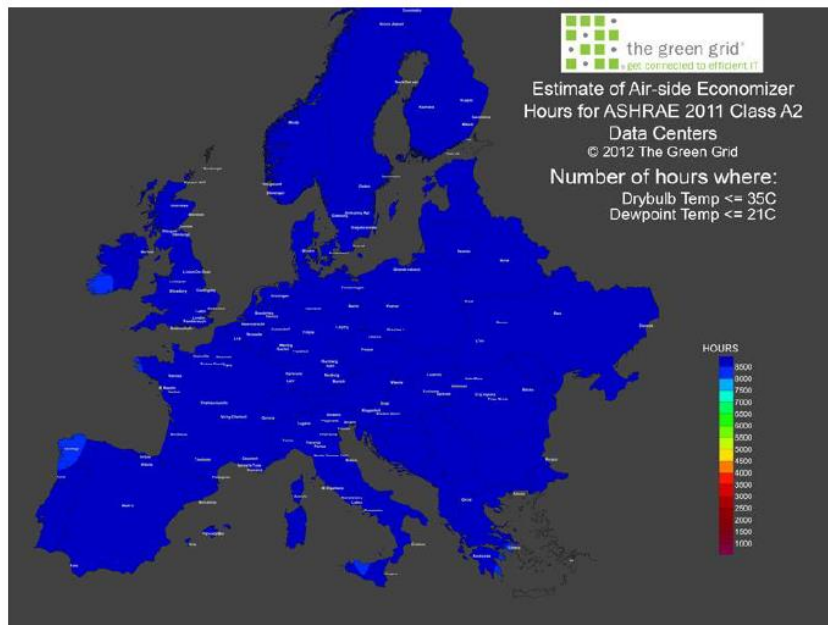


Figura 37. Mappa indice delle ore di funzionamento di un sistema free-cooling in Europa con una temperatura operativa interna di 35°C

L'utilizzo di questi dispositivi nei data center presenta quindi numerosi aspetti positivi in termini risparmi economici e per la riduzione notevole degli impianti di raffreddamento che avrebbero così una funzione di "supporto" agli economizzatori che, in caso di particolari condizioni

ambientali, possono coprire interamente i carichi termici di raffrescamento richiesti dal data center.

Nel grafico seguente, l'ASHRAE mostra, per alcune città internazionali, la percentuale di utilizzo di un economizzatore in relazione alle differenti caratteristiche climatiche. È subito evidente come per la maggior parte dei casi per il 60% dell'anno un economizzatore è in grado di garantire una temperatura interna che si aggira attorno ai 20°C. Tutti i componenti del data center opereranno così nel range di temperatura consigliato dall'ASHRAE.

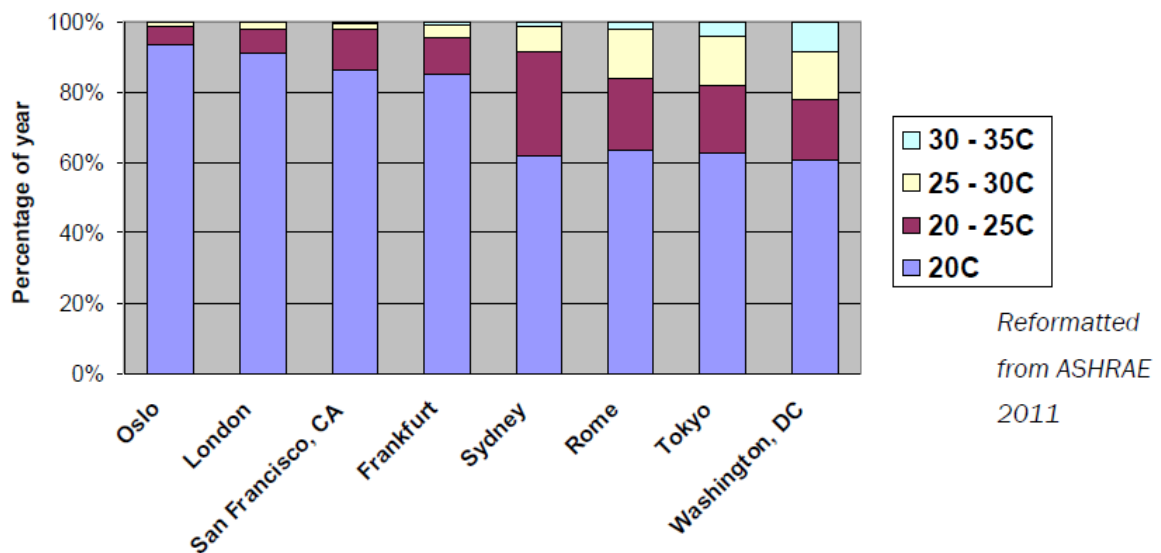


Figura 38. Grafico con percentuale annua in cui alcune città internazionali ricadono nel range ASHRAE A2

Utilizzando questi dati e i valori di variazione del rateo di guasto in relazione alla temperatura che vedremo successivamente, è possibile determinare il livello di affidabilità del sistema.

3.3.2 Rischi legati all'aumento delle temperature

La relazione tra l'aumento delle temperature interne ed il rateo di guasto di componenti elettronici e elettrici è ben conosciuta. L'aspetto che concerne il rapporto tra alte temperature di esercizio e l'affidabilità dei macchinari e dei sistemi a servizio dei data center non è invece nota con certezza e precisione. Questo aspetto riguarda l'intero ciclo di vita del sistema dove è risaputo che la presenza di alte temperature causa guasti più frequenti e fenomeni quali scariche elettrostatiche, contaminazioni da particolato e corrosione a livelli alti di umidità.

Da alcune osservazioni effettuate su impianti di raffrescamento di data center che utilizzano macchine frigorifere "tradizionali", è possibile individuare un punto di funzionamento ottimale dell'impianto in modo da ridurre i consumi. Questo punto ideale si trova nell'intersezione tra la curva che indica il consumo di energia richiesto dal sistema di raffrescamento, che diminuisce all'aumentare della temperatura in ingresso, e la curva di consumo energetico richiesto dai sistemi IT che cresce all'aumentare della temperatura ambiente.

Nonostante i produttori, come visto, propongono range di temperatura di funzionamento dei loro componenti in alcuni casi anche molto alti (si veda la classe A4 della classificazione ASHRAE), gli operatori e i manutentori sono sempre restii ad operare con limiti di temperatura così ampi in quanto non confidano nell'affidabilità del sistema a temperature così elevate (si può anche arrivare a 45°C). In una guida pubblicata nel 2008 dall'ASHRAE intitolata "*Environmental Guidelines for Datacom Equipment—Expanding the Recommended Environmental Envelope*" è stato effettuato uno studio che permette di verificare come varia la temperatura interna di un server (linea verde) in funzione della velocità variabile delle sue ventole (linea rossa) ed al variare della temperatura con cui viene immessa aria in ambiente (linea magenta).

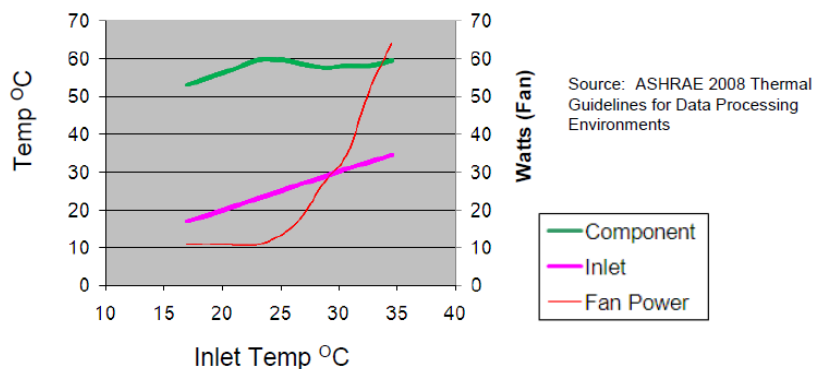


Figura 39. Variazione della temperatura interna di server e della potenza delle ventole in relazione alla temperatura di immissione dell'aria in ambiente

Come si può notare la temperatura a cui opera il server non varia notevolmente all'aumentare della temperatura dell'aria dell'ambiente e comunque resta nei limiti che sono imposti dal produttore affinché esso funzioni correttamente. Di conseguenza, la temperatura di immissione non incide sull'affidabilità del server ma piuttosto sull'affidabilità dei suoi componenti, come le ventole, che si "adattano" all'aumento della temperatura. La potenza consumata dalle ventole, che hanno lo scopo di garantire il corretto flusso di aria all'interno del server, aumenta fortemente all'aumentare della temperatura interna in particolare modo quando vengono superati i 25°C (limite massimo del livello consigliato dall'ASHRAE). Superato questo limite è quindi possibile evidenziare un aumento dei consumi energetici del sistema che deve poter sopprimere all'aumento della temperatura interna.

Un'ulteriore analisi, questa volta effettuata su numerosi dati forniti da produttori di hardware, riguarda lo studio della variazione del rateo di guasto in relazione alla temperatura operativa. Lo studio è stato pubblicato nel "2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance" dell'ASHRAE.

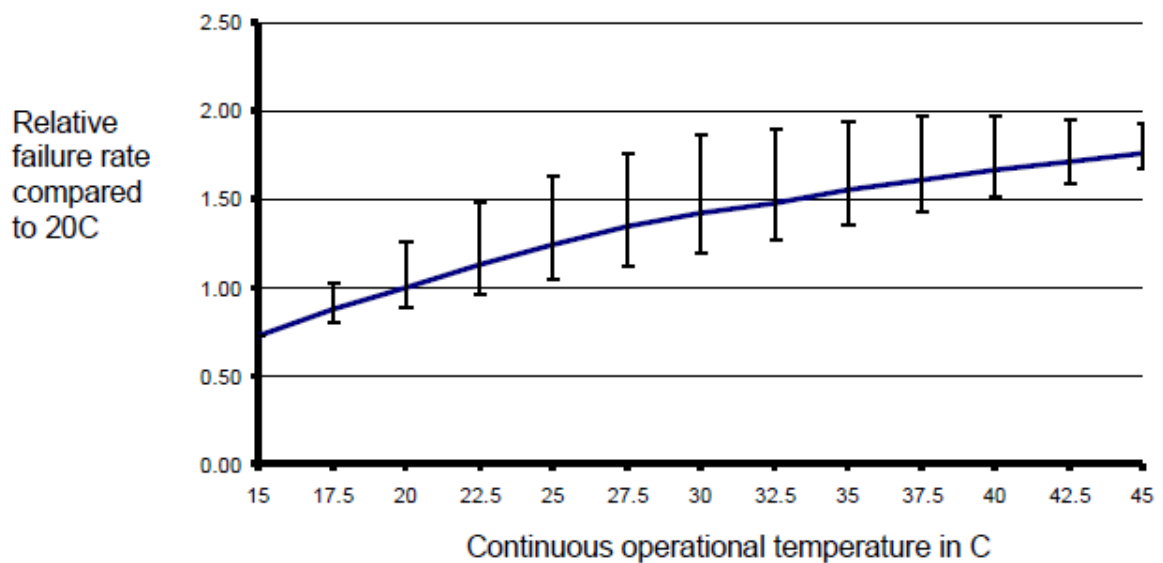


Figura 40. Variazione del valore del rateo di guasto per un server in relazione alla temperatura operativa (ASHRAE 2011)

Seppure la lettura di questo grafico appaia alquanto evidente, è necessario fare qualche osservazione in relazione alla variazione dell'affidabilità all'aumentare della temperatura dell'ambiente. Ipotizziamo di avere un data center che opera senza interruzioni alla temperatura costante di 20°C in cui sono presenti 1000 server. A queste condizioni di temperatura si misura

una media di 10 server all'anno che possono presentare danni o causare disservizi. Se consideriamo sempre 1000 server che operano però ad una temperatura di 35°C, osserviamo che potrebbero guastarsi in media 16 server all'anno. Vi è così un aumento netto di soli 6 server che potrebbero guastarsi in media in più che, per un sistema composto da 1000 server, risulta essere un numero alquanto basso. A tal proposito va anche preso in considerazione che il valore di rateo di guasto ottenuti sono stati ricavati da sistemi di raffrescamento che funzionavano continuamente durante tutto l'anno. Se invece facciamo riferimento a dispositivi, come gli economizzatori, questi, non funzioneranno ininterrottamente e, per questo motivo, è possibile aspettarsi valori di temperatura interna variabili entro i limiti specificati nelle tabelle ASHRAE. Questa continua variazione di temperatura, nel caso di un economizzatore, varia al variare delle condizioni climatiche esterne e, perciò, si potranno avere solo alcuni giorni o parti della giornata in cui il dispositivo e, di conseguenza, le temperature raggiunte dai server possano toccare picchi di molto alti. Inoltre, i cambiamenti di temperatura non avvengono così repentinamente ed il tasso di variazione di 5°C/ora alla temperatura operativa di 20°C (*Maximum rate of change*) risulta essere minore nella realtà. Questo provoca certamente uno stress minore ai componenti e dispositivi di un data center e sottolinea ulteriormente come gli effetti delle variazioni della temperatura interna siano discontinui. Da tutte queste considerazioni ne consegue che i limiti di temperatura in cui opera un dispositivo, quale può essere un server, non hanno effetti, da soli, sui livelli di affidabilità del sistema.

L'affidabilità ed il numero di guasti previsti per un data center sono strettamente correlati alla tipologia di dispositivi utilizzati ed alle loro caratteristiche specificate dai produttori così come ai limiti di temperatura in cui essi devono poter operare. Oltre questi aspetti, bisognerebbe considerare anche le modalità di manutenzione e gestione che, come visto, sono centrali nella definizione dell'affidabilità. Spesso non vi è una definizione univoca di guasto da parte di gestori e manutentori. Si può parlare di guasto sia in caso di interventi di manutenzione non programmati che nel caso di interventi manutentivi già programmati ma che comunque potrebbero creare un disservizio. Visti anche i vasti range di temperatura in cui questi dispositivi possono funzionare, i manutentori e utilizzatori potrebbero pensare di avere un risparmio maggiore operando a temperature più alte (costi minori legati al sistema meccanico di raffrescamento) ed utilizzare questi risparmi per effettuare manutenzione sui dispositivi che dovessero guastarsi. Certamente tutte queste considerazioni devono essere effettuate a seguito di un processo di progettazione, pianificazione e gestione che comunque deve partire dalla

definizione di un sistema affidabile così come da componenti che abbiano buoni valori di rateo di guasto e, di conseguenza, di affidabilità.

Oltre al valore di rateo di guasto dei componenti, per ottenere una valutazione realistica dell'affidabilità di un sistema di questo tipo, è necessario conoscere i range di temperatura che sono in media registrati all'interno degli ambienti durante l'anno (3.3.1). Il grafico seguente mostra la variazione del rateo di guasto in relazione ai livelli di temperatura esterna registrati in diverse città nel Mondo considerando un funzionamento continuativo ad una temperatura interna di 20°C tramite l'utilizzo di un economizzatore. Si nota come per molte città in cui la temperatura esterna è al di sotto di 20°C per la maggior parte dell'anno, imporre un limite massimo di temperatura interna di 15°C, diminuisce il valore di rateo di guasto migliorando così l'affidabilità.

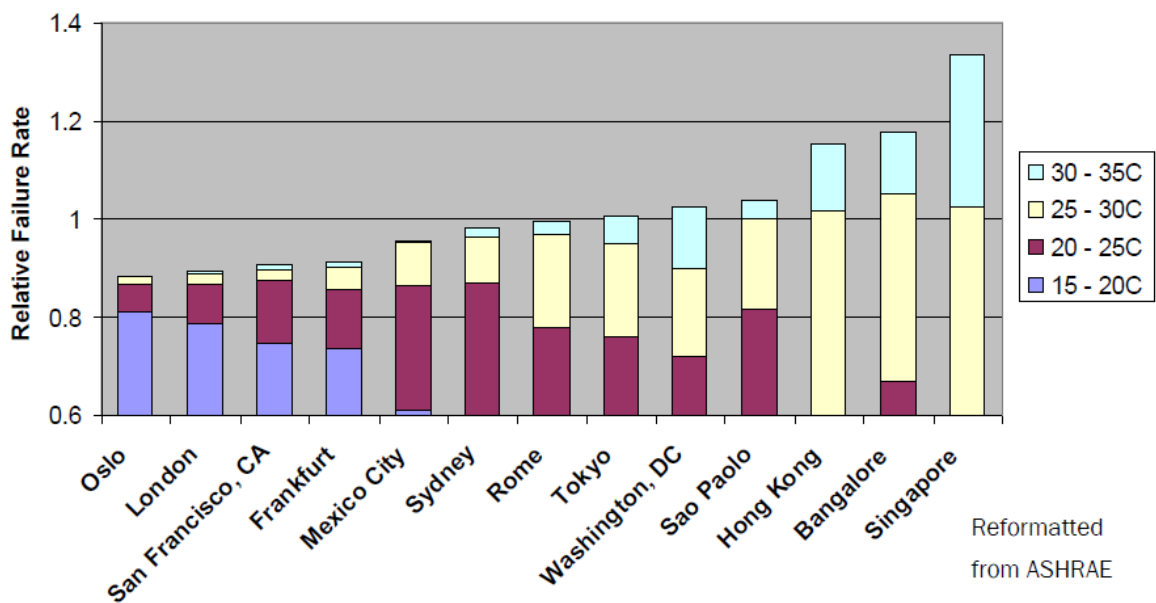


Figura 41. Variazione del rateo di guasto con una temperatura operativa variabile dai 15°C ai 35°C

Allo stesso modo si può notare dal grafico successivo come per molte delle città analizzate ci sia solo un leggero incremento dei valori di rateo di guasto nel caso in cui intendiamo mantenere la temperatura all'interno del range A2 (20°C/35°C).

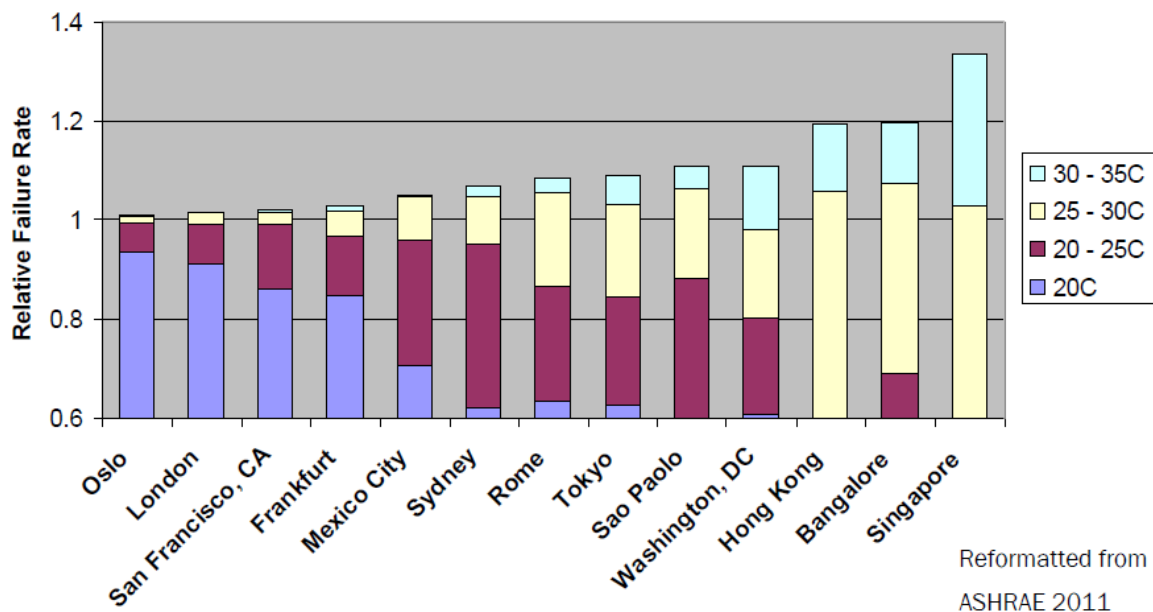


Figura 42. Variazione del rateo di guasto con una temperatura operativa compresa tra i 20°C e i 35°C

Questo tipo di analisi però non tiene conto degli effetti a lungo termine dei livelli di umidità o di particelle inquinanti che potrebbero essere immesse in ambiente dall'economizzatore.

3.3.2.1 Il metodo "Net X-factor"

ASHRAE propone un metodo semplificato che permette di calcolare il cambiamento netto di affidabilità in relazione alla località in cui è situato il progetto. Il *Net X-factor* consente di misurare, per un determinato luogo, l'impatto delle temperature sull'affidabilità di sistemi IT rapportandolo con l'*X-factor* che, invece, misura il livello di affidabilità di questi dispositivi per determinate condizioni di temperatura operativa interna. Si considera un *X-Factor* pari ad 1 che indica l'affidabilità dei server di un sistema IT che operano continuamente alla temperatura di 20°C. Nel caso si dovesse ottenere un valore di *Net X-Factor* minore di 1 allora l'affidabilità dei server sarà maggiore rispetto ad avere una temperatura operativa costante di 20°C. Nel caso dovesse risultare maggiore di 1 avremmo livelli di affidabilità chiaramente minori. Per effettuare questo tipo di analisi è necessario essere a conoscenza dei valori di rateo di guasto di tutti i componenti del data center di cui si vuole studiare l'affidabilità. È così necessaria una collaborazione costante con i produttori di questi dispositivi e macchinari in modo da avere valori reali sulle differenze di affidabilità a diversi livelli di temperatura operativa.

L'ASHRAE propone uno studio basato sull'affidabilità di server che operano continuamente durante l'anno. Nella tabella seguente sono indicati i valori di rateo di guasto di questo

dispositivo a differenti temperature operative. Il limite inferiore (*lower boundary*) del rateo di guasto dovrebbe essere utilizzato se l'obiettivo è ottenere un maggiore risparmio energetico mentre il limite superiore (*Upper boundary*) nel caso in cui si volesse minimizzare il rischio di guasti o malfunzionamenti. Ai fini dell'esempio sviluppato dall'ASHARE verranno utilizzati valori di *X-Factor*, o rateo di guasto, medi.

	Average	Aggressive	Conservative
Dry Bulb Temperature (C)	Average Failure Rate X-Factor	Lower Boundary of Failure Rate X-Factor	Upper Boundary of Failure Rate X-Factor
15	0.72	0.72	0.72
17.5	0.87	0.8	0.95
20	1.00	0.88	1.14
22.5	1.13	0.96	1.31
25	1.24	1.04	1.43
27.5	1.34	1.12	1.54
30	1.42	1.19	1.63
32.5	1.48	1.27	1.69
35	1.55	1.35	1.74

Figura 43. Valori di rateo di guasto per server in relazione alle temperature operative (ASHRAE 2011)

Per ottenere il valore *Net X-Factor* sono necessari i valori riportati nella tabella che segue. In particolare:

- A. Valori di *X-Factor* ottenuti e dedotti dai valori medi dalla tabella precedente;
- B. Temperatura a cui opera il server. Si utilizza il range A2 dell'ASHRAE;
- C. Per un economizzatore lato aria si assume un aumento di temperature di 1,5°C a causa delle condizioni di temperatura esterna;
- D. Valori di temperatura esterna ottenuti sottraendo 1,5°C alle temperature operative di immissione in ambiente;
- E. Percentuale di ore in cui si registrano le temperature indicate nella colonna D. i dati devono essere ottenuti da database nazionali o internazionali certificati;

Il contributo al valore di *Net X-Factor*, in colonna F, per ogni temperatura è ottenuto moltiplicando il valore di rateo di guasto della colonna A con la percentuale in colonna E. Il *Net X-factor* totale è dato dalla somma dei singoli contributi.

Column A Input	Column B	Column C Input	Column D	Column E Input	Column F Calculation
X-factor	IT inlet temperature °C	External to inlet increase °C	External temperature °C	% of hours at temperature	Contribution to X-factor
0.72	Less than 15		Less than 13.5	35.1%	0.25
0.72	15	1.5	13.5	7.5%	0.05
0.80	16	1.5	14.5	6.8%	0.05
0.87	17	1.5	15.5	6.5%	0.06
0.91	18	1.5	16.5	6.1%	0.06
0.96	19	1.5	17.5	5.9%	0.06
1	20	1.5	18.5	5.1%	0.05
1.07	21	1.5	19.5	4.8%	0.05
1.13	22	1.5	20.5	3.5%	0.04
1.17	23	1.5	21.5	3.2%	0.04
1.20	24	1.5	22.5	3.1%	0.04
1.24	25	1.5	23.5	2.1%	0.03
1.29	26	1.5	24.5	1.8%	0.02
1.34	27	1.5	25.5	1.5%	0.02
1.37	28	1.5	26.5	1.7%	0.02
1.39	29	1.5	27.5	1.4%	0.02
1.42	30	1.5	28.5	1.2%	0.02
1.45	31	1.5	29.5	1.1%	0.02
1.48	32	1.5	30.5	0.9%	0.01
1.50	33	1.5	31.5	0.3%	0.00
1.53	34	1.5	32.5	0.2%	0.00
1.55	35	1.5	33.5	0.1%	0.00
1.55	Greater than 35	1.5	Greater than 33.5	0.1%	0.00
Net X-factor					0.91

Figura 44. Tabella di calcolo del valore di Net X-factor per una località specifica

Ma in cosa si traduce questa riduzione del valore di X-Factor? Se consideriamo un data center composto da 1000 server con una temperatura operativa costante di 20°C, abbiamo così un valore di X-factor pari a 1 il che vuol dire che potremmo incorrere nel guasto di 20/40 server l'anno. Se invece, come in questo caso, abbiamo un valore minore di 1 (0,91) cioè permettiamo, tramite l'utilizzo di un economizzatore, di variare la temperatura operativa interna in base alla temperatura ambiente esterna otteniamo una riduzione del numero di server che possono guastarsi all'anno (dai 20/40 ai 18/36 con una riduzione del 9%). Risulta evidente come questa riduzione sia strettamente correlata ai valori di temperatura esterna e quindi al luogo in cui ci si trova ad operare.

4. Il caso studio

Per poter ottenere una valutazione quantitativa dell'affidabilità che sia oggettiva, è necessario che questa venga espressa tramite un valore numerico che non lascia aperte molte interpretazioni. Spesso i livelli di affidabilità e di disponibilità di un sistema, quali lo schema di funzionamento e distribuzione dell'impianto elettrico così come di quello meccanico, dipendono esclusivamente dalle scelte effettuate dal progettista. Queste scelte, però, non sono figlie di un'analisi quantitativa o qualitativa dell'affidabilità ma, piuttosto, sono legate alla sua esperienza e coscienza delle problematiche che un'eventuale guasto di uno o più componenti potrebbe causare in fase di operatività dell'impianto. Il presente lavoro vuole quindi porsi nell'ottica di promuovere una buona pratica di progettazione che permette tramite metodi, anche molto semplificati, di quantificare numericamente l'affidabilità di un qualsiasi sistema. Come visto, in letteratura ed in normativa sono individuate numerose metodologie che ci permettono di effettuare questo tipo di analisi. Inoltre, è stata sottolineata anche la fondamentale importanza di avere a disposizione dei valori numerici che siano in grado di descrivere l'affidabilità di ogni singolo componente quali il rateo di guasto, il MTTR, MTTF e così via. La collaborazione con i produttori e i manutentori è quindi centrale per promuovere e diffondere la cultura dell'affidabilità non solo nell'ambito dell'ingegneria industriale, petrolifera o elettrica (solo per citare alcuni esempi) ma anche per l'ingegneria meccanica ed al settore tecnologico.

Nel seguente capitolo verrà quindi svolto uno studio quantitativo di affidabilità per lo schema elettrico di potenza e lo schema funzionale degli impianti meccanici che sono entrambi a servizio di una sala di controllo di un aeroporto.

L'edificio, per cui si valuterà l'affidabilità degli schemi impiantistici, è costituito da un basamento o podio, con aperture per la ventilazione e una facciata vetrata sul retro. L'accesso all'edificio avviene attraverso la piazza aperta a sud; attraverso un edificio a forma di Y caratterizzato da una doppia pelle di lame traslucide che vengono orientate secondo le esigenze di protezione dalla luce e vista. Nella parte superiore, la Sala Operativa si propone come un grande rettangolo "fluttuante" sopra l'edificio a forma di Y, con un piano intermedio sotto alla copertura, dove sono ubicati gli impianti. Il corpo della Sala Operativa di Controllo è anch'esso formato da una doppia pelle, con lamelle traslucide. La pelle interna sia della Sala Operativa che del corpo

sottostante si adatta alle esigenze degli interni, alternando zone opache e trasparenti a seconda delle esigenze, con aperture nelle zone uffici per garantire una ventilazione naturale.



Figura 45. Render dell'edificio oggetto di studio

Lo schema funzionale parte dal basamento o podio all'interno del quale, al piano terra, si trovano i parcheggi, il blocco energia, la zona di preparazione dei cibi della sala da pranzo; oltre a spogliatoi e officine di manutenzione. Oltre a queste funzioni, all'interno del podio sono integrati gli edifici ausiliari (asilo e palestra).

Al primo piano, piano di accesso principale, oltre all'accesso principale, si trova la mensa, utilizzabile oltre che dal personale ENAV anche dal personale della vicina Torre di Controllo e di Aeronautica Militare. Questi ultimi hanno i loro uffici a questo livello, indipendenti dal resto degli usi dell'edificio.

Il secondo piano ospita gli uffici ENAV, mentre il terzo piano ospita sia le unità formative che i locali di riposo notturno per i controllori.

Il quarto piano è esclusivamente dedicato a uffici e Data Center. Sulla copertura di questo piano sono ubicati gli impianti a servizio dell'edificio.

Il sesto piano è il livello della Sala Operativa. Oltre alla Sala Operativa, a questo livello sono presenti anche la sala test e le sale di prove, oltre alle aree di riposo diurno per i controllori e altri uffici di servizio della Sala Operativa. Da questo piano è possibile accedere al soppalco tecnico dove si trovano le apparecchiature ed i servizi della Sala Operativa, garantendo la

manutenzione degli impianti senza interrompere le attività operative quotidiane della sala Operativa.

Con lo scopo di ottenere un edificio che fosse in grado di ridurre in maniera consistente i consumi energetici, è stato sviluppato un design sostenibile attivo e passivo: illuminazione naturale, controllo dell'incidenza solare, vetri ad alte prestazioni, sistemi meccanici efficienti, ecc. Si è posta particolare attenzione allo studio degli ombreggiamenti estivi e invernali che garantissero un maggiore apporto solare nei mesi invernali ed un maggiore ombreggiamento in quelli estivi.

Sono state eseguite, inoltre, una serie di studi sulla radiazione solare incidente sull'involucro (facciate, tetto e piazza del podio) con lo scopo di ottenere valori relativi al surriscaldamento delle superfici. Con i dati estratti, sono state definite le scelte progettuali, che vanno dalla modifica degli orientamenti, alla protezione delle facciate o alla scelta di materiali con un alto indice di riflettanza solare per pavimenti e tetti.

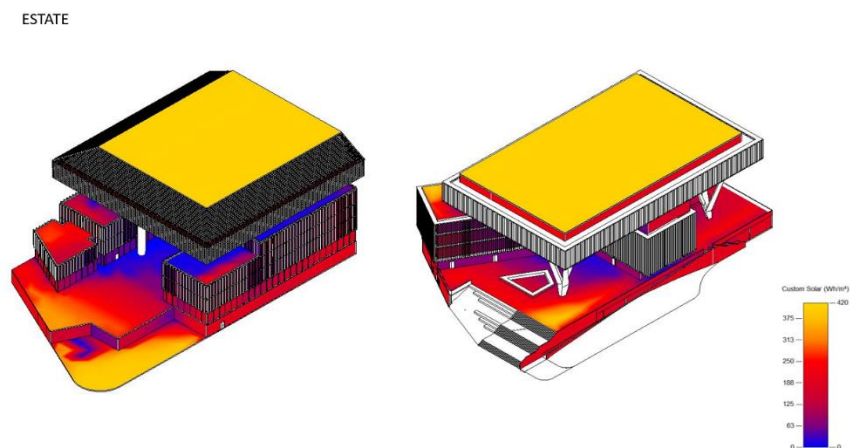


Figura 46. Schemi comparativi della radiazione solare per due diverse soluzioni progettuali

Allo stesso modo sono stati effettuati studi relativi all'illuminazione naturale interna agli ambienti dell'edifici al fine di sviluppare l'idea progettuale più consona.

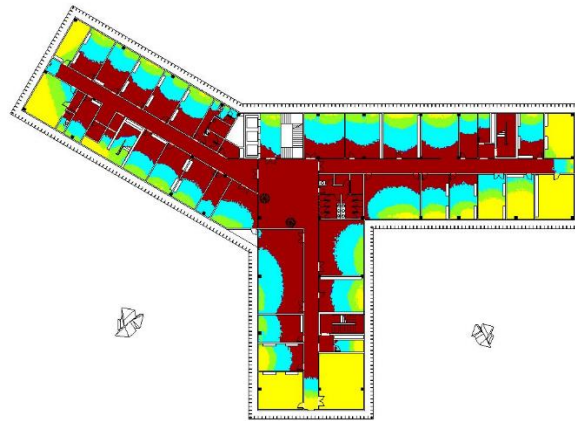


Figura 47. Illustrazione del grado di illuminazione naturale negli ambienti interni

Questi sono alcuni degli aspetti progettuali che hanno caratterizzato la progettazione energetica ed impiantistica dell'edificio.

Nei capitoli successivi verranno descritti i singoli sistemi per poi proseguire con un'analisi numerica dell'affidabilità degli schemi impiantistici adottati che sarà effettuata tramite i *diagrammi a blocco dell'affidabilità* detti anche RBD ([2.1.1.1](#), [2.1.1.2](#), [2.1.1.3](#)). Questa tipologia di analisi, descritta nello standard *IEEE 3006.5*, è certamente molto immediata e di facile applicazione ma permette di effettuare una valutazione quantitativa dell'affidabilità che tiene conto di tutti i componenti di cui è composto il sistema ed in particolar modo di come essi sono collegati e connessi tra loro. Lo schema funzionale di distribuzione di un sistema assume quindi un'importanza centrale che permette di variare fortemente il livello di affidabilità così come la presenza di elementi ridondanti. Ma, per poter effettuare un'analisi tramite diagrammi RBD, è imprescindibile avere a disposizione i valori di rateo di guasto λ di ogni singolo componente. Questi, oltre a rappresentare la media annua con cui si guasta un elemento, ci permette di calcolare il valore di affidabilità $R(t)$ per distribuzioni di tipo in serie, in parallelo ed in caso di ridondanza. Tutti i dati relativi all'affidabilità di ogni singolo componente che verrà analizzato di seguito, sono stati dedotti dalle tabelle del "Survey of reliability and availability information for power distribution, power generation, and heating, ventilation and air conditioning (HVAC) components for commercial, industrial, and utility installations" ([3.2](#)). L'intera ricerca è stata inoltre riportata nell'appendice Q dell'ultima versione dell'*IEEE Gold Book* pubblicata nel 2007. Ulteriori dati, principalmente relativi ai componenti di impianti elettrici, sono stati estrapolati dal medesimo *Gold Book* dove sono presenti numerose tabelle di dati raccolti in ormai più di cinquant'anni di osservazioni.

4.1. La differenza di affidabilità al variare delle configurazioni: metodologia di calcolo

Nel seguente capitolo verrà effettuata un'analisi quantitativa dell'affidabilità dello schema elettrico e meccanico di un edificio. Sebbene per la progettazione di questo sistema si siano seguite delle pratiche progettuali che fossero in grado di garantire livelli alti di affidabilità e disponibilità, come la ridondanza e l'indipendenza da cause comuni di guasto, non è prevista nessuna valutazione quantitativa che sia in grado di esprimere numericamente questi concetti. Tramite la costruzione del RBD ed i valori di rateo di guasto dei singoli componenti, sarà possibile quantificare l'affidabilità $R(t)$ in diverse configurazioni che ci permetteranno di percepire di quanto aumenta o diminuisce l'affidabilità del sistema in caso di sistema doppio radiale, di ridondanze delle sorgenti di alimentazione e della presenza, ad esempio, di gruppi elettrogeni e/o cogeneratori.

Prima di procedere con l'applicazione dello studio di affidabilità tramite diagramma a blocchi è fondamentale definire e sottolineare degli aspetti puramente matematici e applicativi. L'affidabilità ha il fine di associare alla vita utile di un elemento tecnico una qualità prestazionale che deve essere garantita in determinate condizioni di impiego. Gli strumenti che permettono di controllare l'affidabilità devono quindi partire dalla definizione di un criterio di giudizio che sia in grado di fissare i limiti prestazionali di questi dispositivi oltre i quali si può parlare di guasto. Gli impianti e più in generale i sistemi edilizi, infatti, sono costituiti da elementi e sub sistemi detti *non bi-stabili*¹⁷ ed è quindi centrale la definizione di questi limiti.

Oltre definire questi limiti di operatività e qualità, la quantificazione dell'affidabilità è strettamente correlata ad un intervallo di tempo t entro il quale si richiede che l'elemento funzioni e le condizioni ambientali e di impiego che devono risultare costanti durante il periodo di tempo t .

Ai fini del calcolo di $R(t)$ tramite RBD è necessario essere a conoscenza dell'andamento della funzione del rateo di guasto λ e come questa vari nel tempo influenzando il valore di affidabilità.

¹⁷ I sistemi non bi-stabili sono quei sistemi per i quali non è chiaramente individuato lo stato di funzionamento e quello di non funzionamento e che non presentino stati intermedi tra i due (Molinari, C.)



Figura 48. Grafico standard dell'andamento del rateo di guasto

Dal grafico in figura è possibile individuare tre fasi distinte in cui il valore di λ varia. Nella fase iniziale, detta di *rodaggio*, si registrano solitamente dei guasti iniziali dei dispositivi legati a difetti originari dei materiali, a difetti di montaggio o posa in opera. Il valore di rateo di guasto tenderà così a decrescere in seguito all'eliminazione dei dispositivi mal funzionanti raggiungendo così una fase di stabilizzazione detta fase di *vita utile*. In questa fase si registrano guasti casuali legati ad eventi imprevedibili o ad imperfezioni legate al discostamento di quanto previsto in fase progettuale o ancora ad un utilizzo improprio dei dispositivi. La fase finale di *usura* è invece caratterizzata da un incremento del valore di λ legati ad un fisiologico invecchiamento degli elementi.

Nel presente studio si farà riferimento esclusivamente al valore di rateo di guasto relativo alla fase di *vita utile* dei sistemi. Il valore di λ risulterà quindi costante e gli eventi di guasto saranno del tipo casuale. Per questo motivo il modello matematico utilizzato è quello tipico della distribuzione esponenziale negativa.

Il valore di affidabilità $R(t)$ sarà quindi ottenuto tramite l'equazione (1) in cui il valore di λ è dato dalla somma dei valori di rateo di guasto di tutti i componenti.

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

In caso, invece di componenti o rami dell'intero schema funzionale posti in parallelo l'uno all'altro il valore di affidabilità viene espresso tramite l'equazione (2)

$$R'(t) = (1 - R(t)) \quad (2)$$

Il valore di $R(t)$ indica la probabilità che entrambi i rami o componenti posti in parallelo si danneggino. Questa probabilità è calcolata, per ogni ramo o componente, sottraendo ad 1 il valore di $R(t)$ calcolato come nell'equazione (1).

Per una trattazione più completa e dettagliata delle modalità di calcolo dell'affidabilità tramite RBD si faccia riferimento ai capitoli [2.1.1.1](#), [2.1.1.2](#), [2.1.1.3](#).

Questa metodologia di calcolo assume un'importanza fondamentale negli studi affidabilistici data la sua semplicità di applicazione e quindi particolarmente utile in sistemi complessi. Prendendo in considerazione il lasso di tempo di *vita utile* di questi sistemi, di fatto, vuol dire studiarne la probabilità di accadimento di fenomeni di guasto che si presentano in maniera del tutto casuale e con una probabilità che è indipendente dal particolare istante di tempo durante la loro vita utile. Il valore di λ è quindi indipendente da quale sia l'istante assunto come iniziale del funzionamento del sistema che quindi in queste condizioni si dice *non avere memoria* di quanto accaduto durante la sua vita utile.

Per poter calcolare l'affidabilità per ogni sistema analizzato, saranno redatte delle tabelle in cui verranno elencati tutti i componenti dei singoli rami di alimentazione e distribuzione ed associato, per ognuno di essi, il numero, indicato tra le parentesi, di componenti in parallelo previsti nello schema, il valore di rateo di guasto del singolo componente ed in fine il valore di affidabilità $R(t)$ calcolato secondo quanto indicato precedentemente sia per ogni singolo componente sia per l'intero schema analizzato.

Verrà quindi indicato per ogni componente il valore associato di λ (n° guasti/anno) dedotti dal *PREP DATABASE /Version 4.2* presente nel *IEEE gold Book* e, di conseguenza, il valore di $R(t)$ che è stato calcolato su base annua cioè considerando un valore t pari ad 1. Infine, verrà quantificato il valore di affidabilità separatamente per gli ambienti ordinari dell'edificio e per i servizi di continuità assoluta associati ai rami della parte uffici e del data center.

4.2 Schema elettrico

Per la progettazione dell'impianto elettrico ed in particolare dell'architettura del sistema elettrico di potenza è stata fatta particolare attenzione al tema dell'affidabilità e della possibilità di garantire un'alimentazione continua. L'edificio per cui questo impianto dovrà garantire la completa copertura dei carichi è una palazzina uffici di un aeroporto in cui saranno presenti anche una sala controllo di volo ed un data center. Vista quindi l'importanza strategica dell'edificio è stato necessario effettuare una progettazione del sistema che potesse garantire affidabilità e, in modo particolare per alcuni ambienti quali ad esempio il data center o la sala di controllo, la continuità di alimentazione. A tale scopo il sistema è caratterizzato da ridondanza, indipendenza da cause comuni di guasto dei diversi rami di alimentazione, *concurrent maintainability* in modo da permettere interventi manutentivi senza inficiare la copertura di carico critico ed in fine la ricerca e la risoluzione dei colli di bottiglia presenti nello schema elettrico.

L'edificio sarà alimentato da una cabina di ricezione delle rate nazionale in media tensione che alimenterà la cabina prevista per il nuovo edificio sia la cabina della torre di controllo dell'aeroporto già presente. La rete in media tensione che alimenterà l'edificio non prevede la presenza di gruppi elettrogeni dei servizi di emergenza che saranno invece posizionati sulla rete in bassa tensione. I gruppi elettrogeni presenti saranno alimentati a gasolio con riserva di carburante che verrà interrata in serbatoio a doppia camera. Oltre all'alimentazione da rete ordinaria è prevista una centrale di trigenerazione e quindi la presenza di un cogeneratore che coprirà in parte anche i carichi elettrici dell'edificio. Per i locali uffici così come per il data center è inoltre previsto un sistema di continuità assoluta tramite l'installazione di due stazioni UPS alimentati con batterie al litio. Al fine di garantire l'indipendenza da cause comuni di guasto, entrambi gli UPS saranno posti in locali tecnici compartimentati REI 60. Allo stesso modo i due arrivi della rete di media tensione ed i due gruppi elettrogeni saranno posizionati in locali tecnici con compartimentazione al fuoco.

Affrontato il tema dell'indipendenza da cause comuni di guasto, per garantire ridondanza del sistema è stato previsto uno schema doppio radiale a partire dalle sorgenti fino ai diversi utilizzatori finali da alimentare. Sono quindi previsti due rami completamente indipendenti tra loro da cause comuni di guasto come l'incendio e completamente ridondanti. Saranno per questo previsti per ogni singolo piano dell'edificio due quadri elettrici ubicati in locali tecnici

differenti e compartimentati così come i percorsi dei rami di alimentazione dei quadri saranno differenti.

La distribuzione degli impianti elettrici prevede l'utilizzo di cavidotti interrati nelle aree esterne e tubazioni sottotraccia o tubazioni plastiche a vista o in controsoffitto così come passerelle metalliche negli ambienti interni. In alcuni casi, dove previsto, l'alimentazione elettrica verrà distribuita nel pavimento flottante.

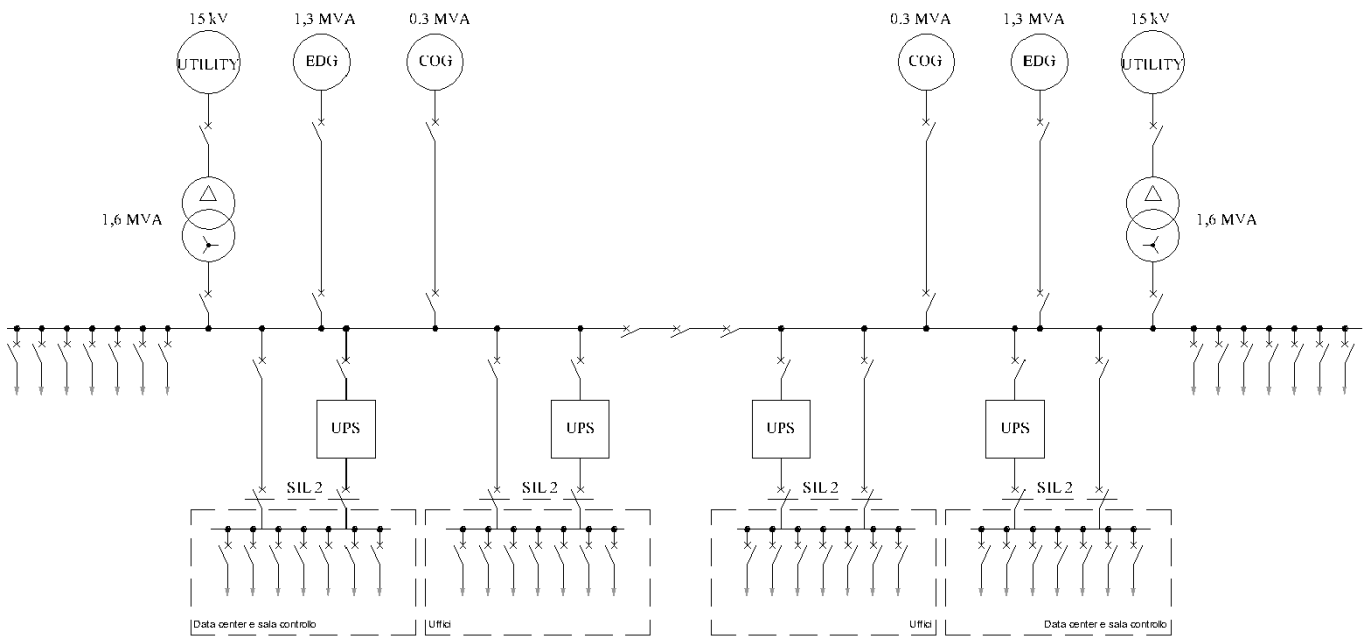


Figura 49. Schema elettrico di progetto

4.2.1. Schema 1

Il primo caso analizzato prevede la sola presenza di una linea di alimentazione da rete nazionale (*utility*) che garantisce la copertura del carico critico. Non è quindi presente ridondanza di nessuno dei componenti del sistema. È però prevista una alimentazione continua per il data center e per i locali adibiti ad ufficio tramite l'utilizzo di due UPS. Dallo schema rappresentato in figura si potrebbe intendere che il ramo di alimentazione dalla rete *utility* sia in parallelo con quello dell'UPS in corrispondenza del collegamento con la sbarra principale. In realtà il ramo parallelo all'UPS verrebbe utilizzato solo in caso di manutenzione e sostituzione dell'UPS stesso e quindi, ai fini del calcolo dell'affidabilità, non sono stati considerati come rami in parallelo.

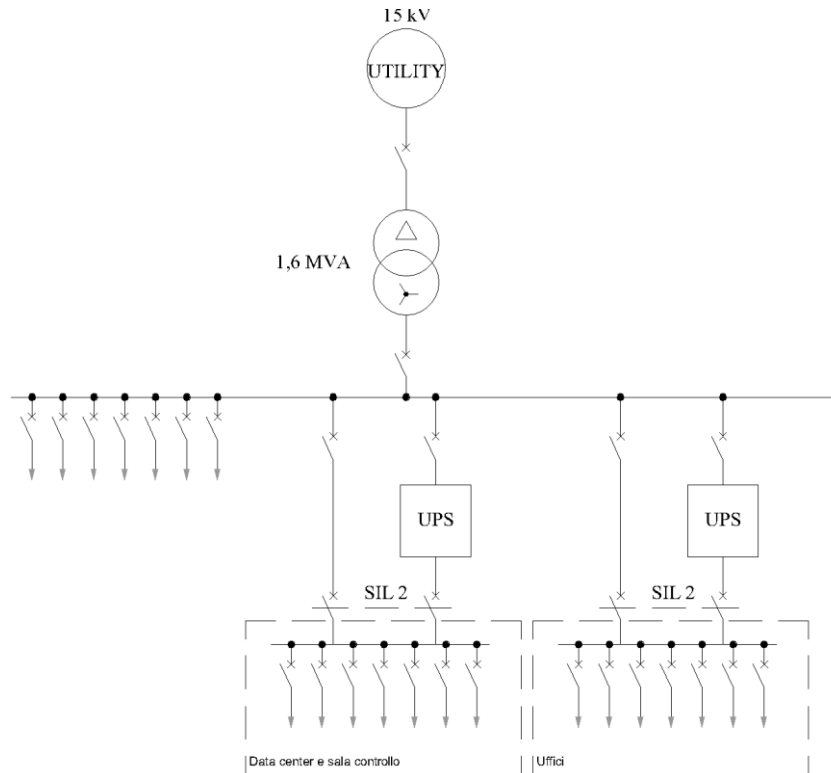


Figura 50. Schema 1 con singolo ramo di alimentazione

Nella tabella seguente sono indicati tutti i componenti del sistema e sono stati diversificati per il ramo inerente gli ambienti ordinari così come per il data center e la zona uffici.

SCHEMA 1			
Dispositivo		λ	$R(t)$
RETE UTILITY	Utility	1,956000	0,141423
	Connessione	0,000370	0,999630
	Sistema di protezione	0,000600	0,999400
	Sezionatore rotativo	0,001740	0,998262
	Interruttore fisso	0,004100	0,995908
	Trasformatore	0,000610	0,999390
	Condotto a sbarre	0,009490	0,990555
	Interruttore	0,005530	0,994485
	Condotto a sbarre	0,009490	0,990555

	Interruttori (34)	0,188020	0,828598
	Cavi interrati	0,002010	0,997992
	Terminali (4)	0,001480	0,998521
DATA CENTER			
RETE UPS	Interruttore	0,005530	0,994485
	UPS	0,009380	0,990664
	Sezionatore	0,001740	0,998262
	Condotto a sbarre	0,009490	0,990555
	Interruttori (10)	0,055300	0,946201
UFFICI			
RETE UPS	Interruttore	0,005300	0,994714
	UPS	0,009380	0,990664
	Sezionatore	0,001740	0,998262
	Condotto a sbarre	0,009490	0,990555
	Interruttori (6)	0,031800	0,968700

Tabella 1. Componenti dello schema 1 con relativi valori di rateo di guasto e affidabilità su base annua

L'unico ramo di alimentazione previsto è quindi quello da collegamento alla rete di media tensione nazionale. I rami di alimentazione del data center e della zona uffici si differenziano dagli ambienti ordinari dell'edificio per la presenza degli UPS che si collegano direttamente al condotto a sbarre indicato nella *rete utility* in tabella.

I valori di affidabilità ottenuti per questo tipo di architettura sono dati dalla composizione in serie di tutti questi componenti differenziati per i tre rami di alimentazione. I valori ottenuti sono elencati nella tabella 2.

AFFIDABILITA' SCHEMA 1	
AMBIENTI ORDINARI	0,11
DATA CENTER	0,13
UFFICI	0,13

Tabella 2. Valori di affidabilità dello schema 1 caratterizzato da singolo ramo di alimentazione e componenti in serie

È possibile notare che la presenza di UPS sui due rami del data center e della zona uffici, incrementata, seppur di poco, l'affidabilità.

4.2.2 Schema 2

Il secondo caso analizzato differisce dal primo per la sola presenza di un'ulteriore ramo di alimentazione, parallelo a quello dell'*utility*, che prevede la presenza di un cogeneratore il quale, nel caso particolare dell'edificio analizzato, è situato in una centrale di trigenerazione.

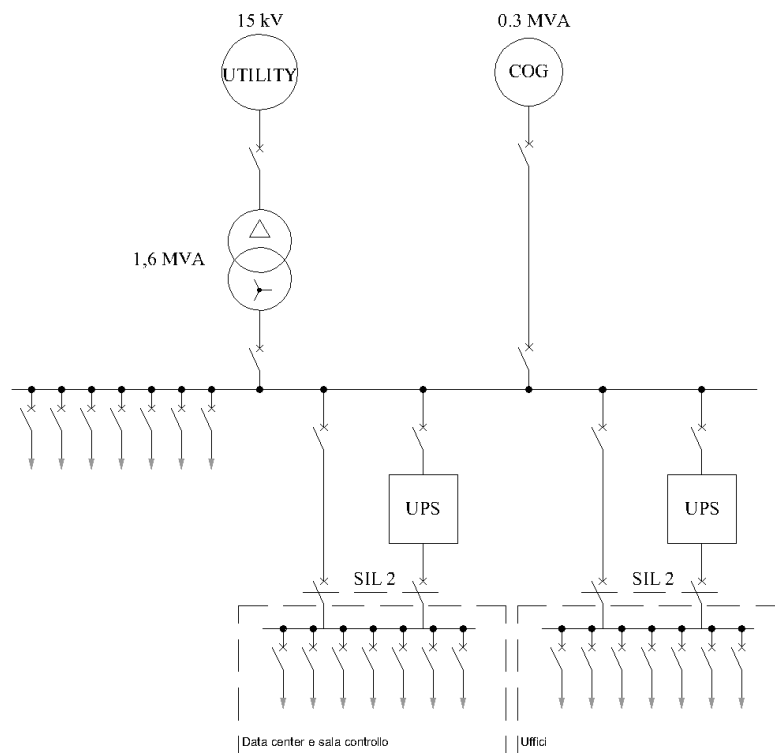


Figura 51. Schema 2 con cogeneratore

Nella tabella 3 sono così elencati i componenti dello schema. Si noti la mancanza dei rami di alimentazione inerenti al data center e alla zona uffici che risultano essere identici a quanto specificato nello schema 1 e quindi caratterizzati dalla presenza i UPS collegato al condotto di sbarre principale a cui poi si collegano i 34 interruttori della parte ordinaria dell'edificio.

	SCHEMA 2		
	Dispositivo	λ	$R(t)$
RETE UTILITY	Utility	1,95600	0,14142
	Connessione	0,00037	0,99963
	Sistema di protezione	0,00060	0,99940
	Sezionatore rotativo	0,00174	0,99826
	Interruttore fisso	0,00410	0,99591
	Trasformatore	0,00061	0,99939
	Condotto a sbarre	0,00949	0,99055
	Interruttore	0,00553	0,99449
RETE COG.	Cogeneratore	1,72760	0,17771
	Pannello di controllo	0,01111	0,98895
	Interruttore	0,00553	0,99449
	Cavi interrati	0,00201	0,99799
	Condotto a sbarre	0,00949	0,99055
	Interruttori (34)	0,18802	0,82860
	Cavi interrati	0,00201	0,99799
	Terminali (4)	0,00148	0,99852

Tabella 3. Componenti dello schema 2 con relativi valori di rateo di guasto e affidabilità su base annua

La presenza di una alimentazione in parallelo alla *rete utility* ha portato ad un aumento del livello di affidabilità del sistema abbastanza consistente. Confrontando, infatti, i valori ottenuti per lo schema 1 con quanto ottenuto per lo schema 2 (vedi tabella 4) si nota come $R(t)$ sia di fatto raddoppiato per la presenza del parallelo di due alimentazioni: utility e cogeneratore.

AFFIDABILITA' SCHEMA 2	
AMBIENTI ORDINARI	0,24
DATA CENTER	0,26
UFFICI	0,27

Tabella 4. Valori di affidabilità dello schema 2 caratterizzato da alimentazione in parallelo utility- cogenerazione

4.2.3. Schema 3

Il terzo schema, oltre prevedere ramo di alimentazione ordinaria, UPS per data center e uffici, e cogeneratore, è caratterizzato dalla presenza di un ramo di alimentazione proveniente da gruppi elettrogeni che si attivano nel momento in cui la rete nazionale, insieme al cogeneratore, non garantiscono la copertura del carico critico.

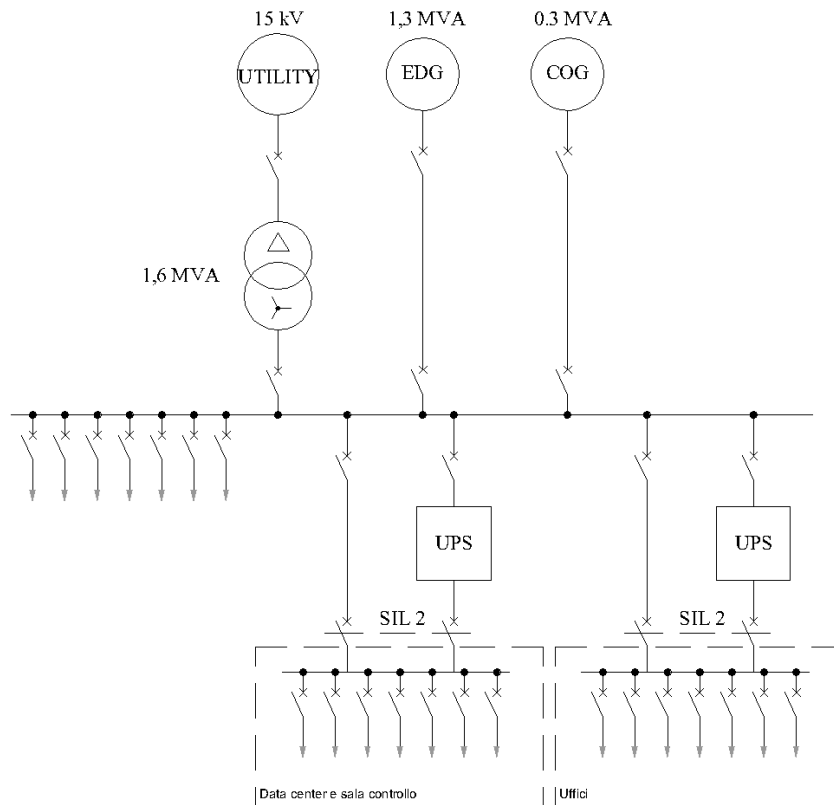


Figura 52. Schema 3 con aggiunta di alimentazione da gruppi elettrogeni

Come detto in precedenza, il ramo di collegamento del data center e della zona uffici rimangono invariati. Troviamo però l'aggiunta di un'ulteriore generatore in parallelo alla rete utility e cogeneratore visti nel caso dello schema 2.

	SCHEMA 3		
	Dispositivo	λ	$R(t)$
RETE UTILITY	Utility	1,95600	0,14142
	Connessione	0,00037	0,99963
	Sistema di protezione	0,00060	0,99940
	Sezionatore rotativo	0,00174	0,99826
	Interruttore fisso	0,00410	0,99591
	Trasformatore	0,00061	0,99939
	Condotto a sbarre	0,00949	0,99055
	Interruttore	0,00530	0,99471
RETE COG.	Cogeneratore	1,72760	0,17771
	Pannello di controllo	0,01111	0,98895
	Interruttore	0,00553	0,99449
	Cavi interrati	0,00201	0,99799
RETE GE	Gruppo elettrogeno.	0,63299	0,53100
	Interruttore	0,00530	0,99471
	Condotto a sbarre	0,00949	0,99055
	Interruttori (34)	0,18802	0,82860
	Cavi interrati	0,00201	0,99799
	Terminali (4)	0,00148	0,99852

Tabella 5. Componenti dello schema 3 con relativi valori di rateo di guasto e affidabilità su base annua

Come per il caso precedente, la presenza del gruppo elettrogeno, che porta così a 3 il numero dei generatori in parallelo per questo schema, comporta un'ulteriore aumento di affidabilità. Si nota che la presenza di un'ulteriore generatore, come per lo schema 2, provoca un incremento di affidabilità maggiore del 50%.

AFFIDABILITA' SCHEMA 3	
AMBIENTI ORDINARI	0,54
DATA CENTER	0,61
UFFICI	0,62

Tabella 6. Valori di affidabilità dello schema 3 caratterizzato da alimentazione in parallelo utility- cogenerazione- gruppo elettrogeno

4.2.4 Schema reale

Nel seguente paragrafo verrà calcolata l'affidabilità $R(t)$ dello schema previsto da progetto dell'aeroporto che è equivalente allo *schema 3* ma caratterizzato da ridondanza perfetta. Sono così di fatto raddoppiati i rami di alimentazioni da ogni sorgente fino ad ogni utilizzatore, garantendo l'indipendenza da cause comuni di guasto. I diversi locali tecnici così come i percorsi di distribuzione, infatti, sono differenti e ben separati tra loro tramite compartimentazioni antincendio. Si pone anche particolare attenzione alla presenza di tre congiuntori in serie sul condotto a sbarra principale. Secondo quanto indica l'*Uptime Institute* per ottenere uno schema classificato *Tier III, Concurrently maintainable site infrastructure* (2.2.1), oltre garantire la presenza di almeno due rami di alimentazione ridondanti, deve essere garantita la possibilità di effettuare interventi manutentivi senza inficiare la copertura dei carichi critici.

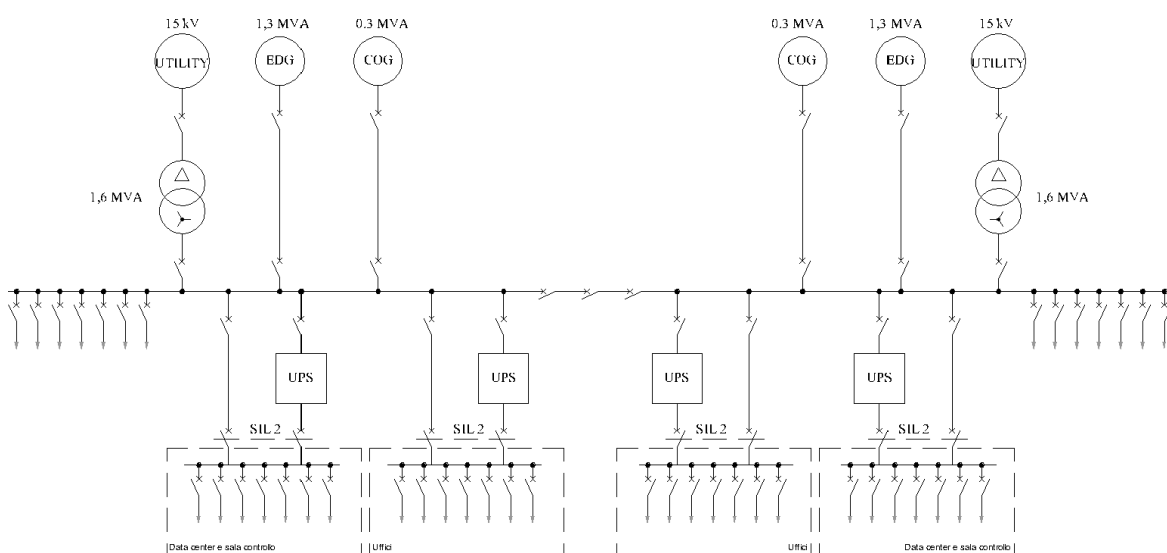


Figura 53. Schema elettrico finale

La presenza di ben 3 congiuntori di barra è quindi giustificata dalla necessità di poter garantire ad almeno uno dei due rami in parallelo di coprire completamente i carichi critici anche nel caso di necessità di effettuare interventi di manutenzione e/o sostituzione di un congiuntore.

L'effetto della completa ridondanza del sistema di alimentazione e quindi, di fatto, la presenza di due differenti rami di alimentazione per ogni utilizzatore, risulta in un considerevole aumento del livello di affidabilità. I valori ottenuti per lo schema caratterizzato da ridondanza sono elencati nella tabella 7.

AFFIDABILITA' SCHEMA RIDONDANZA	
AMBIENTI ORDINARI	0,84
DATA CENTER	0,86
UFFICI	0,86

Tabella 7. Valori di affidabilità dello schema reale di progetto, caratterizzato da ridondanza

Per completezza si è quantificata l'affidabilità secondo quanto prevedere l'*UptimeInstitute*, considerando cioè come unica fonte di energia esclusivamente i gruppi elettrogeni. Per questo motivo è necessario prevedere l'installazione di un gruppo elettrogeno che abbia un funzionamento continuo sebbene realmente si attivi esclusivamente in mancanza di alimentazione da parte della rete Utility o, come in questo caso, del cogeneratore. L'analisi è stata effettuata esclusivamente per il ramo a servizio del data center sia in caso di presenza di un singolo gruppo elettrogeno sia in caso di ridondanza con rami separati di alimentazione.

AFFIDABILITA' SCHEMA SOLO EDG		CON RIDONDANZA
DATA CENTER	0,48	0,75

Tabella 8. Affidabilità rete data center con esclusiva alimentazione da gruppi elettrogeni.

È interessante notare come calcolando l'affidabilità per il data center considerando esclusivamente alimentazione da gruppo elettrogeno, l'affidabilità raggiunga un valore di 0,75 e quindi non eccessivamente distante dai 0,86 registrati se tenessimo in considerazione anche l'alimentazione da rete nazionali e cogeneratore.

4.2.5 Considerazioni sullo studio di affidabilità

Dalle analisi svolte nel capitolo precedente è certamente interessante notare come, al variare della configurazione dello schema elettrico, è possibile quantificare numericamente i differenti livelli di affidabilità ed ottenere così una valutazione più oggettiva possibile. L'analisi è stata svolta tramite i *Reliability block diagram* (RBD) che, dati i valori di λ dei singoli componenti, permette di ottenere in maniera piuttosto immediata un valore di affidabilità sia in caso di componenti in serie che in parallelo. Nella tabella seguente è possibile notare l'aumento di

affidabilità all'aumentare delle sorgenti di energia che sono poste in parallelo, della presenza di un UPS ma, soprattutto, in caso di completa ridondanza del sistema.

	UTILITY	UTILITY-COG	UTILITY-COG-EDG	RIDONDANZA PERFETTA
AMBIENTI ORDINARI	0,11	0,24	0,54	0,84
DATA CENTER	0,13	0,26	0,61	0,86
UFFICI	0,13	0,27	0,62	0,86

Tabella 9. Variazione di affidabilità nelle diverse configurazioni

Come detto più volte, questo è solo una delle metodologie che è possibile utilizzare per studiare e quantificare l'affidabilità. Ma, a seguito dello svolgimento di questo studio, sorgono delle considerazioni e degli aspetti che dovrebbero essere studiati e trattati con maggiore attenzione.

In primo luogo, è necessario definire il lasso di tempo per cui si vuole ottenere $R(t)$. Convenzionalmente il tempo t viene posto pari ad 1 (ad indicare un giorno, un mese o un anno) in modo da permettere di semplificare il calcolo quantitativo di $R(t)$. È necessario, quindi, definire un valore di tempo per cui si intende quantificare l'affidabilità del sistema. Vista però la numerosa quantità di elementi che possono comporre uno schema più o meno complesso come quelli visti in precedenza, sembra aver poco senso calcolare l'affidabilità ad un lasso di tempo eccessivamente elevato. Ogni elemento, infatti, ha una sua vita utile e come ci si potrebbe aspettare che alcuni debbano e possano essere operativi anche per decenni, per altri è più probabile e frequente che debbano essere sostituiti perché obsoleti e/o perché caratterizzati da una vita utile sensibilmente inferiore. Questa forte varietà di componenti e della loro durabilità non consente di calcolare l'affidabilità di uno schema sulla base di un tempo t eccessivamente lungo ma, piuttosto, sembrerebbe più utile ed efficace basarsi su un lasso di tempo inferiore, ad esempio su base annua, come è stato fatto nel presente elaborato.

La forte varietà e tipologia di componenti di uno schema elettrico ha anche un ulteriore aspetto che deve essere preso in considerazione. I valori di $MTBF$ e quindi i guasti, che sono stati analizzati per ogni componente in modo da ottenere λ , sono di carattere meccanico. Si parla così esclusivamente di guasti e malfunzionamenti dovuti ai componenti meccanici dei diversi dispositivi. Questo approccio era certamente innovativo e funzionale fino a qualche decennio fa ma sembra essere riduttivo per impianti più recenti. Infrastrutture più moderne, come può

essere un data center, sono composte da sistemi molto più complessi che non prevedono solo la presenza di componenti meccanici ma anche dispositivi intelligenti e tecnologie più articolate. Quantificare l'affidabilità solo tramite l'utilizzo dei dati forniti dall' *IEEE* sembra risultare così riduttivo, in quanto non si è in grado di tener conto dei numerosi metodi di guasto che possono interessare sistemi e tecnologie più moderne e complesse. A tale scopo si dovrebbero poter registrare e classificare numerosi dati relativi alla frequenza e alle differenti tipologie di guasto che interessano questi dispositivi per poi essere in grado di ottenere un valore di λ che sia figlio di un'analisi statistica più complessa e dispendiosa attraverso, ad esempio, il Metodo Markov.

Un ulteriore aspetto che tramite un'analisi con RBD non viene considerato, è quello della indipendenza da cause comuni di guasto dei due rami ridondanti. Sebbene si sia visto come la presenza della ridondanza abbia aumentato sensibilmente il valore di affidabilità dello schema, tramite questa metodologia non è in alcun modo possibile tener conto della completa separazione fisica dei due rami del sistema. Come detto i locali tecnici ed i percorsi di distribuzione dei due rami sono differenti e separati tra loro tramite compartimentazioni antincendio. Non è stato però possibile tener conto di questo importante aspetto legato alla completa indipendenza da cause comuni di guasto dei due rami in quanto il valore di λ dei componenti non tiene chiaramente conto di questo aspetto. Che i percorsi dei cavi di alimentazione si trovino nello stesso cavedio o in cavedotti differenti, che siano nelle vicinanze di tubature idriche o completamente separate da queste o che sia previsto o meno un sistema di protezione al fuoco, non ha nessuna ricaduta sul valore finale $R(t)$.

In conclusione, l'analisi tramite RBD proposta dall'*IEEE* è certamente un metodo funzionale e relativamente rapido di effettuare un'analisi quantitativa di affidabilità di uno schema funzionale. Per poterla effettuare è però necessario essere a conoscenza dei valori di rateo di guasto dei singoli componenti ma, soprattutto, essere coscienti che si tratta di una metodologia che ha dei limiti in termini di lasso di tempo per cui effettuare l'analisi ma, soprattutto, che rischia di non considerare differenti metodi di guasto così come di non tener conto delle condizioni di installazione in opera e quindi dell'ambiente in cui i diversi componenti del sistema devono operare.

4.3 Gli impianti meccanici

Lo schema e l'impianto che verrà analizzato di seguito risulta essere alquanto articolato e complesso. Essendo l'edificio caratterizzato da differenti aree funzionali e, di conseguenza, da carichi termici fortemente variabili, l'impianto prevede la presenza di numerosi generatori di calore, pompe di calore e dispositivi atti al trattamento ed al ricambio dell'aria interna. Si è fatta inoltre particolare attenzione all'utilizzo di fonti di energia rinnovabile e alla possibilità di sfruttare l'energia prodotta in loco.

La produzione di fluido termovettore caldo e freddo avviene attraverso il sistema di trigenerazione e tramite l'utilizzo di pompe di calore reversibili ad acqua di falda. La centrale di trigenerazione è costituita da un cogeneratore, alimentato a gas, che è in grado di produrre energia elettrica e fumi caldi i quali, tramite l'utilizzo di un gruppo frigo ad assorbimento, fornisce acqua refrigerata alle utenze (ventilconvettori e UTA). Perché il gruppo frigo ad assorbimento, detto anche assorbitore, abbia un rendimento costante, deve essere raffreddato o tramite acqua di falda o per mezzo di torri evaporative. Nel caso specifico, l'impianto prevede l'uso di pozzi di falda che, con interposto uno scambiatore di calore a piastre, raffreddano l'assorbitore.

Oltre alla centrale di trigenerazione, la produzione di fluido termovettore caldo e freddo avviene tramite pompe di calore ad acqua di falda. Il circuito chiuso dei pozzi di falda è collegato ad uno scambiatore di calore a piastre a sua volta connesso alla pompa di calore stessa.

Per garantire un certo livello di affidabilità, come da prassi, l'impianto è caratterizzato da elementi ridondanti che permettono la possibilità di effettuare interventi manutentivi senza bloccare completamente il funzionamento dell'impianto. A tale scopo, in modo particolare sul circuito primario, si nota la ridondanza dei desabbiatori sul circuito dell'acqua di falda così come la presenza di uno scambiatore di calore ausiliario che entra in funzione nel caso in cui il principale si dovesse guastare o dovesse essere soggetto ad interventi di manutenzione. Allo stesso modo è presente ridondanza delle pompe nel circuito sempre per garantire, come nel caso elettrico, la *Concurrent maintainability*. Per un'ulteriore sicurezza e affidabilità, le pompe di calore possono essere alimentate dalla rete dell'acquedotto e quindi da contatore principale nel caso di mal funzionamento del circuito dei pozzi di acqua di falda.

È possibile visualizzare l'intero schema dell'impianto tecnologico nell'[allegato 1](#) posto al termine dell'elaborato.

Di seguito verrà calcolata l'affidabilità dello schema sopra descritto secondo quanto fatto precedentemente per lo schema elettrico di potenza (4.1). Ai fini della valutazione del livello di affidabilità, inoltre, verrà analizzato esclusivamente il ramo dell'impianto a servizio della sala controllo e del data center ed in particolare il sistema di mandata del fluido refrigerante e quindi del sistema di raffreddamento.

Primo passo per calcolare $R(t)$ è quindi quello di ridisegnare l'impianto meccanico attraverso un diagramma a blocchi che ci permetta di individuare i tratti a singolo ramo e in parallelo.

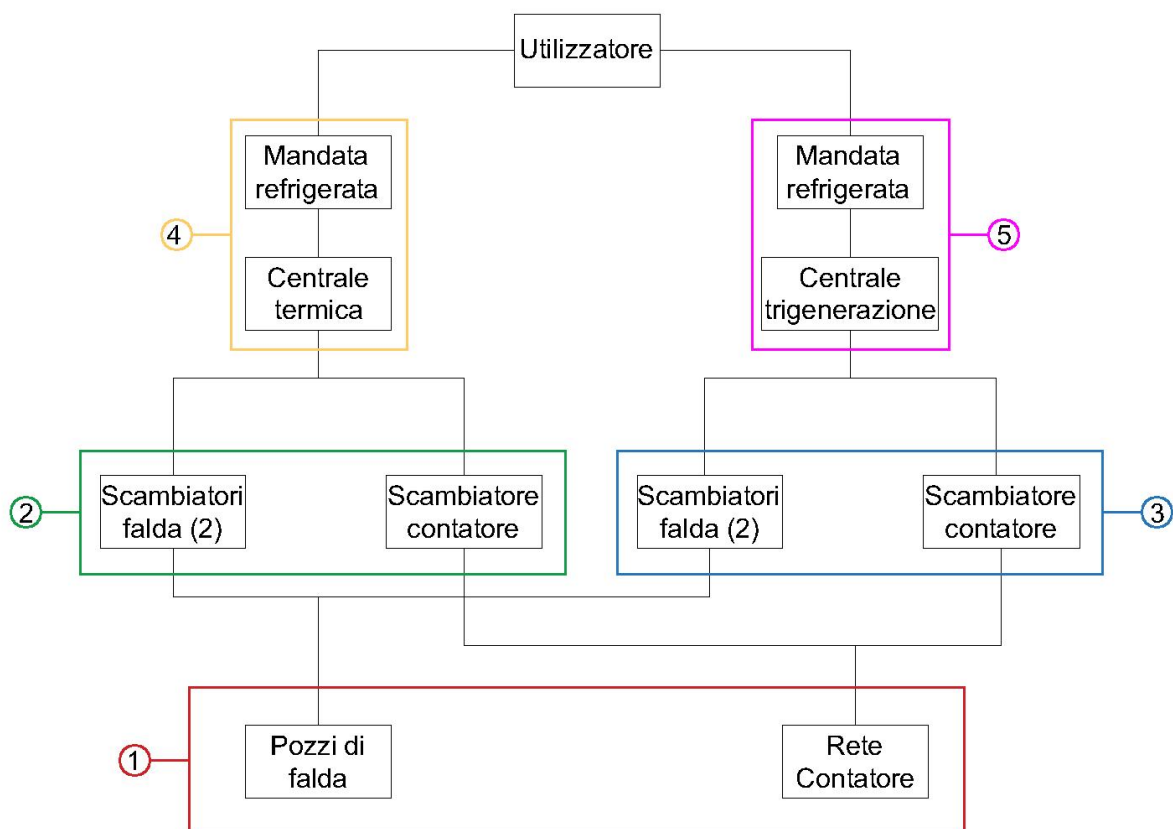


Figura 54. Diagramma a blocchi esemplificativo dello schema analizzato. I valori di rateo di guasto dei componenti sono espressi nella tabella seguente.

Una volta compreso lo schema funzionale, sono stati associati ai singoli componenti del sistema i valori corrispondenti di rateo di guasto e di affidabilità sempre su base annua.

IMPIANTO MECCANICO			
Dispositivo		λ	$R(t)$
CENTRALE TERMICA			
ACQUA DI FALDA	Pompa acqua di falda (3)	0,00631	0,99371
	Tubature	0,00190	0,99810
	Collettore	0,00190	0,99810
LATO FALDA	Tubature	0,00190	0,99810
	Scambiatore (2)	0,00388	0,99613
CONTATORE	Tubature	0,00190	0,99810
	Scambiatore	0,00388	0,99613
CIRCUITO MANDATA	Tubature	0,00190	0,99810
	Chiller	0,11820	0,88852
	Tubi acqua refrigerata	0,00137	0,99863
CIRCUITO RITORNO	Tubature	0,00190	0,99810
	Pompe (3)	0,00631	0,99371
	Tubature	0,00190	0,99810
CENTRALE TRIGENRAZIONE			
	Cogeneratore	1,72760	0,17771
LATO FALDA	Tubature	0,00190	0,99810
	Scambiatore (2)	0,00388	0,99613
CONTATORE	Tubature	0,00190	0,99810
	Scambiatore	0,00388	0,99613
	Tubature	0,001900	0,998102
	Assorbitore	0,171990	0,841988
	Tubi acqua refrigerata	0,00137	0,99863
CIRCUITO RITORNO	Tubature	0,00190	0,99810
	Pompe (3)	0,00631	0,99371
	Tubature	0,00190	0,99810

Tabella 10. Tabella valori di rateo di guasto e affidabilità dei componenti dell'impianto meccanico

Infine, il valore complessivo di affidabilità del sistema è stato calcolato tenendo conto della presenza di parallelismi e ridondanze come evidenziato nella figura 48 nei riquadri colorati e numerati.

AFFIDABILITA'	
Parallelo pozzi-contatore (1)	1,00
Parallelo scambiatori Centrale termica (2)	1,00
Parallelo scambiatori Assorbitore (3)	1,00
Parallelo (2 e 3)	1,00
Mandata chiller (4)	0,89
Mandata Assorbitore (5)	0,84
Parallelo (4 e 5)	0,98
TOTALE	0,9812

Tabella 11. Valori di affidabilità dei singoli rami e dell'intero impianto meccanico

4.3.1 Considerazioni sullo studio di affidabilità dell'impianto meccanico

A seguito dello studio quantitativo di affidabilità dell'impianto meccanico attraverso il diagramma a blocchi di affidabilità e avendo quindi applicato la medesima metodologia di calcolo proposta per gli impianti elettrici, è emerso che questo tipo di analisi sebbene ci permetta di quantificare l'affidabilità del sistema, non risulta essere particolarmente intuitiva nella sua applicazione nel caso di impianti meccanici. Questo è certamente dettato dalla mancanza di dati relativi al rateo di guasto di tutti i componenti ma anche dalla differenza di complessità che contraddistingue un sistema tecnologico da uno elettrico.

Come detto occorre sottolineare che per poter effettuare un'analisi tramite RBD è fondamentale, come più volte sottolineato, essere a conoscenza dei valori di λ di ogni singolo componente. Più volte durante la stesura del seguente elaborato è emerso come in materia di impianti di tipo HVAC lo studio dei livelli di affidabilità, dei tempi medi di guasto e di riparazione

dei componenti di questo tipo di sistemi sia ad uno stadio embrionale. Ne risulta una lacunosa e strutturale mancanza di dati che è base fondante in materia di studi affidabilistici. Sebbene nel *PREP DATABASE /Version 4.2* presente nel *IEEE gold Book* vi siano dati relativi ad alcuni componenti di questa tipologia di sistemi, risulta evidente come questo non sia sufficiente per poter analizzare e studiare le numerosissime e differenti tipologie di impianti che vengono progettati e realizzati. Facendo riferimento al caso specifico analizzato, non è stato possibile ottenere valori di λ esattamente corretti ad esempio per i pozzi di presa dell'acqua di falda, dei collettori, desabbiatori, gruppi frigo o pompe di calore. Il settore degli impianti meccanici sappiamo essere caratterizzato da costanti e continui rinnovamenti. Gli impianti moderni sono sempre più efficienti, vi sono richieste di potenze sempre maggiori e si pone sempre maggior attenzione alla riduzione degli impatti ambientali di questi dispositivi. Sarebbe quindi opportuno diffondere la consapevolezza dell'importanza dell'affidabilità sin dalle fasi di progettazione e produzione di questi dispositivi essendo un settore fortemente innovativo ed avanzato. Risultano così centrali in questo processo le figure del produttore e del manutentore affiancate a quelle del progettista.

Un ulteriore aspetto emerso dall'analisi di questo schema impiantistico, riguarda il peso specifico che ogni singolo componente dell'impianto ha in termini di affidabilità. Come è possibile notare dalla tabella 10, ai fini del calcolo di $R(t)$, non sono state in alcun modo considerate le numerose valvole, di differenti tipologie, previste nell'impianto. Nonostante fossero disponibili i valori di λ per questi dispositivi, essi risultano essere di un ordine di grandezza fortemente inferiore rispetto agli altri componenti e, di conseguenza, non in grado di variare sensibilmente il valore di affidabilità del sistema. A tale proposito ci si ricollega a quanto emerso al termine dell'analisi del sistema elettrico. In un impianto meccanico la disposizione e la distribuzione di valvole in determinate posizioni influenza la possibilità o meno di effettuare interventi di manutenzione e/o sostituzione senza causare il blocco completo dell'intero impianto. Di qui la considerazione legata ai cosiddetti *colli di bottiglia*. Al fine quindi di mitigare il rischio di malfunzionamento dell'intero impianto a causa del guasto anche di un singolo componente, come ad esempio una valvola, non basta esclusivamente garantire la ridondanza dei componenti ma che essi siano indipendenti da cause comuni di guasto e quindi che i due rami siano completamente indipendenti tra loro e quindi in grado di garantire la completa copertura dei carichi, termici o elettrici, anche nel caso in cui uno dei due fosse fuori uso. È del tutto evidente come questo aspetto sia centrale in termini di quantificazione del livello di

affidabilità di un sistema. Lo studio attraverso RBD e del calcolo di $R(t)$ tramite i valori di rateo di guasto risulta, da questo punto di vista, particolarmente farraginoso e poco corretto.

Sempre in relazione al contributo in termini di affidabilità dei singoli componenti, facendo sempre riferimento alla tabella 10, risulta evidente la differenza tra tutti i dispositivi e i generatori di fluido termovettore refrigerante: chiller della centrale termica e gruppo frigo ad assorbimento della centrale di trigenerazione. Il valore di $R(t)$ totale del sistema risulta così essere particolarmente influenzato dall'affidabilità dei generatori presenti nel sistema.

Infine, vi è un aspetto meramente applicativo che rende lo studio di affidabilità tramite RBD per un impianto meccanico non di immediata applicazione. Data la complessità del sistema, la presenza di più tratti di tubazioni che servono e collegano elementi differenti e data anche la presenza di non solo un circuito di mandata ma anche di ritorno, costruire un diagramma a blocchi che descriva quanto più fedelmente possibile l'impianto reale, risulta essere alquanto confuso e articolato. Nel caso analizzato si è fatto riferimento esclusivamente al circuito di mandata del fluido refrigerante utile al raffrescamento della sala controllo e del data center. Tramite questa metodologia di calcolo sembra quindi essere difficoltoso tener conto di macchinari, quali ad esempio dei gruppi frigoriferi reversibili, che possono non solo produrre acqua refrigerata ma anche un fluido termovettore caldo e quindi con rischi differenti per i circuiti e le tubature. Allo stesso modo il circuito di ritorno in centrale può essere soggetto a guasti o interventi manutentivi e quindi causare un momentaneo blocco dell'intero impianto.

Sono numerosi gli aspetti da tenere in considerazione nel momento in cui si intenda quantificare il livello di affidabilità di un impianto di questo tipo. Per poter risolvere anche solo in parte gli aspetti legate a queste problematiche, il seguente elaborato propone una metodologia di classificazione degli schemi funzionali che ha lo scopo di mitigare il rischio della creazione di *colli di bottiglia* proponendo una progettazione che veda il coinvolgimento di tutti i soggetti che devono progettare, realizzare e mantenere l'impianto stesso, così come gli aspetti legati alla reale presenza di sistemi ridondanti caratterizzati da indipendenza da cause comuni di guasto. Tale metodologia di classificazione viene esposta e trattata nel [Capitolo quinto](#). Infine, in relazione alla difficoltà legata allo studio di affidabilità dei circuiti di mandata e ritorno di un impianto idronico, data la complessità di elementi e collegamenti tra i componenti, sarebbe certamente più utile e semplice effettuare un'analisi quantitativa dell'affidabilità per i due rami, di mandata e di ritorno, separatamente. Sebbene concettualmente questo non abbia pienamente senso, in quanto il funzionamento dell'impianto dipende dal corretto

funzionamento di ambo i rami, ci permette di avere un valore numerico di quantificazione dell'affidabilità che abbiamo visto essere un punto di partenza centrale per progettare e costruire un impianto più sicuro e affidabile.

4.3.2 Ulteriori aspetti legati all'affidabilità

Tutti gli aspetti analizzati finora riguardano i componenti e lo schema funzionale che concorrono a formare l'impianto meccanico. Vi è però un ulteriore aspetto che non dipende direttamente dal sistema tecnologico ma ne influenza il funzionamento e, di conseguenza, l'affidabilità. Questo aspetto concerne l'alimentazione elettrica dei macchinari e dei dispositivi dell'impianto meccanico.

Così come viene fatto per il sistema elettrico, in modo particolare per alcuni tipi di utilizzatori, è fondamentale che sia garantita una alimentazione continua e preferenziale anche in caso di guasto del sistema principale. Nella cultura progettuale degli impianti tecnologici, questo aspetto è spesso sottovalutato o, in alcuni casi, in alcun modo considerato. Gli impianti a servizio di un'infrastruttura strategica come un ospedale, un data center, un aeroporto, o in edifici in cui non è possibile effettuare ricambi d'aria naturalmente attraverso l'involucro edilizio, come ad esempio nei piani più alti di un grattacielo, dovrebbero in qualsiasi caso poter funzionare e garantire un comfort idoneo anche in caso di guasto. Non è così sufficiente garantire la ridondanza dei componenti e la loro indipendenza da cause comuni di guasto ma anche fare in modo che essi possano funzionare in caso di mancanza di alimentazione elettrica.

Nel caso dei data center abbiamo visto come *Uptime Institute*, per classificare un data center *Tier IV*, imponga che sia garantito un sistema di raffrescamento continuo non solo in caso di malfunzionamento di uno dei due rami dell'impianto meccanico ma anche in caso di mancanza di alimentazione elettrica (2.2.3). Un sistema *Tier IV* deve quindi garantire la presenza di un accumulo di energia termica (*thermal energy storage*) in grado di garantire il funzionamento continuo del sistema di raffrescamento in caso di guasto sul sistema di alimentazione elettrica e conseguente attivazione dell'UPS. Ad esempio, un sistema di raffrescamento, in caso di guasto sull'alimentazione ordinaria di corrente, si collega ai generatori presenti. Sebbene questi si attivino immediatamente dopo il guasto, il sistema di raffrescamento potrebbe impiegare fino a 15 minuti prima di riattivare il proprio ciclo frigorifero e raffrescare nuovamente l'ambiente.

Per questo i sistemi di accumulo di energia termica devono garantire il raffrescamento per una durata pari al tempo di riavvio dell'impianto meccanico.

Tutti questi aspetti e queste valutazioni dipendono chiaramente dalle diverse tipologie di impianti meccanici previsti nel progetto e dal tipo di UPS installato. Non sempre, infatti, attraverso un gruppo elettrogeno e UPS è possibile alimentare un gruppo frigorifero, in quanto le potenze elettriche richieste da quest'ultimo possono essere in alcuni casi molto elevate.

Nonostante in questi ambiti, come ad esempio in materia di progettazione dei data center, non sia diffusa una modalità di calcolo e di quantificazione del livello di affidabilità, sono comunque diffuse delle buone pratiche di progettazione come quelle proposte dall' *Uptime Institute*. Si è anche visto come l'*ASHRAE* abbia effettuato numerosi studi e analisi che forniscono delle linee guida per la progettazione di un impianto di raffrescamento che sia efficiente, funzionale e con un occhio rivolto anche alla riduzione dei consumi energetici ed i relativi costi (3.3). Un ulteriore aspetto che concorre all'ottenimento di impianti di raffrescamento a servizio dei data center piuttosto affidabili riguarda la qualità dei macchinari utilizzati. I condizionatori di precisione, spesso utilizzati in questi ambienti, sono dispositivi composti da componenti sempre più affidabili come ventilatori gestiti ognuno in maniera indipendente, valvole di regolazione che, tramite un sistema di controllo elettronico, permettono di individuare preventivamente problemi sul circuito idrico e numerosi sistemi di sicurezza e regolazione automatici estremamente moderni ed efficienti. Nei più recenti impianti in cui vengono impiegati condizionatori di precisione, al fine di massimizzare l'affidabilità, è garantita la ridondanza affidando non più il controllo dell'intero impianto ad una singola unità detta Master ma facendo in modo che ogni unità sia in grado di assumere il controllo della rete locale anche in caso di guasti nella rete di connessione tra i vari dispositivi (Multimaster).

L'affidabilità di questi dispositivi è inoltre garantita dalla possibilità di avere due sorgenti di raffreddamento completamente indipendenti tra loro e complete di singole valvole di regolazione. Vi sono in commercio condizionatori di precisione che hanno per fonte primaria acqua refrigerata proveniente dai gruppi frigoriferi presenti nell'edificio e come fonte secondaria di emergenza, un sistema ad espansione diretta collegata a condensatori ad aria remoti o ad acqua incorporati.

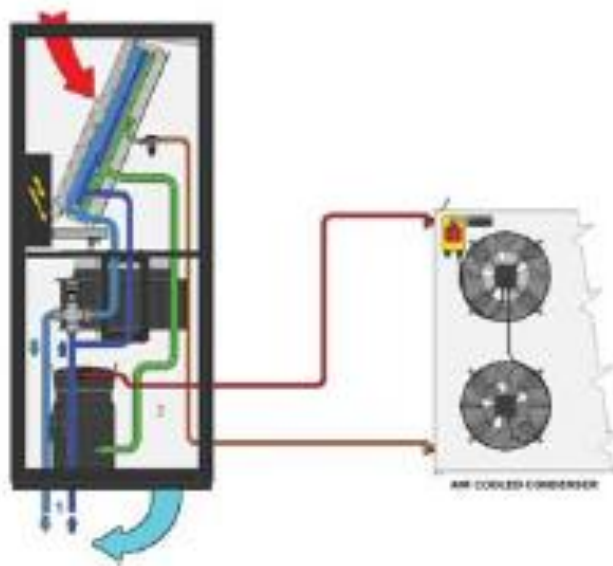


Figura 55. Condizione di precisione del tipo Two Sources ad acqua refrigerata + espansione diretta

Tramite un'analisi attraverso RBD appare alquanto macchinoso e difficoltoso poter tener conto di questi aspetti a maggior ragione se non si è a conoscenza di valori di rateo di guasto dei più moderni e complessi dispositivi meccanici presenti in commercio.

Come abbiamo visto in materia di progettazione di impianti di impianti di raffrescamento per i data center, sono diffuse buone pratiche e dispositivi in grado di garantire livelli di affidabilità consoni. Ma non in tutti gli ambiti di progettazione queste pratiche sono diffuse. Si riporta di seguito un esempio relativo ad un impianto di trattamento aria a servizio degli stabulari presenti in un edificio universitario. In questi locali, adiacenti a un laboratorio di ricerca scientifica, vengono allevati i roditori che sono impiegati per esperimenti scientifici. Il loro valore, in base al tipo di ricerca per cui vengono utilizzati, può arrivare fino a decine di migliaia di euro. È quindi evidente come un eventuale guasto al sistema aeraulico di questo ambiente possa provocare dei grossissimi danni e ingenti perdite di carattere economico. L'impianto prevede la presenza di un UTA del tipo "a tutt'aria esterna" con estrattori dell'aria ambiente. Per la zona degli stabulari viene previsto un sistema di umidificazione adiabatico funzionante ad acqua atomizzata ad alta pressione. Nel locale deve essere quindi garantita una temperatura interna compresa tra i 22 °C e 24 °C ed un livello di umidità relativa pari al 50 % durante tutto l'anno. L'impianto deve quindi essere fortemente affidabile non solo in relazione al funzionamento dell'UTA e dei gruppi frigoriferi utili ad alimentare le batterie di post riscaldamento, ma anche all'alimentazione elettrica di questi stessi componenti. Durante le fasi di verifica dell'impianto

elettrico con alimentazione da gruppo elettrogeno è stato osservato come siano alimentati il quadro elettrico della centrale termica, le pompe idrauliche delle batterie dell'UTA, gli umidificatori, i ventilatori dell'UTA ed il quadro elettrico del locale in cui è posta l'UTA. Il gruppo elettrogeno non è quindi in grado di alimentare i gruppi frigoriferi presenti nell'edificio ed è per questo motivo che la centrale termica è dotata di un volano termico di acqua refrigerata che, nel caso specifico, è costituito da quattro serbatoi da 30 m³ necessari ad alimentare i circuiti di raffreddamento dello stabulario. L'utilizzo di serbatoi inerziali è certamente utile a garantire il funzionamento dell'impianto meccanico anche in caso di mancanza di alimentazione elettrica ma devono essere anche considerati i costi di installazione, gestione, manutenzione di questi dispositivi soprattutto in edifici di grande dimensione e soprattutto quale sia il loro contributo in termini di affidabilità.

Quando si parla di affidabilità di un impianto tecnologico non ci si deve quindi solo fermare all'analisi dei possibili guasti e alla frequenza con cui questi possono presentarsi ma anche a come viene garantito il funzionamento in caso di mancanza di alimentazione elettrica. Tramite lo studio dei diagrammi a blocchi di affidabilità, che comunque è caratterizzato da limiti piuttosto evidenti come descritto nel capitolo [4.2.1](#), non è in alcun modo possibile tener conto degli aspetti legati all'alimentazione elettrica e come questo aspetto abbia influenze in termini di affidabilità.

5. Discussione e conclusioni

L'applicazione dei diagrammi a blocchi di affidabilità (*RBD*) ai fini della quantificazione del valore di $R(t)$ di una qualsiasi tipologia di impianto elettrico e meccanico, come visto durante il presente lavoro di tesi, ha certamente aspetti positivi, ma è anche caratterizzato dalla necessità di essere affinato in alcuni suoi aspetti. Gli aspetti che devono essere perfezionati non sono però di carattere matematico e applicativo del calcolo ma, piuttosto, concernenti la fase di realizzazione e costruzione di questi schemi. Come si è visto precedentemente nei casi applicativi ([Capitolo 4](#)), tramite gli *RBD* non sono tenuti in considerazione aspetti come la manutenibilità, la presenza di *colli di bottiglia*, la realizzazione di sistemi realmente ridondanti e quindi costruttivamente indipendenti da cause comuni di guasto, l'alimentazione elettrica in caso di guasto della rete utility, la presenza o meno di un sistema di controllo continuo dell'impianto e, infine, di tutte le tipologie di guasto a cui può essere soggetto un qualsiasi dispositivo, oltre che come il suo valore di λ sia variabile nel tempo.

Nel seguente capitolo verrà quindi ipotizzata una metodologia che parte dalla classificazione dell'edificio oggetto di studio e, quindi, dalla necessità di approfondire l'aspetto dell'affidabilità, per individuare dove sarà, quindi, maggiormente necessario investire economicamente e progettualmente per la realizzazione dell'impianto. Una volta definito questo aspetto, se risulterà necessario, si quantificherà l'affidabilità dello schema funzionale attraverso *RBD*. Ottenuto il valore numerico di $R(t)$ sarà possibile identificare lo schema funzionale tramite un sistema di lettere e numeri che ne descriveranno in modo più accurato e completo alcuni aspetti. In modo particolare, sarà possibile approfondire l'aspetto legato all'indipendenza da cause comuni di guasto in presenza di ridondanza, all'alimentazione elettrica e alla presenza di un sistema di controllo e di monitoraggio dell'impianto.

La presente metodologia di classificazione è pensata per essere applicata anche dai progettisti meno esperti, sebbene sia necessario essere a conoscenza della metodologia di calcolo di affidabilità tramite *RBD*. La parte di classificazione dell'edificio potrebbe anche considerare il coinvolgimento della committenza e dei manutentori dell'impianto al fine di definire di comune accordo i limiti di accettazione di eventuali guasti e malfunzionamenti e ridurre quanto più possibile rischi di perdite economiche ingenti o eventuali rischi di sicurezza per i fruitori. Per poter definire comunque in maniera più accurata possibile $R(t)$, rimane la necessità di dover implementare in futuro la recezione di quanti più dati possibili relativi a tutte le macchine e i

componenti tipici di un impianto HVAC. L'ottenimento di questi dati, con il passare degli anni, permetterà non solo ai progettisti, ma anche ai produttori e manutentori di costruire degli impianti tecnologici sempre più efficienti, funzionali, affidabili, sviluppando anche sistemi di controllo e gestione sempre più efficaci.

Il presente metodo di classificazione, prima di approfondire gli aspetti più tecnici legati all'affidabilità, ha lo scopo di indurre tutti i soggetti coinvolti nel processo di progettazione e realizzazione dell'impianto a ragionare sulle criticità che si potrebbero presentare e, quindi, alla necessità o meno di intraprendere una progettazione accurata di tutti i componenti del sistema, della loro fidatezza, della necessità di prevedere rami di alimentazione ridondanti, di un piano di manutenzione e di intervento specifico e preventivo in caso di guasto.

		Valutazione del rischio in caso di guasto	
		Sicurezza e salute	Perdita valori economici
Destinazione d'uso	Ospedali e case di cura	●	●
	Attività industriale	●	●
	Aeroporto	●	●
	Teatri, cinema, musei, biblioteche	●	●
	Laboratori e magazzini	●	●
	Uffici pubblici e/o privati	●	●
	Residenziale e ristorazione	●	●

Tabella 12. Schema di valutazione del rischio in relazione alla destinazione d'uso

Tramite il seguente schema è possibile effettuare una prima analisi semplificata del caso in cui si sta andando ad intervenire. In relazione alla destinazione d'uso dell'edificio è, quindi, possibile individuare tre differenti livelli di rischio, legati ad un possibile guasto dell'impianto oggetto di studio, sia in relazione alla sicurezza delle persone che usufruiscono dell'edificio sia in termine di valori economici coinvolti. I tre differenti livelli sono elencati nella legenda seguente.




	Rischio accettabile
	Rischio da valutare
	Rischio non accettabile

Tabella 13. Legenda schema di valutazione

In caso di “rischio non accettabile”, sarebbe consigliato procedere con l’analisi qualitativa e quantitativa dell’affidabilità dello schema oggetto di studio. In particolar modo, sarebbe preferibile progettare e realizzare un impianto caratterizzato da ridondanze, parallelismi e sistemi di manutenibilità e monitoraggio maggiormente avanzati. Questo livello di rischio è associato a edifici quali ospedali, aeroporti o laboratori e magazzini, che contengono materiale particolarmente pericoloso per la salute delle persone o di valore economico alto. La mancanza di alimentazione elettrica o il malfunzionamento dell’impianto di climatizzazione in un ospedale può, infatti, creare disagi, spesso anche molto gravi, per i pazienti più deboli o a rischio che necessitano del funzionamento continuo di macchinari medici come i respiratori. Allo stesso modo, il blackout in un aeroporto può causare gravi perdite economiche per le compagnie aeree, causate dal cancellamento o ritardo di voli.

In caso di “rischio da valutare”, si deve far riferimento al particolare caso oggetto di studio. La mancanza di alimentazione elettrica alla catena di produzione di un’industria può, infatti, avere ricadute differenti in termini economici, in relazione alla grandezza e all’importanza dell’industria stessa. Allo stesso modo, il malfunzionamento del sistema di raffrescamento di un laboratorio scientifico potrebbe avere ricadute - in termini di sicurezza delle persone e di valori economici - ben maggiori rispetto all’accadimento dello stesso evento in un magazzino di prodotti tessili. Il rischio infatti di avere livelli di temperatura alti con presenza di materiali e sostanze infiammabili per la salute delle persone è molto alto, così come, allo stesso modo, l’interruzione della catena del freddo di sostanze biologiche può provocare gravi perdite economiche e dei risultati ottenuti in anni di ricerche. Allo stesso modo, nel caso di uffici pubblici

o privati, il rischio di possibili perdite di carattere economico è relativo alla presenza o meno di data center o sistemi di sicurezza informatici, che devono poter garantire un'alimentazione continua e ininterrotta anche in caso di guasto.

Nel caso di "rischio accettabile", si accetta la possibilità di avere un maggiore rischio di guasto dei sistemi impiantistici, che svolgono, quindi, una funzione di comfort per gli utilizzatori. Parliamo principalmente di edifici residenziali, edifici pubblici come teatri, cinema, musei o piccoli uffici, dove non vi sono macchinari che necessitano di un'alimentazione continua, così come l'impianto di climatizzazione ha il solo scopo di garantire livelli di comfort termoigrometrico per le persone.

Nel caso in cui il rischio legato al malfunzionamento dell'impianto sia "da valutare" o "non accettabile", sarebbe preferibile procedere con la classificazione quantitativa e qualitativa dell'affidabilità. In termini quantitativi, è possibile ottenere il valore di $R(t)$ tramite lo studio dei *RBD*. Una volta ottenuto questo valore, attraverso le due matrici esposte di seguito, sarà possibile individuare, in prima istanza, se il valore di affidabilità vale per un sistema in serie (s) o in parallelo (p). Una volta definito questo aspetto, sarà possibile identificare, come descritto nelle tabelle seguenti, se - in fase di realizzazione - i rami di alimentazione saranno fisicamente separati, quale sarà il loro tipo di alimentazione e se sarà previsto un sistema di monitoraggio dell'impianto in grado di individuare prontamente un guasto o, in qualche modo, prevenirlo. Al numero crescente associato alle singole lettere delle tabelle seguenti, corrisponde l'aumentare di possibilità di incertezze e, quindi, in un certo senso, una svalutazione del valore di $R(t)$ calcolato tramite *RBD*.

SCHEMA IN PARALLELO (classificazione applicabile solo in caso di commutazione SIL certificata)		
<i>p</i>		
Ridondanza attiva (tutti i rami contemporaneamente funzionanti)		Ridondanza di riserva (solo un ramo funzionante e altri in stand-by)
Ogni generatore è in grado di garantire copertura di tutti i carichi	Ogni generatore non è in grado di garantire copertura di tutti i carichi	
<i>1</i>	<i>2</i>	
CAVEDIO		
Tutti i rami di alimentazioni sono in cavedi separati		Cavedio unico
<i>c1</i>		<i>c2</i>
ALIMENTAZIONE ELETTRICA		
Sotto continuità	Presenza di accumulo termico	Ordinaria
<i>e1</i>	<i>e2</i>	<i>e3</i>
SISTEMA DI CONTROLLO E MONITORAGGIO		
Monitoraggio del manutentore	Sensori	Nessun sistema
<i>m1</i>	<i>m2</i>	<i>m3</i>

Tabella 14. Tabella di classificazione di uno schema in parallelo

SCHEMA IN SERIE		
<i>s</i>		
ALIMENTAZIONE ELETTRICA		
Sotto continuità	Presenza di accumulo termico	Ordinaria
<i>e1</i>	<i>e2</i>	<i>e3</i>
SISTEMA DI CONTROLLO E MONITORAGGIO		
Monitoraggio del manutentore	Sensori	Nessun sistema
<i>m1</i>	<i>m2</i>	<i>m3</i>

Tabella 15. Tabella di classificazione di uno schema in serie

A titolo esemplificativo, proveremo ad applicare questa tipologia di classificazione allo schema impiantistico già analizzato nel capitolo precedente (4.2). In primo luogo, si definisce la destinazione d'uso dell'edificio. L'edificio oggetto di studio è caratterizzato dalla presenza di locali che necessitano di una particolare attenzione in termini di affidabilità, quali la sala controllo di un aeroporto e la presenza di un data center. Secondo la classificazione proposta, l'edificio è classificato con un livello di rischio "non accettabile". Si deve così procedere con la quantificazione dal valore di $R(t)$, calcolato precedentemente, e risultato pari a 0,9812 (vedi [Tabella 11](#)). L'impianto, come visto, essendo caratterizzato dalla presenza di pompe di calore e gruppi ad assorbimento collegati al cogeneratore, è un sistema in parallelo e, quindi, identificabile tramite la lettera *p*.

Le pompe di calore così come i gruppi ad assorbimento, in questo specifico caso, sono state dimensionate in modo da garantire la copertura totale dei carichi termici anche in caso di guasto di uno dei due sistemi di generazione. Seguendo quanto indicato dalla matrice del sistema di classificazione verrà assegnato valore 1.

Il progetto per la realizzazione di questo impianto prevede la presenza di cavedi costruttivamente separati e distinti con particolare attenzione posta nella compartimentazione in caso di incendio. Verrà così assegnato il codice identificativo *c1*.

In termini di alimentazione elettrica dei dispositivi tecnologici, è prevista un'alimentazione sotto continuità tramite collegamento ad UPS. Non sono infatti previsti sistemi di accumulo di fluidi caldi o freddi e volani termici. Il sistema verrà, quindi, classificato *e1*.

Infine, non sono presenti indicazioni riguardo al sistema di manutenzione e controllo e, per questo motivo, sarà assegnato il codice identificativo *m3*.

Nel complesso, quindi, sarà possibile classificare questo impianto in classe di affidabilità **0,9812 p1.c1.e1.m3**. Si ricorda, comunque, che il valore numerico di affidabilità è stato calcolato ad un tempo t pari ad 1 e, quindi, convenzionalmente inteso su base annua. All'aumentare del tempo t per cui si intende calcolare il valore di affidabilità, si otterranno valori decrescenti di $R(t)$ e, quindi, una sempre maggiore diminuzione di affidabilità.

Questo metodo di classificazione può risultare utile al fine di ottenere delle informazioni preliminari inerenti all'affidabilità del sistema che si è progettato o di un sistema esistente. La classificazione può, quindi, essere un'ottima base di partenza per un progettista e/o un manutentore al fine di individuare gli aspetti più critici in termini di affidabilità e procedere così

all'individuazione di problematiche e alla loro risoluzione. L'obiettivo è, quindi, sempre legato alla necessità di migliorare l'impianto in tutti i suoi aspetti. Un impianto di tipo *p1.c1* o *p3.c1* - nonostante abbia più rami di alimentazione fisicamente separati - non è certo che garantisca la copertura di tutti i carichi in caso di guasto di uno dei rami di alimentazione, ad esempio, perché il sistema di commutazione non è altamente prestazionale e affidabile. Allo stesso modo, un sistema di tipo *e1* non è certo che, in caso di guasto della rete di alimentazione elettrica, continui a funzionare senza interruzione, a seguito di attivazione di un UPS. Va comunque verificato che la potenza di assorbimento delle macchine coinvolte possa essere coperta dall'UPS e la durata di tempo in cui l'UPS è in grado di garantire la copertura di questi carichi.

In termini di manutenzione dovrebbe sempre essere garantito un monitoraggio e controllo dell'impianto; il progetto dovrebbe sempre evitare i cosiddetti *colli di bottiglia*. Il manutentore deve poter operare su ogni singolo dispositivo dell'impianto senza che questo debba essere fermato e, quindi, causare disservizi. Risulta evidente l'impossibilità di definire matematicamente il *collo di bottiglia*, ma piuttosto classificare un sistema di tipo *m1* che, oltre prevedere un sistema di monitoraggio continuo in fase di operatività dell'impianto, coinvolga anche in fase di progettazione la figura del manutentore, che potrà supportare il progettista nell'individuazione di questo tipo di problematiche.

Queste sono solo alcune delle considerazioni che devono scaturire dalla classificazione dell'affidabilità tramite le matrici qui proposte. Si parte così dalla definizione di alcuni parametri con il fine di indurre il progettista a verificare ed approfondire in maniera sempre più minuziosa e consapevole tutti gli aspetti legati all'affidabilità.

Il calcolo dell'affidabilità impiantistica tramite l'indice $R(t)$ con tutti gli aspetti ad essa associati e affrontati nel presente elaborato, relativi anche alla metodologia di classificazione proposta, hanno lo scopo di far acquistare consapevolezza riguardo il tema dell'affidabilità impiantistica anche nel settore dell'ingegneria civile. Questi aspetti non dovrebbero essere più esclusivamente trattati dai progettisti e dagli operatori del settore basandosi sulle proprie conoscenze ed esperienze ma, piuttosto, sulla possibilità di implementare e sviluppare in futuro un sistema di quantificazione dell'affidabilità univoco, normato e accessibile a tutti gli operatori. Nonostante siano attualmente in commercio componenti e macchinari altamente prestazionali, complessi ed affidabili, non è di fatto diffuso il tema dell'affidabilità inteso come studio matematico e statistico che tenga conto non solo dei componenti di un sistema, ma anche di come tutti questi componenti sono legati tra loro, da aspetti costruttivi, manutentivi e di

controllo. Come già visto, principalmente per edifici con determinate destinazioni d'uso, gli impianti *HVAC* non hanno più solo lo scopo di garantire un comfort termoigrometrico per le persone, ma sono centrali al fine di garantire sicurezza, funzionalità e protezione di valori economici. In futuro, sarà, quindi, sempre più centrale il tema dell'affidabilità impiantistica in questa tipologia di edifici. Il calcolo quantitativo di $R(t)$ tramite i *RBD*, insieme alla classificazione proposta, è una base di partenza per implementare metodologie di calcolo e classificazione sempre più affinate e precise.

Bibliografia

- [1] Pogliani, S., & Corbellini, U. (2016). Power system schematics standardization. Human factor. *IEEE*.
- [2] Corbellini, U. (2015). Classificazione degli schemi elettrici di Potenza. *AEIT numero 11/12*.
- [3] G.M. International s.r.l. *Manuale SIL. Sistemi di sicurezza strumentati. Prima edizione*.
- [4] Corbellini, G. & Tommazzolli, F. (1975). *Analisi dei sistemi elettrici industriali*. Tamburini editore Milano.
- [5] IEEE, 1980. *Gold book. Design of reliable industrial and commercial power systems*.
- [6] IEEE, 2007. *Gold book. Design of reliable industrial and commercial power systems*.
- [7] IEEE Std 3006.5, 2014. *Recommended practice for the use of probability analysis of industrial and commercial power systems*.
- [8] The green grid. White paper n.50, 2012. *Data center efficiency and IT equipment reliability at wider operating temperature and humidity ranges*.
- [9] Gang, W., Wang, S., Xiao, F., & Gao, D. (2015). Robust optimal design of building cooling systems considering cooling load uncertainty and equipment reliability. *Elsevier*.
- [10] Myrefelt, S. (2004). The reliability and availability of heating, ventilation and air conditioning systems. *Elsevier*.
- [11] Myrefelt, S. (2004). Reliability and functional availability of HVAC systems. *International Conference for Enhanced Building Operations, Paris, France, October 18-19, 2004*.
- [12] Kruschke, J. (2014). *Doing Bayesian Data Analysis*. Elsevier.
- [13] UptimeInstitute (2015). *Accredited Tier Designer*.
- [14] UNI EN ISO 13849-1, *Sicurezza del macchinario-Parti dei sistemi di comando legati alla sicurezza-parte 1: Principi generali per la progettazione*.
- [15] Comitato Termotecnico Italiano (1975). *Guida pratica all'introduzione dell'affidabilità negli impianti termici e termoelettrici*. Tamburini editore Milano.

- [16] Molinari,C. (2002). *Procedimenti e metodi della manutenzione edilizia. Volume 1°*. Sistemi editoriali.
- [17] IEC 61703, Ed. 1: Mathematical expression for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms.
- [18] Zanchi.C., Nozioni introduttive allo studio dell'affidabilità degli impianti elettrici, *L'Elettrotecnica, Vol. IX, n. 435, 1973*.
- [19] Mattana.G., Introduzione alla affidabilità, *Quaderni di informatica, Vol. IX, n. 2, 1982*.
- [20] Adler et al., An IEEE survey of U.S. and Canadian overhead transmission outages at 230 kV and above, *IEEE Transactions on power delivery, vol.9, n.1, 1994*.
- [21] Albrecht et al., Assesment of reliability of motors in utility applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.EC 1, 1986*.
- [22] Dickinson,W. H., Report of reliability of electrical equipment in industrial plants, *AIEE Transactions, Part. II, 1962*.
- [23] IEEE Committee Report, Reason for conducting a new reliability survey on power, rectifier, and air-furnace transformers, *IEEE-ICPS Technical conference record, 1979*.
- [24] IEEE Std 500-1984, *IEEE guide to collection and presentation of electrical, electronic, sensing component, and mechanical equipment reliability data for nuclear power generating stations*.
- [25] McWilliams, D. W., Patton, A. D., and Heising, C. R., Reliability of electrical equipment in industrial plants – Comparision of results from 1959 survey and 1971 survey. *IEEE-ICPS technical conference records, Denver, CO, June 2-6, 1974*.
- [26] Report on equipment availability for 10 years period 1965-74, *EI Publications n. 75-50*.
- [27] ASHRAE handbook applications, 1999. *Operation and maintenance management*.
- [28] ASHRAE handbook applications, 2003. *Operation and maintenance management*.
- [29] Hale Jr. Peyton S and Arno, Robert G., Survey of reliability and availability information for power distribution, power generation, and HVAC components for commercial, industrial, and utility installations. *ASHRAE Transaction, Research., V 107 part 2, New York, 2001*.
- [30] ASHRAE handbook applications, 2012. *Heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment*.

[31] ASHRAE TC 9.9, 2011. *Thermal guidelines for data processing environments-Expanded data center classes and usage guidance.*

[32] ASHRAE TC 9.9, 2016. *Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices.*

[33] The green grid. White paper n.46, 2012. *Updated Air-side Free Cooling Maps: The Impact Of ASHRAE 2011 Allowable Ranges.*

[34] The green grid, 2009. *North American, European, and Japan Fresh Air and Water Side Cooling Maps.*

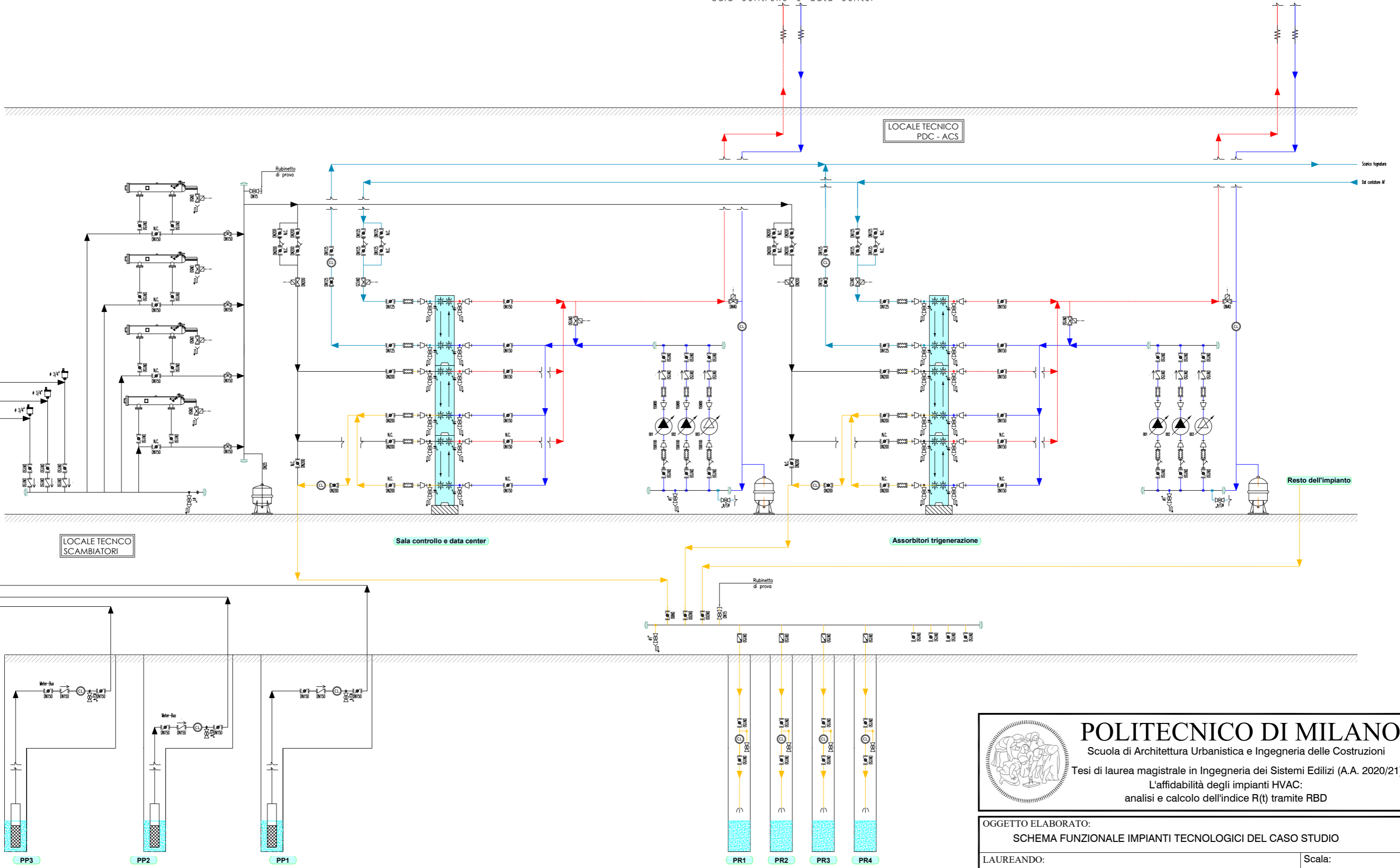
[35] The green grid. White paper n.41, 2011. *Survey Results: Data Center Economizer Use.*

[36] Simoni,L. (1996). *Ingegneria dei materiali elettrici. Vol. 1: Proprietà dielettriche e scarica dei materiali isolanti elettrici.* Clueb editore.

Allegato 1: Schema funzionale impianti tecnologici del caso studio

Pompe di calore
e gruppo frigorifero
sala controllo e data center

Assorbitori centrale di trigenerazione



POLITECNICO DI MILANO
 Scuola di Architettura Urbanistica e Ingegneria delle Costruzioni
 Tesi di laurea magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi (A.A. 2020/21)
 L'affidabilità degli impianti HVAC:
 analisi e calcolo dell'indice R(t) tramite RBD

OGGETTO ELABORATO: SCHEMA FUNZIONALE IMPIANTI TECNOLOGICI DEL CASO STUDIO		
LAUREANDO: Paolo Giannattasio	Scala: -	
RELATORE: Prof. Angelo Lucchini	CO-RELATORI: Prof. Enrico Sergio Mazzucchelli Ing. Umberto Corbellini	Formato: A3