

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza
Civile e Industriale

Il ruolo dei fenomeni elettrici negli incendi e come rilevarli
nell'analisi post incidentale

Relatore/Relatrice:

Prof.ssa Chiara Vianello

Laureando/a:

Francesca Pompa

Matricola: 2113483

Relatore2/Relatrice2:

Ing. Guido Rebuffi

Anno Accademico 2025/2026

Sommario

INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 1 – FENOMENI ELETTRICI E INCENDI	4
1.1 FENOMENI DI COMBUSTIONE	4
1.2 LIMITI DI INFIAMMABILITÀ	5
1.3 TEMPERATURA DI FLASHPOINT	5
1.4 TEMPERATURA DI AUTOACCENSIONE	5
1.5 STATISTICHE	6
1.6 INCENDI DI NATURA ELETTRICA	7
1.7 CAUSE	8
1.7.1 Sovraccarico elettrico	9
1.7.2 Guasti di isolamento	9
1.7.3 Guasti ai terminali di collegamento	13
1.7.4 Guasti ai conduttori	15
CAPITOLO 2 – INCENDI NELLE ABITAZIONI CIVILI	17
2.1 PANORAMICA E STATISTICHE	17
2.2 SCARSA CONNESSIONE	18
2.3 ARCO ELETTRICO	19
2.4 SOVRACORRENTE E SOVRACCARICO	21
2.5 DETERIORAMENTO DEI CAVI	23
CAPITOLO 3 – PROTEZIONI ELETTRICHE IN AMBITO CIVILE	25
3.1 MANUTENZIONE	26
3.2 SICUREZZA E NORME	27
3.3 DISPOSITIVI DI PROTEZIONE	29
3.4 MISURE DI PROTEZIONE CONTRO LE SOVRACORRENTI	30
3.5 EFFETTI DELLA CORRENTE ELETTRICA SUL CORPO UMANO	32
3.6 LIMITI DI PERICOLOSITÀ DELLA CORRENTE ELETTRICA	34
3.6 INTERRUPTORI DIFFERENZIALI	36
3.7 LIMITI DELLE PROTEZIONI E AFDD	40
CAPITOLO 4 – METODOLOGIE INVESTIGATIVE SUGLI INCENDI DI NATURA ELETTRICA	42
4.1 ANALISI POST-INCIDENTALE	42
4.2 DEFINIZIONI	43
4.3 CAUSE DEGLI INCIDENTI	44
4.4 FASI DELL'ANALISI POST INCIDENTALE	45
4.4.1 Valutazione e riduzione del rischio	47
4.5 TECNICHE STRUTTURATE	48
4.5.1 Tecniche induttive	49
4.5.2 Tecniche deduttive	51

4.5.3 <i>Tecniche morfologiche</i>	55
4.5.3 <i>Tecniche non orientate ai sistemi</i>	57
4.6 <i>APPLICAZIONE DELLE TECNICHE DI ANALISI POST INCIDENTALE SUGLI INCENDI DI NATURA ELETTRICA</i>	59
4.7 <i>ANALISI DELL 'ARCO ELETTRICO NELL 'ANALISI POST-INCIDENTALE</i>	63
CAPITOLO 5 – ESEMPI SULL'USO DELL'ANALISI POST-INCIDENTALE	66
5.1 <i>REBUFFI S.R.L.</i>	66
5.2 <i>TIROCINIO</i>	66
5.3 <i>RELAZIONI SVOLTE DURANTE IL TIROCINIO</i>	67
5.4 <i>CASO STUDIO 1</i>	70
5.4.1 <i>Possibili misure di prevenzione</i>	77
5.5 <i>CASO STUDIO 2</i>	79
5.5.1 <i>Possibili misure di prevenzione</i>	92
CONCLUSIONI	95
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	97

Introduzione

Con il progresso tecnologico e scientifico degli ultimi anni, l'elettricità gioca un ruolo fondamentale e vitale nella vita di tutti i giorni. L'impiego più frequente di apparecchi elettrici aggrava il rischio che si possa verificare un incendio, soprattutto – e non solo – in ambienti residenziali, dove l'uso improprio dell'apparecchio elettrico rappresenta una delle principali cause degli incendi di questa natura, insieme all'invecchiamento e all'usura dei suoi componenti elettrici.

Gli incendi di natura elettrica, infatti, costituiscono un rischio spesso sottovalutato anche negli ambienti di lavoro, poiché molte volte sono causati anche da fenomeni meno visibili come sovraccarichi, guasti dei conduttori e del loro isolamento, malfunzionamenti, collegamenti difettosi e archi elettrici. Comprendere le dinamiche con cui questi fenomeni si sviluppano è indispensabile per prevenirli o, ove ciò non sia possibile, limitarne i danni, attraverso una corretta progettazione, una manutenzione eseguita secondo quanto prescritto e comportamenti consoni.

L'analisi post incidentale svolge un ruolo cardine in questo ambito: è uno degli elementi fondamentali di un sistema di gestione della sicurezza, essendo un processo messo in atto da un gruppo di esperti nel settore, con lo scopo di individuare cause dirette e indirette di un sinistro al fine di consentire l'identificazione di misure di prevenzione per evitare il ripetersi di tale evento avverso o, al limite, contenerne le eventuali conseguenze. L'analisi post incidentale degli incendi elettrici combina ricostruzione forense e modelli di valutazione del rischio per capire cause, dinamica ed azioni preventive future, sulla base di standard tecnici internazionali. Tuttavia, l'indagine degli incendi è una delle scienze forensi più complesse da attuare, viste le prove continuamente alterate, danneggiate, distrutte o contaminate dall'incendio. Inoltre, i danni riscontrati possono essere indipendenti dal percorso seguito dall'incendio, rendendo difficile individuare il suo punto di origine.

Dopo aver analizzato le dinamiche, le cause e le condizioni che possono portare alla formazione di un incendio di origine elettrica, lo scopo di questo elaborato sarà quello

di fornire una panoramica delle tecniche di analisi post incidentale e metodologie investigative che si possono applicare nell'ambito dell'investigazione degli incendi, sulla base di esempi di relazioni svolte durante l'attività di tirocinio.

Capitolo 1 – Fenomeni elettrici e incendi

1.1 Fenomeni di combustione

La combustione, come sostiene Jaime, F. A., è una reazione chimica esotermica che avviene quando combustibile e comburente entrano in contatto con una fonte di innesco, il cosiddetto “triangolo del fuoco”. La mancanza di uno qualsiasi dei tre elementi (comburente, combustibile o fonte d’innesco) arresta il processo. Il combustibile può essere solido, liquido o gassoso, mentre solitamente il comburente, che è il materiale che alimenta la combustione, è rappresentato dall’ossigeno perché si trova in abbondanza nell’atmosfera ed è presente in tutti gli ambienti civili (Jaime, F. A. (2011).

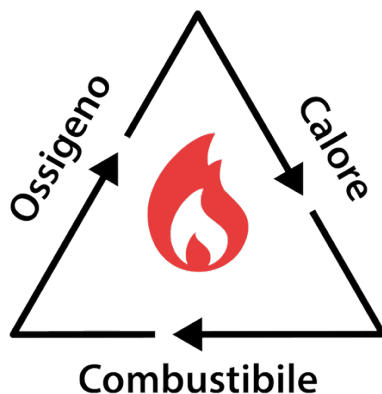


Fig. 1.1: triangolo del fuoco (Compartimentazione Antincendio - AF Systems)

L’incendio viene definito come “una combustione sufficientemente rapida e non controllata, che si sviluppa senza limitazioni nello spazio e nel tempo”.

Gli incendi vengono classificati (UNI EN 2:2005) sulla base del materiale combustibile in 5 classi: A, B, C, D, F.

Classe A	Solidi
Classe B	Liquidi
Classe C	Gas
Classe D	Metalli

Classe F	Fuochi da mezzi di cottura
-----------------	----------------------------

Di seguito vengono riportate alcune definizioni utili a comprendere le dinamiche di un incendio.

1.2 Limiti di infiammabilità

Per dare origine ad un incendio, Jaime, F. A. nel suo studio riporta che, combustibile e comburente devono essere presenti in determinate concentrazioni che prendono il nome di limiti di infiammabilità. Non sono altro che limiti di concentrazione, tra cui può bruciare un combustibile gassoso.

I limiti sono il Limite Inferiore d'Infiammabilità (LFL) e Limite Superiore d'Infiammabilità (UFL). Il primo indica la concentrazione minima di combustibile che deve essere presente in aria affinché, a seguito di un innesco, la miscela propaghi la combustione. Il secondo indica la massima concentrazione possibile.

1.3 Temperatura di flashpoint

La temperatura di flashpoint, come analizzato da Controls, D. I. P., è la temperatura alla quale la concentrazione dei vapori in equilibrio con i liquidi è pari al limite inferiore d'infiammabilità (LFL). Tale temperatura rappresenta un valore indicativo poiché fa riferimento ad una condizione di perfetto equilibrio. Il punto di infiammabilità è la temperatura più bassa alla quale si produce una quantità di vapore sufficiente a formare una miscela con l'aria sulla superficie della sostanza e che può prendere fuoco in presenza di una sorgente esterna di accensione.

1.4 Temperatura di autoaccensione

La temperatura di autoaccensione (o autoignizione), come riportano Sbarbati, S., e Sbarbati, S., è la minima temperatura alla quale una sostanza inizia a bruciare spontaneamente in presenza di un comburente (solitamente ossigeno), senza

necessitare di una fonte esterna come scintille o fiamme. È un parametro critico per la sicurezza industriale e la prevenzione incendi.

1.5 Statistiche

Dal documento predisposto dal NIA (Nucleo Investigativo Antincendi) del Dipartimento dei Vigili del fuoco e del soccorso nazionale, Capannelle Roma, aggiornato al settembre 2017, emerge che dai dati storici raccolti in Italia si verificano in media tra i 30000 e i 50000 incendi l'anno in edifici civili.

In uno studio condotto su 500 «incendi di grande rilevanza» accaduti in dieci anni (CNVVF - Laboratorio di Elettrotecnica del Centro Studi ed Esperienze - decennio 1990- 1999) le percentuali di incendi di natura elettrica individuati, distinte per attività, sono:

- locali commerciali e scuole: 14%
- locali di pubblico spettacolo: 14%
- strutture alberghiere: 18%
- case di riposo: 34%.

Un altro studio condotto dai Vigili del Fuoco di Torino nel 1986 ha mostrato che 247 incendi su 1019 sono di “origine elettrica”, cioè una percentuale del circa 27%.

Questi dati hanno portato ad una ragionevole stima: in Italia il 10% e il 20% degli incendi sono di origine elettrica.

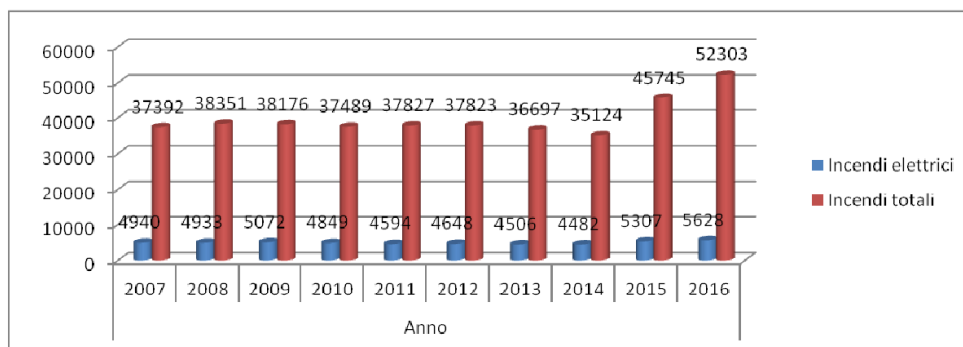


Fig. 1.2: incendi elettrici e generici in abitazioni residenziali (STAT-RI-WEB)

1.6 Incendi di natura elettrica

Un incendio di natura elettrica viene definito da Spatola, G. come *“un evento in cui un guasto o un malfunzionamento di impianti, componenti o apparecchiature elettriche dà origine a:*

- *surriscaldamenti anomali;*
- *archi elettrici;*
- *accensione dei materiali isolanti;*
- *eventuale innesco di materiali combustibili presenti”*

Questi fenomeni di surriscaldamento e/o arco elettrico possono portare all'accensione e alla combustione del materiale isolante negli impianti, apparecchiature e organi di collegamento mobili, talvolta anche del materiale combustibile che li ospita.

Tuttavia, non tutti gli incendi che coinvolgono apparecchiature elettriche possono essere classificati “di natura elettrica”: la sola presenza di impianti danneggiati non è sufficiente per attribuire con certezza la natura elettrica dell'incendio.

Il Nucleo Investigativo Antincendi (NIA) del Dipartimento dei Vigili del fuoco e del soccorso nazionale (Settembre 2017), infatti, specifica che la dicitura “natura elettrica” non sta ad indicare semplicemente un incendio originato da un dispositivo alimentato da energia elettrica. La “natura elettrica” di un incendio è invece definita dal coinvolgimento diretto di un flusso di corrente elettrica, spesso causato da guasti elettrici o malfunzionamenti all'interno del sistema, ma non esclusivamente, che produce la perdita di alcune caratteristiche e/o funzioni del sistema o dalla presenza di elettricità statica.

Guasti o malfunzionamenti elettrici sono dunque indicatori e precursori di incendi di natura elettrica. Il loro esame consente di studiare le dinamiche con cui l'incendio si è sviluppato. Ciò può essere fatto in diversi modi (NIA):

- individuare l'atto o l'omissione che porta al fallimento dei dispositivi di protezione;
- la classificazione degli eventi di guasto in base alla natura funzionale del dispositivo o alla parte di esso che ha fallito;

- lo studio della fisica di base degli eventi di guasto.

1.7 Cause

Come evidenziato dall'articolo proposto dal NIA, gli incendi di natura elettrica partono da componenti/apparecchiature del sistema elettrico dovuti a difetti nella progettazione, fabbricazione, installazione o manutenzione degli stessi.

Il termine guasto o malfunzionamento si verifica quando il sistema elettrico non riesce a svolgere la propria normale funzione a causa di una qualche avaria di un componente o di un'apparecchiatura. Il termine «difetto», invece, si riferisce alla causa prossima o immediatamente precedente di un guasto, che può essere sotto forma di una condizione fisica visibile o misurabile. Il termine "modalità di guasto" considera le modifiche visibili o misurabili delle proprietà o dell'aspetto del componente che cede per primo durante il processo che precede un guasto del componente d'impianto o dell'apparecchiatura. Non comprende le osservazioni sui componenti adiacenti danneggiati a seguito del primo guasto.

Spatola individua le cause più frequenti degli incendi di natura elettrica e le classifica in quattro categorie principali, escludendo i fulmini e le scariche elettrostatiche (Spatola, G. 2026):

- sovraccarico,
- guasti di isolamento (difetti o deterioramento),
- guasti ai terminali di collegamento (collegamenti inadeguati o allentati, deterioramento della pressione di contatto),
- guasti ai conduttori (rotti o danneggiati o di sezione ridotta).

Al fine di comprendere meglio l'elaborato, di seguito viene riportata un'analisi delle cause più comuni degli incendi di natura elettrica svolta sulla base dell'elaborato del NIA del Dipartimento dei Vigili del fuoco e del soccorso nazionale, Capannelle_Roma, aggiornato al settembre 2017.

1.7.1 Sovraccarico elettrico

Si verifica quando un circuito viene attraversato da una corrente superiore a quella nominale, ovvero quella prevista in fase di progetto. Succede quando troppi utilizzatori elettrici sono collegati a una stessa presa o circuito (NIA, 2017).

È definito come una condizione anomala di funzionamento in quanto si verifica in un circuito elettricamente sano che può portare, nel tempo, a cortocircuiti e dispersioni; esso è di solito il risultato di un sistema difettoso di progettazione o di aggiunte impreviste o non autorizzate alle installazioni. A volte, tuttavia, il sovraccarico delle macchine elettriche può verificarsi a causa di difetti nei macchinari azionati, quali pompe o altre macchine.

Si tratta di una condizione anomala di esercizio che nel tempo può provocare:

- aumento della temperatura;
- degrado dei materiali isolanti;
- cortocircuiti o dispersioni.

Tra le cause più comuni rientrano progettazioni non adeguate, modifiche non autorizzate all'impianto oppure carichi aggiunti nel tempo.

1.7.2 Guasti di isolamento

I materiali isolanti, i quali hanno una funzione di garantire la sicurezza di persone e apparecchiature, si deteriorano con il passare degli anni, oppure, i loro guasti sono dovuti a difetti di progettazione e/o manutenzione (NIA, 2017).

Mentre i metalli possono mantenere le loro proprietà meccaniche quasi indefinitamente, pochissimi materiali isolanti sono immuni all'invecchiamento naturale e non esiste un metodo assolutamente affidabile e pratico per monitorare, continuamente, le condizioni dell'isolamento. Inoltre, i materiali isolanti si danneggiano facilmente a causa di abrasioni, effetti ambientali, danni meccanici, surriscaldamento e attacchi di roditori.

Anche le continue sollecitazioni applicate in condizioni normali di funzionamento possono portare a progressivi processi di degradazione che possono causare la rottura dei materiali costituenti l'impianto elettrico in tempi più o meno brevi. Tali sollecitazioni sono, tuttavia, maggiormente aggressive nei confronti dei materiali isolanti detti non autoripristinanti e, per tale motivo, costituiscono la parte più debole del sistema elettrico. Infatti, nella gran parte dei casi i guasti sono associati a difetti (rotture) dell'isolamento dei componenti; ciò significa che tale materiale perde la sua funzione isolante.

La velocità con cui l'invecchiamento procede aumenta al crescere del livello delle sollecitazioni.

Di seguito si riportano le principali tipologie di sollecitazione::

- sollecitazione elettrica, causata dalla tensione applicata;
- sollecitazione termica, causata dalla temperatura;
- sollecitazione meccanica, di natura statica (trazione, flessione o compressione) o dinamica (vibrazione);
- sollecitazione ambientale, dunque inquinamento, salsedine, umidità, radiazione solare, corrosione.

Le sollecitazioni elettriche e termiche sono in genere le più pericolose perché tensioni e sollecitazioni termiche vengono sempre applicate al componente. Studi più recenti dimostrano che la sollecitazione più gravosa per i materiali isolanti è quella elettrica.

Le sollecitazioni elettriche e termiche contribuiscono nel processo di invecchiamento, poiché ad esempio il campo elettrico riduce significativamente l'energia di attivazione delle reazioni chimiche termicamente attivabili (favorendole), mentre la temperatura favorisce la disponibilità di cariche elettriche nell'isolamento, per favorire i suddetti processi di degradazione elettrica.

Per comprendere meglio i fenomeni sopra citati si riportano le seguenti flow-chart tratte dalla pubblicazione EN 60505:2012 - Evaluation and qualification of electrical insulation systems:

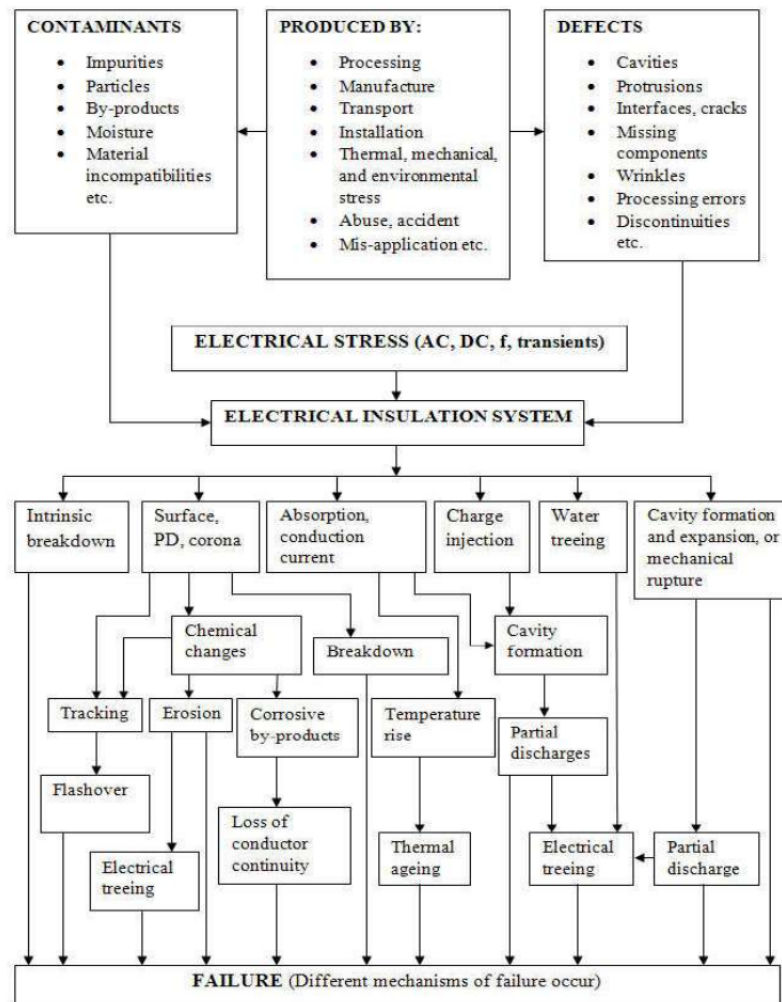


Fig. 1.3: flow-chart (EN 60505:2012)

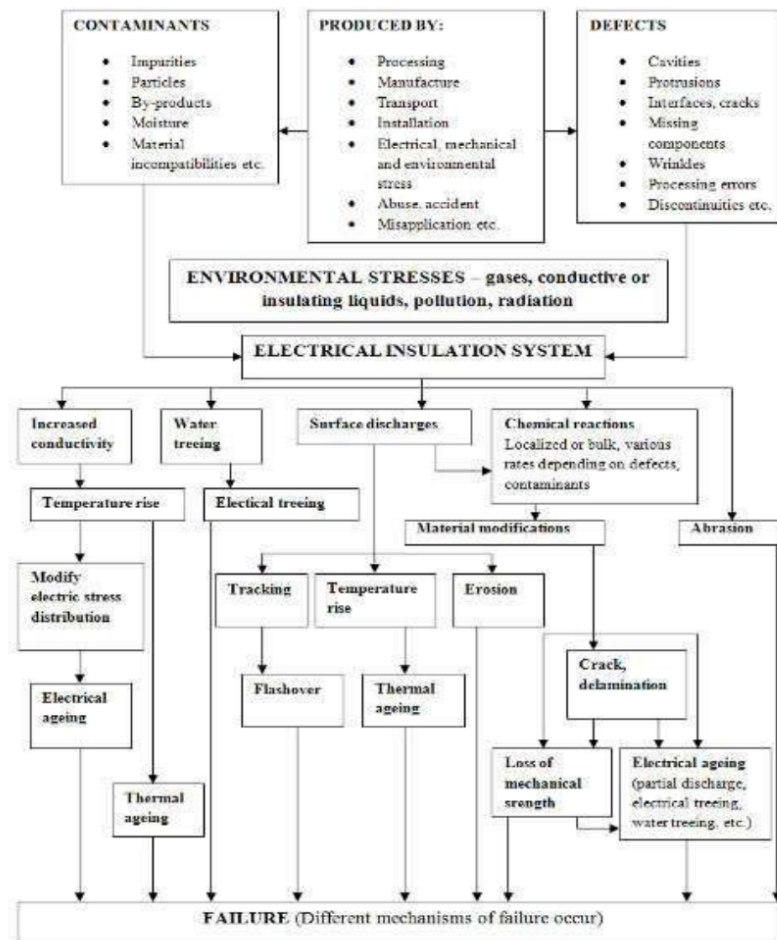


Fig. 1.4: flow-chart (EN 60505:2012)

I guasti di isolamento possono essere minimizzati ma non completamente eliminati. Il cedimento dell'isolamento, inoltre, può evolvere in guasti verso terra, cortocircuiti o fenomeni d'arco continuo, seguito da accensione di materiali isolanti combustibili, aumentando di conseguenza il rischio di incendio. Le temperature dell'arco elettrico talmente estremamente elevate da innescare materiali combustibili nelle vicinanze se l'arco elettrico non viene estinto nel giro di frazioni di secondo.

1.7.3 Guasti ai terminali di collegamento

Molti incendi prendono origine da connessioni allentate o eseguite in modo scorretto, interruzioni, corrosioni nei punti di giunzione (morsetti, prese, connettori) (NIA, 2017). Questo comporta un aumento della resistenza di contatto, detta “resistenza localizzata”, la quale porta ad un incremento della temperatura localizzata per effetto Joule. Se la temperatura locale è sufficientemente elevata si verificherà un deterioramento auto-accelerante, a causa dell’interazione dei differenti processi chimici, elettrici, termici e meccanici. Questo fenomeno è possibile osservarlo solo nelle fasi finali del ciclo di vita del connettore.

Di seguito si riporta un diagramma di flusso per meglio comprendere cosa comporta l’aumento della resistenza di contatto, in relazione ai diversi processi chimici, elettrici, termici e meccanici:

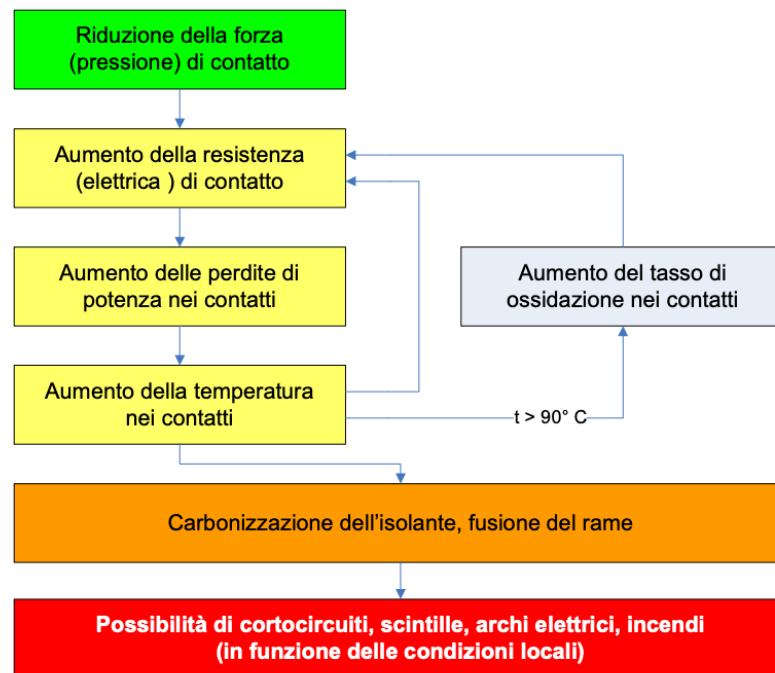


Fig. 1.5: diagramma guasti elettrici. NIA (Nucleo Investigativo Antincendi) del Dipartimento dei Vigili del Fuoco e del soccorso nazionale, Capannelle Roma, settembre 2017

In questi casi, anche in assenza di formazione dell'arco elettrico, il surriscaldamento è sufficiente per avviare un incendio. I corti circuiti e l'arco potrebbero verificarsi successivamente, ma non sarebbero la causa dell'incendio (NIA, 2017).

I guasti dei contatti sono dovuti al degrado della pressione meccanica di contatto per via di diversi processi termici (espansione o contrazione dovute alla variazione di temperatura) o altri fenomeni fisici (come usura, corrosione, vibrazioni); con il passare del tempo questi fenomeni, a quanto sostenuto da Spatola G., possono peggiorare il serraggio e causare:

- surriscaldamento localizzato;
- archi elettrici
- carbonizzazione dell'isolante;
- fusione del metallo;
- possibile innesco.

Di seguito viene riportato un diagramma di flusso che spiega come il fenomeno del “surriscaldamento” si lega agli altri meccanismi di guasto coinvolti:

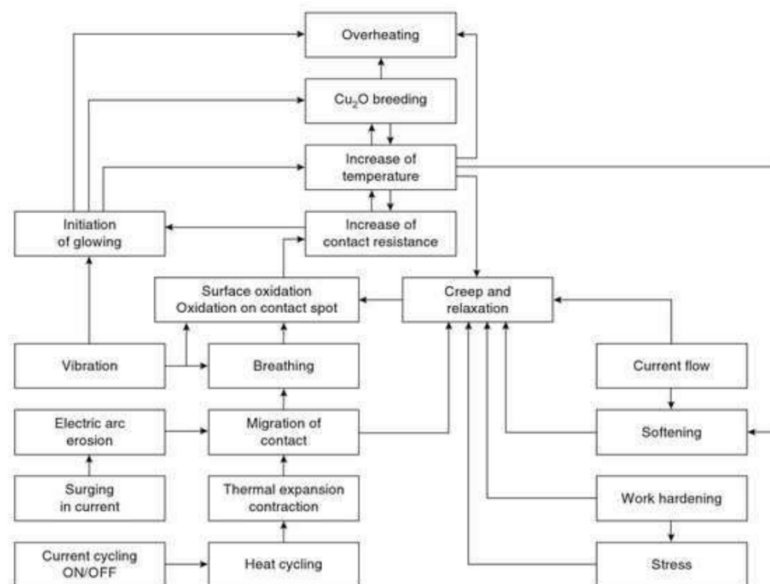


Fig. 22.12 Mechanisms for overheating at electrical connections; as outlined by Kuroyanagi et al [52] (From Ignition Handbook, used by permission)

Fig. 1.6: diagramma per il surriscaldamento (Babrauskas). Vytenis Babrauskas, Chapter 22 - Electrical fires - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering

1.7.4 Guasti ai conduttori

Cavi e conduttori possono danneggiarsi a causa di (NIA, 2017):

- sollecitazioni meccaniche;
- vibrazioni;
- difetti di fabbricazione;
- installazioni non corrette;
- uso improprio di spine e cavi di alimentazione.

Un conduttore danneggiato o con sezione ridotta può andare incontro a surriscaldamento e diventare un punto critico per l'innesco.

Quando la sezione di un conduttore viene ridotta in un certo punto, come mostrato nella figura sottostante, la distribuzione della corrente viene modificata causando un aumento delle perdite elettriche locali. La diminuzione della sezione utile genera un addensamento di corrente nel punto in cui il cavo è deformato, generando una resistenza localizzata e dunque una maggiore dissipazione di calore per effetto Joule. Tuttavia, grazie all'alta conduttività termica dei conduttori elettrici, il calore viene dissipato in ambiente per la lunghezza del conduttore su entrambi i lati della discontinuità. Dunque, nella maggior parte dei casi, l'aumento locale della temperatura è trascurabile.

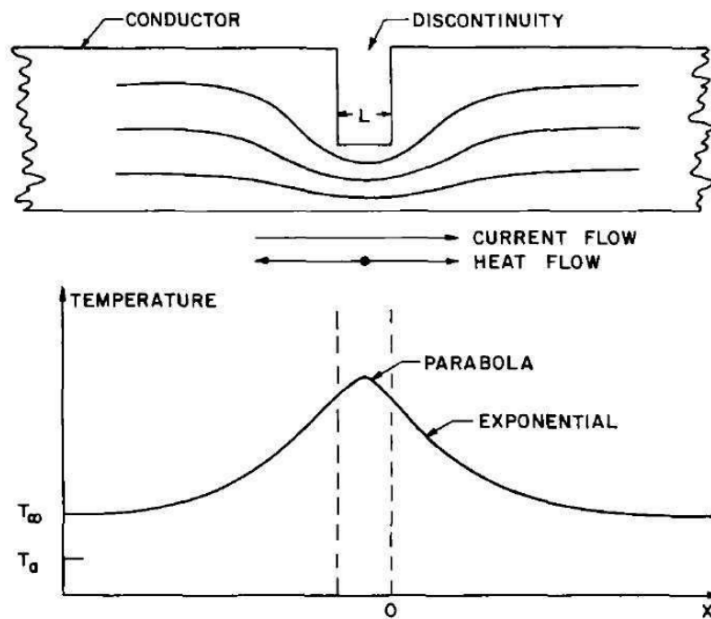


Figure 1. Discontinuity in a conductor and temperature distribution.

Fig. 1.7: discontinuità in un conduttore e relativa distribuzione della temperatura (Beland), tratto da: Bernard Beland, *Heating of Damaged Conductors - Fire Technology*

L'aumento di temperatura diventa non trascurabile invece quando, in condizioni particolari, causa il surriscaldamento del rame che si ossida e, intorno ai 1250 °C, avvia il processo di fusione (solitamente in prossimità della corrente di picco). Questo comporterà la costituzione di un piccolo traferro (è un intervallo, solitamente d'aria, che interrompe la continuità del nucleo ferromagnetico in un circuito magnetico) in grado di formare l'arco elettrico. In corrispondenza del guasto, l'isolante inizierà a carbonizzarsi e, successivamente, in presenza di un arco stabilizzato, è possibile che si generino incendi.

Capitolo 2 – Incendi nelle abitazioni civili

2.1 Panoramica e statistiche

Indagini statistiche svolte dalle autorità governative di Hong Kong e Taipei (Hong Kong Fire Services Department Review, 2008-2010; Taipei City Fire Statistics Year Report, 2010) hanno indicato un alto tasso di incendi residenziali in questi due luoghi. La percentuale accumulata di eventi che comprendono incendi negli edifici domestici e nei complessi residenziali è pari al 43% dal 2008 al 2010 (Hong Kong Fire Services Department Review, 2008-2010) sulla base delle statistiche del Dipartimento dei vigili del fuoco di Hong Kong. Gli incendi residenziali causati dalle sigarette (Runyan et al., 1992; Ducic e Ghezze, 1980; Chien e Wu, 2008) sono stati studiati all'estero nell'ultimo anno.

Negli ultimi anni, in ogni nucleo familiare vengono utilizzati sempre più elettrodomestici, ciò aggrava il rischio che si possa verificare un incendio. L'aumento del carico elettrico, infatti, dovuto alla contemporanea presenza di più elettrodomestici, potrebbe comportare un potenziale rischio di incendio.

L'involucro esterno di tali apparecchi elettrici e altri componenti correlati, come l'isolante o anche le parti interne, potrebbero danneggiarsi a causa di impatti ripetuti con oggetti duri (ad esempio da parte di bambini) causando difetti o una scarsa connessione elettrica.

L'uso improprio dell'apparecchio elettrico, inoltre, è una delle principali cause di numerosi incendi di origine elettrica. Molti utenti, in particolare bambini e anziani, ignorano la corretta procedura di utilizzo degli apparecchi elettrici indicata nel manuale utente.

Secondo Smith e McCoskrie (1990), un incendio potrebbe verificarsi a causa di carichi elettrici non originariamente previsti in fase di progettazione. Inoltre, riparazioni improprie da parte di persone non qualificate e isolamento rimosso o danneggiato potrebbero aumentare la possibilità di accensione.

Bisogna tenere conto che i cavi o i fili elettrici hanno una maggiore probabilità di incendiarsi, come riportato nelle statistiche sugli incendi degli Stati Uniti (Hall et al., 1983), a causa di guasti al sistema di alimentazione a bassa tensione.

Tra i vari possibili meccanismi che generano calore transitorio e che dunque possono dare origine ad un incendio di natura elettrica ci sono: la scarsa connessione, l'arco elettrico, il sovraccarico e il deterioramento dei cavi.

2.2 Scarsa connessione

Nel seguente paragrafo verranno analizzate tutte le circostanze che possono portare ad una scarsa connessione e dunque ad un potenziale rischio incendio, tenendo conto che dalle scarse connessioni possono originarsi punti di innesco di un incendio.

Sulla base delle statistiche della National Fire Protection Association (NFPA), la scarsa connessione è stata individuata (Hall et al., 1983) come una delle cause principali degli incendi di origine elettrica. Oltre ad una connessione scadente, un collegamento errato del circuito può indurre temperature estremamente elevate e può portare all'innesco, a seconda delle condizioni dell'ambiente circostante. Un collegamento elettrico non corretto da parte di una persona non qualificata, una progettazione difettosa e la mancanza di manutenzione possono portare a un collegamento scadente. Le variazioni tra i tipi di collegamento a vite-morsetto e anche tra le prese a innesto e quelle con cavo posteriore sono cause comuni di scarsa connessione (Smith e McCoskrie, 1990). Allo stesso modo, una pressione di contatto insufficiente tra le connessioni delle prese maschio e femmina causa una connessione scadente, con conseguente innesco o formazione di arco elettrico. L'invecchiamento, i problemi di progettazione iniziale e la corrosione potrebbero essere i fattori che determinano un'elevata resistenza (Gillman e Le May, 2007). Una scarsa connessione potrebbe verificarsi anche nel caso in cui dei collegamenti siano allentati.

In alcuni casi, anche la connessione involontaria è soggetta a guasti elettrici: conduttori presenti nella parete laterale o nella struttura dell'edificio possono essere perforate da

chiodi o componenti metallici affilati, formando un percorso involontario del circuito e generando alte temperature.

Le condizioni ambientali, come l'umidità, come nei bagni o nelle sorgenti (Lam, 2011), sono spesso causa di scarsa connessione.

Un'altra causa grave è la progettazione difettosa: in rare condizioni, la resistenza di due fili intrecciati indurrà anche temperature elevate (Babrauskas, 2003). La tendenza ad usare cavi in alluminio, che si è fermata alla fine degli anni '70, è stata la causa principale degli incendi residenziali negli Stati Uniti negli anni '50, a causa delle diverse proprietà termiche e meccaniche dell'alluminio e di altri materiali utilizzati nella presa di contatto (Smith e McCoskrie 1990).

2.3 Arco elettrico

Diversi studi e dati statistici mostrano che gli incendi di natura elettrica sono solitamente causati da guasti da arco elettrico, sovracorrenti, cortocircuiti, perdite, ecc. (Yang et al., 2016). Uno studio condotto da United States Fire Administration (USFA) in cui venivano analizzate le fonti di calore negli incendi di natura elettrica degli edifici residenziali, ha mostrato che i guasti all'arco rappresentavano l'82% degli incendi elettrici (USFA, 2015).

I guasti da arco elettrico possono produrre temperature molto elevate e possono facilmente incendiare materiali combustibili; rappresentano quindi una delle cause più importanti di incendi elettrici (Yang et al., 2016).

L'arco elettrico si verifica in presenza di un circuito aperto o di un cortocircuito di più conduttori insieme: quando il campo elettrico tra due elettrodi è sufficientemente elevato, gli elettroni nell'aria si muovono più velocemente e si verificano collisioni elastiche (H.M. Lee et al, 2016). All'aumentare dell'intensità del campo, viene superato il valore della rigidità dielettrica dell'aria, ionizzandola e creando dunque un percorso conduttore: gli elettroni fuoriescono dalla molecola d'aria e si spostano verso l'elettrodo positivo, si verifica dunque una scarica luminosa e viene emesso calore (Tleis, 2009). In altre parole, si crea una scintilla o un arco elettrico che potrebbe incendiare materiali

inflammabili nelle vicinanze. In queste condizioni, l'arco elettrico che si forma è instabile, con vari inneschi ed estinzioni: ciò causa una progressiva carbonizzazione dell'isolante.

Tale fenomeno è agevolato dal danneggiamento dell'isolamento del cavo, che, perdendo le sue proprietà dielettriche, può creare una superficie conduttiva, ma anche da fenomeni come invecchiamento del cavo, o dalla presenza di polvere o reazioni chimiche, fenomeni che creano correnti di dispersione (dove per *corrente di dispersione* si intende la corrente che fluisce da un circuito elettricamente sano, verso terra (Carrescia V., 2008)) con conseguente carbonizzazione dell'isolante. Il punto in cui l'isolante viene carbonizzato diventa conduttivo: la parte isolante carbonizzata diventa più precisamente un semiconduttore e consente alla corrente di passare attraverso l'isolante, in modo tale da formare un percorso involontario, aumentando la possibilità di formazione dell'arco elettrico stabile (Casciaro, 2017). Il percorso carbonizzato può verificarsi a causa di grandi differenze di potenziale tra i materiali isolanti dei cavi (H.M. Lee et al, 2016).

Il materiale termoplastico più utilizzato come isolante e guaina protettiva, il cloruro di polivinile (PVC), è soggetto a carbonizzazione a temperature relativamente basse, circa 200°C (Babrauskas, 2009). Inquinanti come l'umidità e contaminanti solubili possono accelerare il processo di degradazione. Le scintillazioni o il processo di carbonizzazione possono iniziare a bassi livelli di potenza e temperature inferiori (Babrauskas, 2009). Se ciò avviene senza ostacoli, potrebbe verificarsi un arco elettrico completo e l'alta temperatura potrebbe incendiare i materiali combustibili nelle vicinanze.

Tuttavia, dato che stiamo prendendo in considerazione un incendio residenziale a bassa tensione, gli archi elettrici nell'aria potrebbero non verificarsi in modo indipendente. Aprendo un circuito o cortocircuitando due conduttori insieme, il campo magnetico indotto li separerà e si verificherà arco elettrico, ma la probabilità di accensione è molto bassa. Le possibili ragioni sono che l'arco può mantenersi solo per un periodo molto limitato (Babrauskas, 2009).

Le principali cause di formazione di archi elettrici sono riconducibili a problemi di isolamento, schiacciamento o rottura dei cavi, scarsa connessione, danni ai cavi d'alimentazione delle apparecchiature (Siemens, 2018).

2.4 Sovracorrente e sovraccarico

Ogni conduttore (cavo elettrico) ha una portata massima di corrente (I_z), che dipende dalla sezione del conduttore e dalla posa di installazione (Natasi V., 2020). La sovracorrente è una qualsiasi corrente di intensità maggiore alla portata (I_z). Un conduttore si definisce correttamente dimensionato quando la corrente effettiva che circola al suo interno in fase di funzionamento è minore alla portata.

Le sovracorrenti si distinguono in:

- sovraccarichi: si verificano quando vengono allacciati ad un circuito elettrico dei carichi elettrici tali da far circolare una corrente maggiore a quella di portata del cavo. Ciò provoca un lento danneggiamento degli isolanti;
- cortocircuiti: si verificano quando due conduttori a diverso potenziale entrano in contatto senza alcuna resistenza interposta tra di loro ($R=0$). Ciò comporta, a differenza dei sovraccarichi, un notevole e rapido danneggiamento degli isolanti.

Il sovraccarico è uno dei fenomeni più comuni quando si tratta di un incendio di origine elettrica, insieme ai guasti elettrici: secondo le statistiche del 2023, rappresentano il 37% di tutti gli incendi annuali, provocando circa 2.000 vittime e oltre 7.000 feriti. Tra questi, gli incendi residenziali hanno le vittime più gravi, rappresentando il 56% (Shelby Hall, 2025).

I cortocircuiti, invece, sono provocati dal cedimento di un isolamento, dall'interposizione di un oggetto conduttore o di un liquido tra parti in tensione, rotture meccaniche, ecc. La corrente, limitata da impedenze generalmente trascurabili rispetto a quelle dei carichi, risulta di gran lunga maggiore di quella di normale funzionamento del circuito e può provocare danni quasi istantaneamente sia per effetti termici, sia per effetti elettromeccanici (INAIL, 2018).

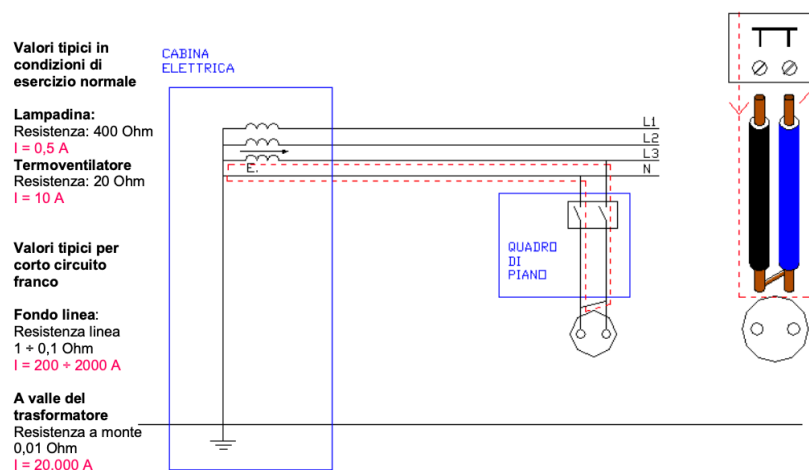


Fig 2.1: percorso e valori caratteristici della corrente in un corto circuito. (INAIL, 2018)

Per capire meglio le dinamiche di un incendio residenziale a causa di un sovraccarico, si riporta l'esempio di un incendio avvenuto in Oskaloosa, IA, nel 2013: Una donna e sua madre stavano dormendo nella loro casa a due piani mentre delle stufe elettriche stavano riscaldando la casa. Le stufe hanno iniziato ad assorbire più corrente, sovraccaricando la presa a muro. La resistenza elettrica nei cavi sovraccaricati ha generato abbastanza calore da incendiare la struttura in legno del muro, diventando così il punto di origine dell'incendio (Tremblay K., 2014).

Quando la corrente che scorre supera la capacità massima di trasporto della corrente del cavo, la temperatura aumenterà e causerà surriscaldamento (Li, 2010; Lau, 1997; Wong, 2011). In caso di sovraccarico, i materiali circostanti potrebbero sciogliersi a causa dell'eccessivo isolamento termico o addirittura potrebbero incendiarsi a causa dell'eiezione di particelle calde; se il calore emesso dal cavo è molto più alto del punto di fusione del materiale, potrebbe verificarsi un incendio.

Le cause più probabili e comuni che possono comportare un sovraccarico sono: una selezione errata dell'area della sezione trasversale del cavo o un dimensionamento improprio dei dispositivi di protezione.

Cavi e altri componenti elettrici sono scelti in base alla corrente massima che possono trasportare in sicurezza. La corrente in eccesso può causare componenti elettrici da

surriscaldare (Fig. 2.1). Sebbene gli interruttori e i fusibili siano progettati per scollegare i circuiti durante sovraccarichi, possono verificarsi incendi se gli interruttori e i fusibili non funzionano a causa di dimensioni improprie o difetti meccanici.

Anche se le protezioni elettriche funzionano correttamente, gli incendi potrebbero ancora verificarsi se le prolunghie sono attraversate da una corrente maggiore rispetto a quella calcolata in fase di progetto. Ciò accade perché spesso il valore della corrente che attraversa i cavi, anche se in condizioni di sovraccarico, è inferiore alla soglia di corrente necessaria per attivare interruttori e fusibili (Ricketts, M. 2020).



Fig. 2.2a (sinistra): connettore danneggiato a seguito di un sovraccarico avvenuto in una prolunga

Fig.2.2b (destra): presa a muro danneggiata a causa di un sovraccarico

2.5 Deterioramento dei cavi

Secondo Gosland (1956), la probabilità di provocare un incendio tramite cavi utilizzati da più di 15 anni è approssimativamente proporzionale all'età di installazione. Ciò indica che più lungo è il periodo di installazione del filo, maggiore è il tasso di incidenza degli incendi. Una possibile ragione è che i conduttori utilizzati per lungo tempo consentirebbero il passaggio di meno elettroni; quindi, la capacità massima di trasporto della corrente del cavo diminuirà di anno in anno, con conseguente dimensionamento improprio del cavo o surriscaldamento. Il materiale isolante presenta

anche problemi di invecchiamento, come un punto di fusione più basso o addirittura la facilità di rottura.

Capitolo 3 – Protezioni elettriche in ambito civile

Al giorno d'oggi lo stile di vita è cambiato con il progresso della tecnologia. Il numero di apparecchi elettrici utilizzati negli appartamenti residenziali è notevolmente aumentato, insieme alle possibili fonti di rischio per incendi. Gli incendi di elettrodomestici rappresentano una percentuale significativa degli incendi elettrici residenziali, dovuti principalmente all'uso improprio o all'invecchiamento delle comuni apparecchiature elettriche. Gli strati isolanti degli elettrodomestici, come frigoriferi, lavatrici e forni a microonde, si degradano nel tempo, aumentando significativamente il rischio di cortocircuiti (Li et al., 2025). Uno studio del 2023 condotto dalla NFPA negli Stati Uniti ha dimostrato che gli elettrodomestici con più di 10 anni hanno causato il 35% degli incendi elettrici residenziali (Wiki, n.d.). Pertanto, ispezioni regolari e sostituzione tempestiva delle attrezzature obsolete sono fondamentali per ridurre il rischio di incendio.

Anche l'uso improprio è un fattore importante nell'ambito degli incendi residenziali. Ad esempio, gli elettrodomestici ad alta potenza come coperte elettriche, stufe e asciugacapelli tendono a surriscaldarsi se lasciati accesi per lungo tempo (Li et al., 2025). Nel 2022 è scoppiato un incendio in un appartamento a New York perché una coperta elettrica era rimasta accesa per più di 12 ore, incendiando la biancheria da letto circostante (Staff, 2022). Pertanto, è necessario seguire rigorosamente le linee guida di sicurezza del fabbricante del prodotto.

Secondo le statistiche del Dipartimento dei servizi elettrici e meccanici del governo di Hong Kong, tra il 1998 e il 2001 si sospettava che circa 30 casi di incendi fossero collegati alla televisione (Dipartimento dei servizi elettrici e meccanici 200, 22007).

Il cosiddetto sistema “impianti – attrezzature”, secondo Natasi, deve essere organizzato in modo tale da gestire i fattori di rischio, consentire il miglioramento continuo della

salute e sicurezza del cittadino/lavoratore che li utilizza e garantire la continuità dei servizi e dunque la riduzione dei guasti.

Nel corso del tempo per le varie tipologie di impianti e attrezzature sono state introdotte nuove leggi e norme con la finalità di garantire la salute e sicurezza sia del cittadino-utente che dei lavoratori (Natasi V., 2020). La connessione e l'interazione di impianti e attrezzature può essere difficile da gestire dato che per rendere accettabili i livelli di rischio si deve conoscere l'origine dei vari fattori di rischio derivanti dall'uso del sistema impianti-attrezzature presenti, oltre agli obblighi di natura tecnico-gestionale. I fattori di rischio più comuni derivanti da tale interazione, individuati da Natasi, sono:

- impianti tecnologici non a norma, installazioni o soluzioni progettuali poco sicuri;
- prodotti (macchine e attrezzature) non conformi alle norme di sicurezza, ad esempio, non marcati CE oppure con marcatura CE non conforme;
- insufficiente manutenzione dei componenti del sistema impianti – attrezzature;
- comportamento dei lavoratori non conforme a quanto prescritto dalle norme di sicurezza, sia esso poco sicuro o anche dovuto a scarsa formazione e informazione.

3.1 Manutenzione

Secondo la norma europea UNI EN 13306, la manutenzione è: «la combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, eseguite durante il ciclo di vita di un elemento destinate a preservarlo o a riportarlo in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta».

Lo scopo della manutenzione è quello di garantire la sicurezza e affidabilità di impianti, macchinari e i loro componenti, al fine di mantenere un ambiente di lavoro sicuro e salubre (Natasi V., 2020) . È inoltre fondamentale per garantire la continuità della produzione e per mantenere alto il livello di qualità dei prodotti.

Il fine della manutenzione, dunque, più nello specifico, è quello di prevenire i guasti al fine di:

- ridurre i fattori di rischio negli ambienti di vita e di lavoro;
- evitare interruzioni/blocchi di produzione;
- garantire l'efficienza, anche in termini economici.

Le tipologie di interventi di manutenzione si distinguono in:

- manutenzione ordinaria: interventi che non modificano le caratteristiche originarie (dati di targa, dimensionamento, valori costruttivi, ecc.) del bene stesso, la sua struttura essenziale e la sua destinazione d'uso.

Il loro scopo è quello garantire l'integrità del bene o ripristinare l'efficienza del bene a seguito di un guasto, contenere la degradazione del bene dovuto al suo utilizzo e dunque garantire la vita utile del bene. Generalmente questa tipologia di interventi viene richiesta a seguito di guasti o avarie (manutenzione a guasto o correttiva) oppure per implementare politiche manutentive (manutenzione preventiva, ciclica, predittiva);

- manutenzione straordinaria: interventi non frequenti e a costo elevato rispetto a quelli di manutenzione ordinaria. Hanno lo scopo di migliorare l'efficienza, la produttività e l'affidabilità del bene. Come per gli interventi di manutenzione ordinaria, la manutenzione straordinaria non modifica le caratteristiche originarie del bene, insieme alla sua struttura essenziale e la sua destinazione d'uso.

Gli interventi di manutenzione vengono eseguiti sulla base dell'esigenza di riparare i "guasti" che possono verificarsi in un impianto, macchina o attrezzatura.

Natasi definisce il guasto come "un evento che consiste nella cessazione dell'attitudine di una entità (componente, dispositivo, impianto, sistema) a eseguire la funzione richiesta".

3.2 Sicurezza e norme

Le principali cause degli infortuni dovuti a guasti o malfunzionamenti degli impianti possono essere ricondotte a (Natasi V., 2020):

- errori di progettazione;

- errori di costruzione;
- errori di gestione;
- modifiche e/o ampliamenti non compatibili con gli impianti preesistenti.

Conoscere le varie problematiche che si possono presentare sulla base della tipologia di impianti impiegati è fondamentale per riuscire a prevedere i guasti che si possono verificare, in modo tale da eliminare o, ove ciò non sia possibile, ridurre le cause che portano a tale guasto.

L'obiettivo è la salvaguardia della sicurezza del cittadino (utente, lavoratore, ecc.), tenendo conto però che la sicurezza assoluta non esiste e non è raggiungibile. La sua sicurezza dipende da:

- impianti a regola d'arte: impianti conformi alle normative vigenti sia in fase di progettazione che realizzazione;
- gestione degli impianti: gestione degli impianti secondo i limiti indicati nel progetto;
- manutenzione degli impianti: gli impianti devono essere sottoposti a manutenzione secondo le indicazioni fornite dal fabbricante in fase di progetto;
- verifiche periodiche: per verificare che la conformità dell'impianto alle norme vigenti venga mantenuta nel tempo.

La norma CEI 64-8 è il riferimento primario per la progettazione, l'installazione e la verifica degli impianti elettrici utilizzatori in bassa tensione (fino a 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua) in Italia.

Nasce dalla norma di recepimento internazionale IEC 60364 e si articola in 7 parti: Parte 1 — Oggetto, scopo e principi fondamentali; Parte 2 — Definizioni; Parte 3 — Caratteristiche generali; Parte 4 — Prescrizioni per la sicurezza (protezione contro i contatti diretti e indiretti, sovracorrenti, sovratensioni); Parte 5 — Scelta e installazione dei componenti elettrici; Parte 6 — Verifiche; Parte 7 — Ambienti e applicazioni particolari.

Tra i contenuti più importanti della norma, di notevole importanza sono: la protezione contro i contatti indiretti mediante interruzione automatica dell'alimentazione (sistema TT con differenziale, sistema TN con magnetotermico), il dimensionamento dei

conduttori in base alla portata (tabelle CEI-UNEL), la protezione dalle sovracorrenti (sovraccarico e cortocircuito), le prescrizioni per ambienti particolari (bagni, piscine, cantieri, locali medici). Contiene dunque prescrizioni sulla protezione contro: contatti diretti e indiretti, sovraccarichi, cortocircuiti, sovratensioni e incendi di origine elettrica.

3.3 Dispositivi di protezione

L'impianto elettrico è uno dei componenti fondamentali per il funzionamento sia di edifici civili che industriali.

Nei sistemi di produzione, trasmissione e distribuzione pubblica dell'energia elettrica, le misure tecniche di sicurezza sono di competenza dell'ente che gestisce il servizio, il quale adotta anche opportune procedure per garantire la sicurezza del proprio personale durante le attività di manutenzione, controllo e, in generale, per tutti i lavori su tali impianti (Prevenzione E Sicurezza | Descrizione Del Rischio, n.d.). Nei confronti delle reti di trasmissione e distribuzione pubblica non oggetto della propria attività, i datori di lavoro devono adottare misure organizzative e procedurali che impediscano di lavorare in prossimità di "parti attive" a distanze inferiori a quelle indicate dalla normativa, o che consentano comunque di proteggere i lavoratori (D.lgs. 81/08, art. 83, art. 117, allegato IX).

Come già analizzato nel primo capitolo, l'energia elettrica comporta una serie di fattori di rischio legati al suo utilizzo. Secondo Natasi possono essere ricondotti ai seguenti:

- Sovracorrenti: sono la causa principale di incendi;
- Difetti di isolamento: possono essere la più diffusa causa di contatto con parti in tensione (contatti diretti) o non in tensione in condizioni ordinarie di funzionamento (contatti indiretti) da parte dell'uomo (causa principale delle folgorazioni);
- Sovratensioni sui circuiti: sono causate da fulmini o da manovre di apertura e chiusura dei circuiti; le sovratensioni, in genere, possono causare anche danni

alle apparecchiature elettroniche e a molti elettrodomestici, nonché possono essere una delle cause della formazione di un eventuale incendio.

I dispositivi di protezione (fusibili, interruttori automatici o differenziali) interrompono il circuito elettrico automaticamente nel caso in cui si generi una corrente di guasto che supera la loro caratteristica di intervento $i-t$ (Prof. Bignucolo F., 2024/2025). La protezione del circuito può avvenire tramite dispositivi a massima corrente (fusibili e interruttori automatici magnetotermici) e tramite interruttore differenziale, hanno due scopi differenti: una protezione di massima corrente monitora costantemente la corrente transitante nel circuito, interrompe il passaggio di corrente se questa supera una corrente soglia (ciò può accadere a seguito di guasti); l'interruttore differenziale, invece, protegge le persone dal rischio di folgorazione, infatti è comunemente conosciuto come *salvavita*. Di seguito verranno analizzate entrambe le tipologie di misure di protezione.

3.4 Misure di protezione contro le sovracorrenti

Una corrente transitante superiore a quella nominale del circuito porta ad un innalzamento di temperature, che, come già analizzato, può creare una serie di problemi. La protezione contro le sovracorrenti in un circuito elettrico viene effettuata mediante l'impiego di dispositivi in grado di aprire i circuiti e interrompere il passaggio di corrente (INAIL, 2018). Le protezioni più comunemente utilizzate sono gli interruttori automatici (fig. 3.1).

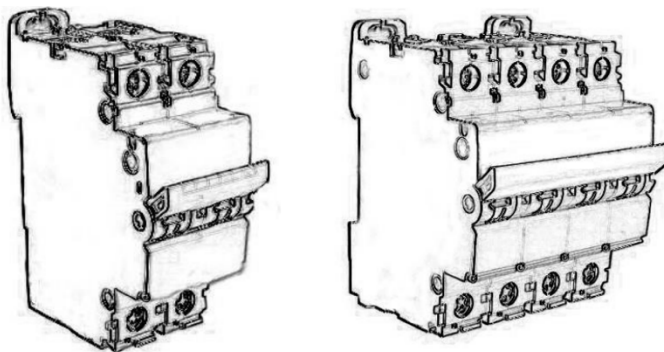


Fig. 3.1: esempi di interruttori automatici “modulari”, impiegati su quadri elettrici locali a protezione dei circuiti terminali; bipolare a sinistra e quadripolare a destra.

(INAIL, 2018).

Gli interruttori magnetotermici combinano una protezione di tipo “magnetica”, che ha tempi di intervento istantanei, per la protezione dai cortocircuiti, e una protezione di tipo “termica”, con tempi di intervento più lunghi, per la protezione contro i sovraccarichi.

L’apertura del circuito è comandata da uno “sganciatore” che, dunque, agisce per intervento di tipo “termico” o di tipo “magnetico”.

Negli interruttori “modulari”, impiegati normalmente a protezione di circuiti terminali, con cavi di portata relativamente limitata (in genere non superiori a 100 A), lo “sganciatore termico” è composto da una lamina bimetallica che, a seguito dello sviluppo di calore prodotto per effetto Joule dal passaggio di corrente, si deforma. Per correnti superiori ad una certa soglia, la deformazione è in grado di azionare il dispositivo di sgancio dell’interruttore, determinando l’apertura del circuito. L’intervento non è istantaneo, ma la protezione interviene tanto più velocemente quanto maggiore è la corrente, secondo una curva tempo-corrente caratteristica del dispositivo. Gli sganciatori termici sono adatti alla protezione dai sovraccarichi, poiché consentono il passaggio di correnti superiori al valore di soglia per un certo periodo; per sovraccarichi di entità limitata, ciò è ammissibile (INAIL, 2018).

Negli “sganciatori magnetici”, invece, il dispositivo di sgancio è costituito essenzialmente da un elettromagnete, sul quale agiscono una forza proporzionale al quadrato della corrente e la forza di una molla antagonista. Quando la corrente supera un certo valore, la forza elettromagnetica prevale su quella della molla e lo sganciatore interviene istantaneamente.

Altri dispositivi di protezione impiegati sono i fusibili e i relè termici accoppiati a “contattori”, i quali sono componenti in grado di compiere un elevato numero di operazioni di apertura e chiusura dei circuiti, anche in condizioni di sovraccarico, ma non adatti ad interrompere correnti di corto circuito. Il dimensionamento e la corretta

scelta dei dispositivi di protezione dalle sovracorrenti dipendono da numerosi fattori, tra i quali la portata dei cavi, la corrente ed il regime di funzionamento dei carichi contemporaneamente prevedibili, il valore di corrente di corto circuito calcolabili per il circuito alimentato (INAIL, 2018).

3.5 Effetti della corrente elettrica sul corpo umano

Per comprendere meglio il funzionamento e l'utilità delle protezioni elettriche, nel particolare quelle che hanno come scopo di proteggere le persone dal rischio di folgorazione, di seguito verranno brevemente analizzati gli effetti fisiopatologici che la corrente elettrica ha sul corpo umano. Nelle installazioni di impianti elettrici, i contatti diretti e indiretti sono il risultato di guasti all'interno del circuito, attraverso i quali la corrente transita attraverso il corpo umano. Tali contatti sono pericolosi sia per le persone che per gli impianti stessi (pdf).

Il passaggio della corrente elettrica attraverso il corpo umano può determinare una serie di lesioni, sia temporanee che permanenti: la corrente elettrica agisce direttamente sul sangue, cellule nervose, sul sistema cardiaco (aritmie, alterazioni permanenti), nell'attività celebrale, può anche danneggiare il sistema visivo e uditivo (Carrescia V., 2008).

Per definire i limiti di pericolosità della corrente elettrica la norma tiene conto di quattro principali effetti della corrente sul corpo umano (Carrescia V., 2008):

- Tetanizzazione: sotto l'azione dello stimolo elettrico il muscolo si contrae per poi ritornare allo stato di riposo. Più stimoli opportunamente intervallati contraggono ripetutamente il muscolo in modo progressivo (contrazione tetanica). La vittima può rimanere attaccata alla parte in tensione a seguito della contrattura muscolare, se il contatto perdura nel tempo può causare svenimenti, asfissia, collasso e stato di incoscienza;
- Arresto della respirazione: se di sufficiente intensità, il passaggio di corrente determina una contrazione dei muscoli addetti alla respirazione o una paralisi dei centri nervosi che sovrintendono alla funzione respiratoria: se la corrente

continua a transitare all'interno del corpo dell'infortunato questo può perdere conoscenza e morire soffocato. Circa il 6% delle morti per folgorazioni viene ricondotta ad asfissia;

- Fibrillazione ventricolare: il muscolo cardiaco si contrae dalle 60 alle 100 volte al minuto e garantisce la circolazione sanguigna nei vasi. La contrazione delle fibre muscolari è prodotta da impulsi elettrici mandati da un apposito centro posto nella parte superiore dell'atrio destro. Se alle normali correnti elettriche fisiologiche si somma una corrente elettrica di origine esterna, enormemente maggiore a quelle fisiologiche, ciò causa uno sbilanciamento dell'equilibrio elettrico del corpo umano: i muscoli, in mancanza di ordini coordinati, non svolgeranno più il loro compito. Il fenomeno della fibrillazione ventricolare è ritenuto la causa di oltre il 90% delle morti per folgorazione. Era inoltre ritenuto un fenomeno irreversibile in passato: è stato dimostrato che una scarica, di opportuna intensità, può arrestare la fibrillazione stessa. Il tempo, tuttavia, in questi casi gioca un ruolo fondamentale: se cessa l'attività cardiaca si ha una finestra di tre minuti per intervenire altrimenti si possono presentare lesioni irreparabili al muscolo cardiaco o al tessuto celebrale.
- Ustioni: possono essere causate dal passaggio di corrente elettrica nel corpo umano (il passaggio di corrente elettrica su una resistenza produce calore per effetto Joule) oppure da un arco elettrico (es. proiezione di particelle incandescenti).

Gli effetti del passaggio della corrente elettrica sul corpo umano dipendono dalla frequenza e dall'intensità della corrente, nonché dal tempo di esposizione alla corrente. Di seguito viene riportata una tabella che mostra gli effetti della corrente elettrica sul corpo umano per un tempo di esposizione $t < 10s$ (Calvas R., 1999).

Effects (for $t < 10s$)	Current strength (mA)		
	DC	50/60 Hz	10 kHz
Slight tingling, perception threshold	3.5	0.5	8
Painful shock, but no loss of muscular control	41	6	37
Non-release threshold	51	10	50
Considerable breathing difficulty	60	15	61
Respiratory paralysis threshold		30	

Fig. 3.2: effetti sul corpo umano del passaggio di una corrente di piccola intensità

3.6 Limiti di pericolosità della corrente elettrica

La norma IEC 60479-1 definisce una curva di sicurezza (Carrescia V., 2008), dove sono rappresentate quattro zone di pericolosità convenzionali IEC 60479-1, ciascuna delle quali corrisponde a diversi effetti prodotti al passaggio della corrente elettrica sul corpo umano. La norma distingue due curve, una per la corrente alternata (fig. 3.3) e una per la corrente continua (fig. 3.4).

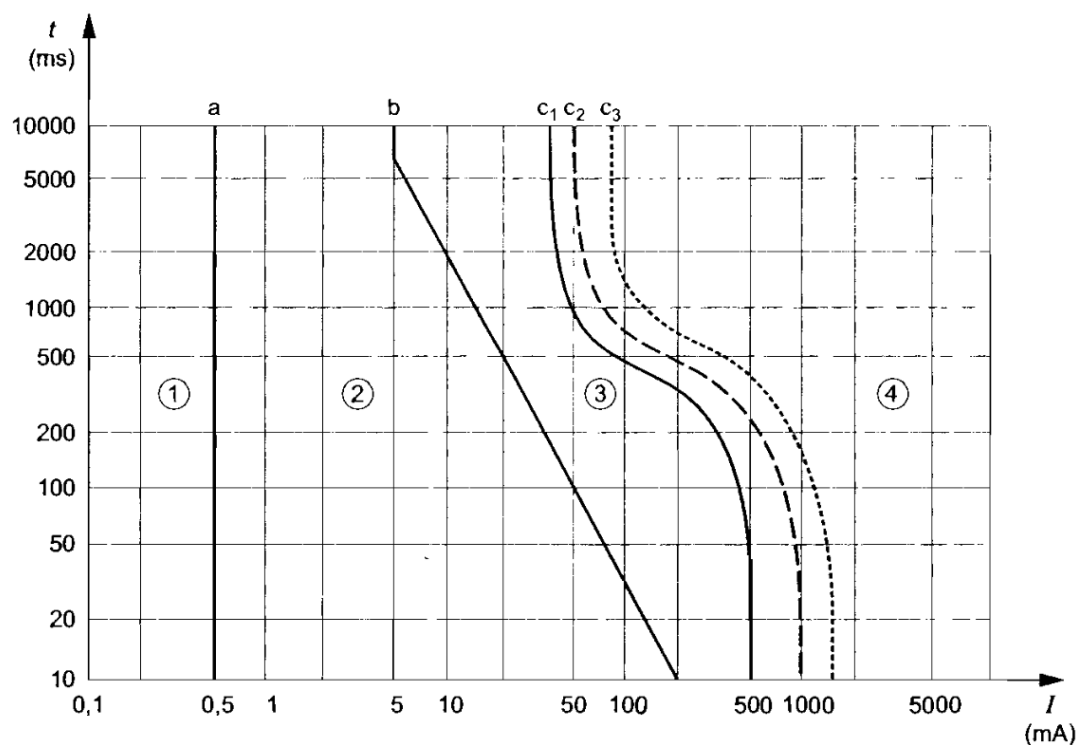


Fig. 3.3: zone di pericolosità della corrente elettrica alternata, da 15 a 100 Hz. (IEC 60479-1).

La zona 1 è al di sotto della soglia di percezione. Nella zona 2 non si hanno in genere effetti pericolosi. Nella zona 3 possono verificarsi effetti patofisiologici, in genere reversibili, che aumentano con l'intensità della corrente e il tempo di esposizione (contrazioni muscolari, problemi respiratori, fibrillazione atriale). Nella zona 4 è probabile la fibrillazione ventricolare. La curva c_1 rappresenta la soglia di fibrillazione ventricolare ed è riferita al percorso di riferimento mano sinistra – piedi. Le curve c_2 e c_3 rappresentano una probabilità di fibrillazione ventricolare rispettivamente del 5% e del 50%.

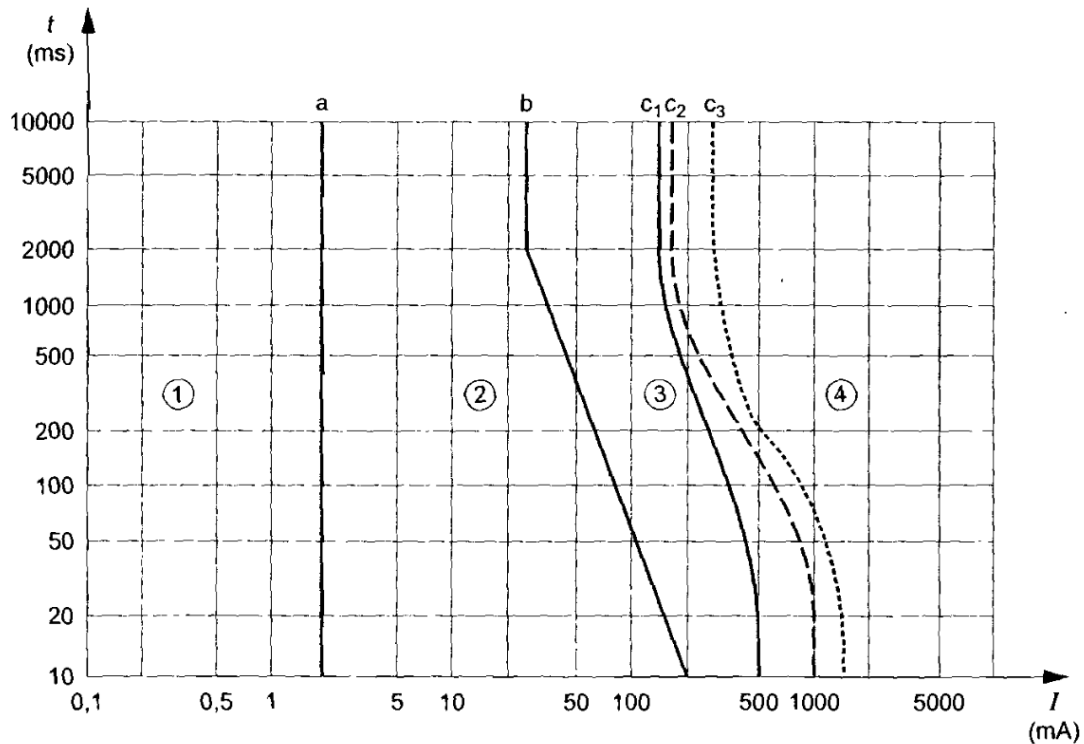


Fig 3.4: zone di pericolosità della corrente continua (IEC 60479-1).

La zona 1 è al di sotto della soglia di percezione. Nella zona 2 non si hanno in genere effetti pericolosi. Nella zona 3 possono verificarsi effetti patofisiologici, come la contrazione muscolare. Nella zona 4 è probabile la fibrillazione ventricolare o altri effetti come ad esempio ustioni. La curva c_1 rappresenta la soglia di fibrillazione

ventricolare ed è riferita al percorso di riferimento mano sinistra – piedi. Le curve c_2 e c_3 rappresentano una probabilità di fibrillazione ventricolare rispettivamente del 5% e del 50%.

3.6 Interruttori differenziali

Oggi, i dispositivi di protezioni contro le correnti residue sono famosi in tutto il mondo per garantire la protezione della persona contro fattori di rischio elettrici che si possono presentare a bassa tensione, a seguito di un contatto diretto o indiretto (Calvas R., 1999). Il contatto diretto è il contatto della persona con una parte dell'impianto normalmente in tensione (es. un conduttore, un morsetto, ecc.) divenuti casualmente accessibili; il contatto indiretto è, invece, il contatto di una persona con una massa, o una parte conduttrice connessa alla massa, a seguito di un guasto di isolamento (Prof. Bignucolo F., 2024/2025).

Le misure di protezione passiva (es. isolamento doppio o rinforzato, separazione dei circuiti, locali isolanti, ecc.) mirano a prevenire il contatto diretto, ma è comunque necessaria una protezione nel caso in cui il contatto diretto si verifichi lo stesso, sia per comportamento non conforme dell'utente, sia per guasto della protezione passiva (Prof. Bignucolo F., 2024/2025).

Per questo motivo è molto diffuso l'impiego degli interruttori differenziali (*Residual current device* o *RCD*), comunemente conosciuti come “salvavita”. L'interruttore differenziale è composto da un sensore toroidale posto attorno ai conduttori attivi. La sua funzione è quella di monitorare la corrente transitante all'interno del circuito, rilevare la differenza di corrente, o più precisamente, rilevare la presenza di una corrente residua. La presenza di una corrente residua indica la presenza di un guasto di isolamento o tra il conduttore attivo e la massa o tra il conduttore attivo e la terra (Calvas R., 1999).

Il primo fattore da considerare nella scelta e nell'installazione di un interruttore differenziale è la presenza di un sistema di terra (Calvas R., 1999):

- Nei sistemi TT, dove il neutro è collegato a terra, la protezione dal rischio di folgorazione viene eseguita tramite interruttore differenziale
- Nei sistemi IT e TN vengono utilizzati interruttori differenziali per prevenire incendi, proteggere le persone dal rischio di folgorazione e per prevenire le conseguenze dannose di un guasto.

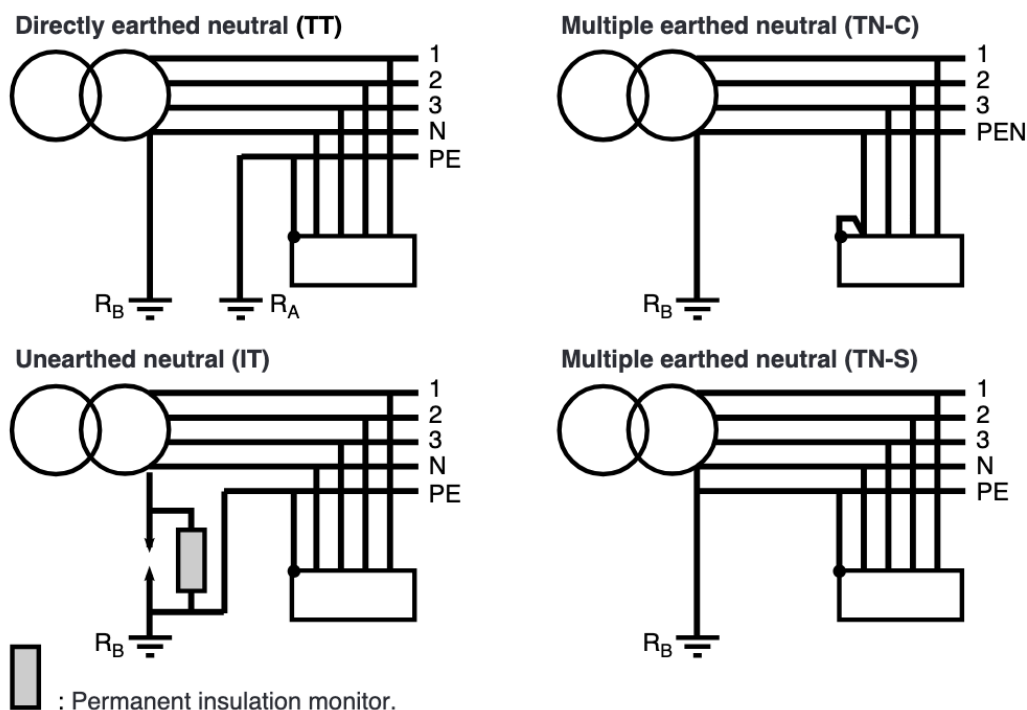


Fig. 3.5: i tre sistemi TT, TN e IT definiti dalla IEC 60364-3.

Per tutti i sistemi gli interruttori differenziali ad alta sensibilità proteggono dai contatti diretti (fig. 3.6).

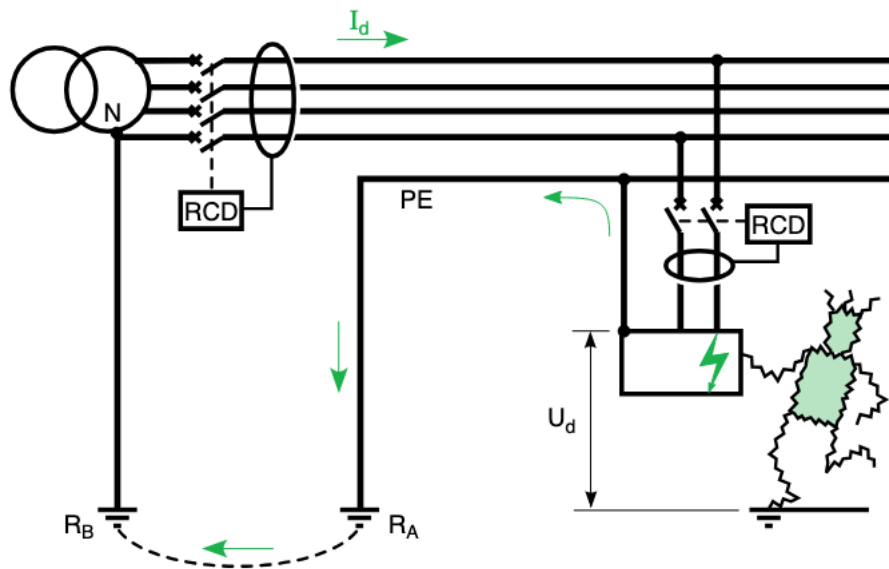


Fig. 3.6: principio di funzionamento di un interruttore differenziale a seguito di un guasto (Calvas R., 1999).

La loro installazione è obbligatoria nella maggior parte degli stati, infatti, uno sondaggio condotto dall'IEC, agosto 1982 in Giappone, ha mostrato l'efficienza di tali dispositivi, visto anche la riduzione del numero di persone che hanno subito elettrocuzione.

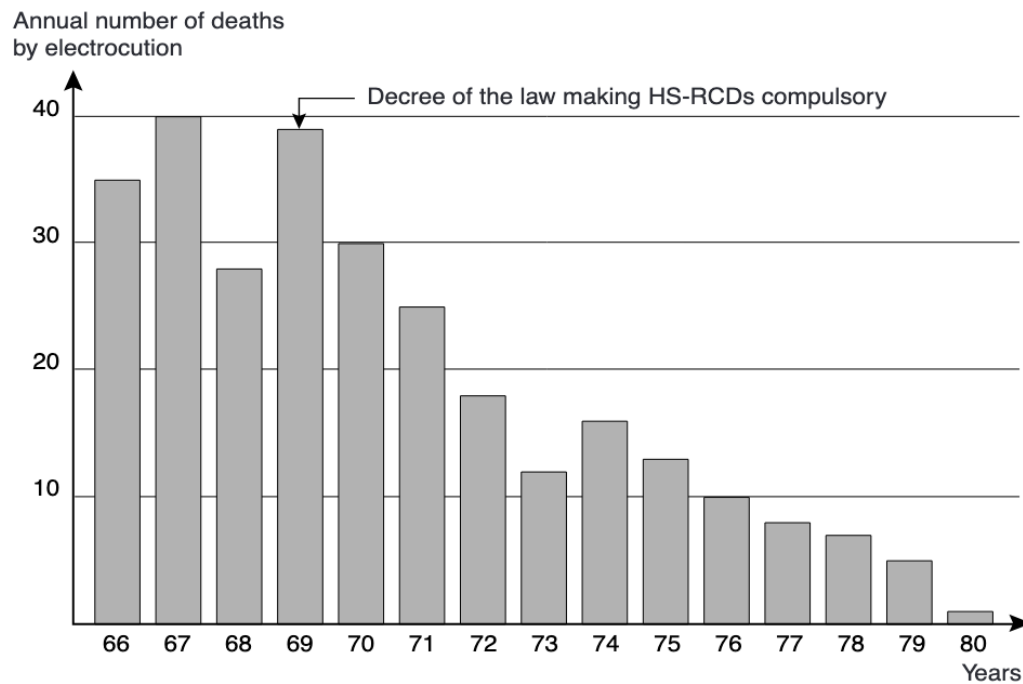


Fig. 3.7: grafico che mostra l'andamento delle morti per folgorazione dovuti all'uso di utensili in Giappone: il numero di morti inizia a diminuire dal 1970, anno in cui divenne obbligatoria l'installazione di interruttori differenziali (Calvas R., 1999).

Gli interruttori differenziali sono usati sia in installazioni domestiche che industriali, a seconda delle prescrizioni della norma IEC 60364 (in Francia NF C 15-100). Questo standard normativo fornisce anche delle prescrizioni che, in condizioni normali di funzionamento, riducono il rischio elettrico, tra cui: distanze, isolamento adeguato (come isolanti di classe II o trasformatori di sicurezza), sistema di messa a terra, equipotenzialità (Calvas R., 1999).

Il principio di funzionamento di un interruttore differenziale è schematizzato in fig. 3.8: gli avvolgimenti 1 e 2, uguali e percorsi da correnti uguali in modulo e opposte in direzione, in condizioni di normale funzionamento producono un flusso magnetico risultante nullo nel trasformatore. Una differenza tra le correnti, a seguito di un guasto a terra, produce un flusso magnetico risultante diverso da zero; tale flusso induce sul terzo avvolgimento una corrente, se tale corrente è maggiore della cosiddetta "corrente differenziale nominale di intervento" dell'interruttore differenziale allora interviene (Carrescia V., 2008).

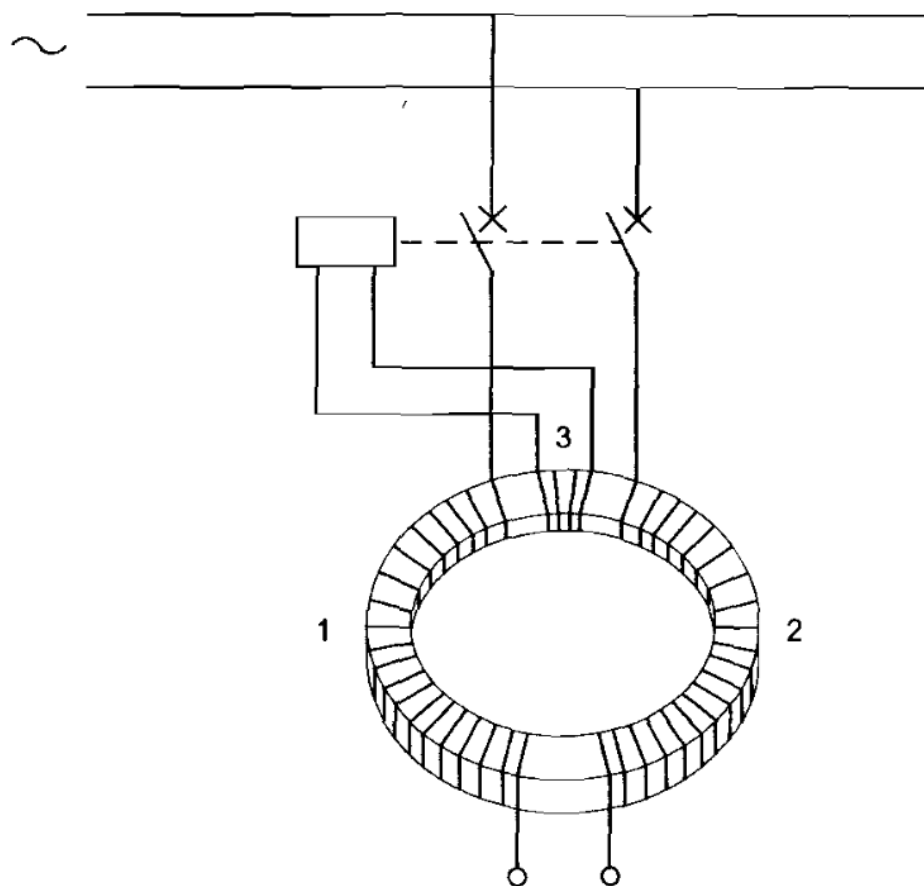


Fig. 3.8: schematizzazione del funzionamento di un interruttore differenziale nei circuiti fase-neutro e fase-fase.

3.7 Limiti delle protezioni e AFDD

Come già analizzato nel secondo capitolo, l'arco elettrico rappresenta una delle cause più diffuse degli incendi di origine elettrica: viste le alte temperature che genera può facilmente incendiare materiali combustibili nelle vicinanze.

I guasti dovuti all'arco elettrico si possono distinguere in (Varalda, 2022):

- Arco in parallelo al carico (fase/neutro, fase/fase o fase/terra);
- Arco in serie al carico.

Quando si verifica arco in serie, ovvero quando è coinvolto solo un conduttore, nessuno dei dispositivi installati è in grado di rilevarlo e interrompere automaticamente il

circuito, poiché non si verificano delle sovracorrenti che possono attivare interruttori magnetotermici o fusibili, né circolano correnti di dispersione verso terra, che possono attivare l'interruttore differenziale (Siemens, 2018).

L'AFDD (Arc Fault Detection Device) è un dispositivo che rileva la forma d'onda della corrente e riconosce la firma tipica di un arco elettrico pericoloso, sia in serie (un solo conduttore interrotto parzialmente) sia in parallelo (es. fase-neutro). La norma di prodotto di riferimento è la CEI EN 62606.

La Nona Edizione della norma CEI 64-8, per far fronte a tale problema riprende quanto (come già introdotto con la Variante 3 del 2017) prescrive l'adozione di provvedimenti contro il pericolo di guasto serie. Non obbliga all'installazione dell'AFDD, ma lo indica come la misura tecnicamente adeguata nei luoghi a maggior rischio in caso incendio e nei luoghi soggetti a vincolo artistico/monumentale o con beni insostituibili, dunque non negli edifici residenziali.

Capitolo 4 – Metodologie investigative sugli incendi di natura elettrica

4.1 Analisi post-incidentale

Il nuovo approccio nell'analisi post incidentale punta alla prevenzione, con lo scopo di evitare che l'evento avverso si verifichi una seconda volta, con lo scopo principale di studiare, analizzare e valutare le dinamiche con cui il determinato incidente si sia verificato, per individuare le sue cause più probabili.

L'analisi post incidentale, in altre parole, consiste in un processo gestione messo in atto con lo scopo di individuare le cause dirette e indirette di un evento incidentale, al fine di consentire la determinazione le misure tecniche e gestionali che posso essere implementate per evitare il ripetersi di tale incidente, se possibile, o limitare le conseguenze di eventuali incidenti simili futuri (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

L'analisi post incidentale rappresenta, dunque, l'elemento principale e fondamentale di un sistema di gestione della sicurezza, visto il suo scopo nella prevenzione degli incidenti.

Le indagini sugli incidenti sono dei processi che comprendono la segnalazione, il monitoraggio e l'investigazione formale degli incidenti, permettendo di analizzare anche la tendenza degli incidenti. L'analisi post incidentale è una parte dell'investigazione incidentale. Quest'ultima svolge un ruolo fondamentale per l'attività di gestione e controllo del rischio: apprendere le cause di un incidente è necessario per mettere in atto opportuni interventi per evitare che tale evento si ripeta. È dunque strettamente collegata all'attività di prevenzione del rischio (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

Lo scopo di un'analisi post incidentale è, dunque:

1. Identificare e descrivere il vero corso degli eventi
 - Identificare le cause dirette e radice che contribuiscono all'incidente
 - Individuare le misure di riduzione del rischio

- Indagare e valutare le basi per potenziali azioni penali
- Valutare la questione della colpa al fine di valutare la responsabilità per il risarcimento

Le parti interessate di un'indagine sono: aziende, autorità (organi di polizia giudiziaria, procura, ispettorato del lavoro, servizi antincendio e di soccorso) e la parte pubblica (comitati per salute e sicurezza sul lavoro, il parlamento, partiti politici, ecc.), sono definiti *stakeholders* e sono coloro che prendono parte ad un'analisi post incidentale.

Le tipologie di analisi post incidentale sono:

- Diretta e informale: viene sempre attuata e condotta dal diretto supervisore dell'azienda in maniera informale
- A giudizio di esperti: analisi condotta da una commissione di esperti per la ricerca di una spiegazione plausibile, su ordine sia del gestore che dell'autorità di controllo e si basa sul giudizio ingegneristico
- Analitica e strutturata: analisi strutturata, complessa e formalizzata, per l'individuazione di cause radice. Può essere eseguita solo con la disponibilità di esperti aventi specifiche competenze nelle tecniche analitiche necessarie. Viene integrata con un riesame del sistema di gestione della sicurezza.

4.2 Definizioni

Di seguito vengono riportate alcune definizioni relative all'analisi post incidentale (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

Accident: un evento che interrompe il processo di lavoro e provoca lesioni alle persone

Incident: un evento che può interrompere il processo di lavoro, ma non comporta lesioni o danni. È un preallarme: può essere pensato come il primo di una serie di eventi che può portare all'*accident*.

Circostanza indesiderata: un insieme di condizioni o circostanze che possono causare lesioni o problemi di salute (es. vetri per terra, finché non ci cade nessuno sopra non c'è un incidente, oppure uno scatolone in bilico su uno scaffale)

Near miss: episodi anomali e negativi che non hanno determinato un vero e proprio incidente con danni alle persone, beni aziendali e ambientali, ma che *avrebbero potuto* provocare tali eventi, evitati solo per circostanze favorevoli e/o casuali (es. Scatolone in bilico su uno scaffale che è caduto ma non ha ferito o danneggiato nulla).

Sequenza incidentale: una serie di eventi composti da una causa iniziale e da eventi intermedi che portano a un risultato indesiderato.

Realizzare una buona analisi post incidentale e una corretta indagine sugli incidenti è necessario che questa sia realistica e coerente: deve riportare una descrizione realistica degli eventi, con risultati di diverse indagini coerenti tra di loro, per consentire il confronto. Deve essere inoltre funzionale e disciplinare: il lavoro deve essere reso efficiente e suddiviso tra gli investigatori in base alla loro competenza; infatti, durante l'indagine disposta una squadra costituita da diversi professionisti con competenze diverse, compresi coloro che sono a conoscenza del processo lavorativo coinvolto nell'incidente. L'indagine, infine, deve produrre dei risultati chiari, comprensibili e soddisfacenti.

Non deve essere usata come solo strumento per assegnare la colpa o la responsabilità, l'attività di accertamento dei fatti deve essere sfruttata per imparare dall'incidente (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

4.3 Cause degli incidenti

Ogni incidente è generato da cause dirette e/o immediate, possano essere queste dovute sia ad un errore tecnico, che un errore umano (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025):

Le cause vengono classificate in (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025):

- Cause dirette: agente materiale che genera un evento avverso (macchina in funzione, sostanza chimica)
- Cause indirette: comportamenti rischiosi e condizioni di sicurezza approssimative (rimozione di una protezione)

- Cause principali o radicate (*root causes*): ragione fondamentale per cui si è verificato l'incidente che identifica un errore o un guasto correggibile nel sistema di gestione.

Un evento incidentale è raramente dovuto ad una combinazione inaspettate di circostanze. Infatti, la ricerca di Turner (*Man-made Disasters* (MMD), 1978), ha individuato modelli socio-tecnici e sistemici che consentivano di prevedere e prevenire gravi disastri organizzativi (Bills et al., 2023).

I cosiddetti “fattori organizzativi patogeni” (POF) rappresentano un certo numero di processi e fenomeni che nell'organizzazione hanno un impatto negativo sulla sicurezza: possono essere identificati dai loro effetti e impatti sull'organizzazione. I loro effetti possono essere oggettivi e chiaramente quantificabili, oppure soggettivi (es. suggeriti da un dipendente).

I “fattori organizzativi resilienti” (ROF), invece, forniscono una misura delle capacità adattive dell'organizzazione, sia al cambiamento che a seguito di eventi negativi. Un evento incidentale si avrà dunque quando i POF saranno maggiori dei ROF (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

Di seguito sono riportati alcuni dei POF che si possono riscontrare nell'ambito industriale (Pierlot, 2007):

- Pressioni di produzione
- Difficoltà nell'implementazione dell'esperienza
- Cambiamenti derivati da enti di controllo
- Brevi cambiamenti nella cultura organizzativa della sicurezza
- Scarsa gestione della complessità organizzativa
- Nessun riesame dell'ipotesi progettuale
- Fallimento nella gestione quotidiana della sicurezza

4.4 Fasi dell'analisi post incidentale

Di seguito vengono riportate tutte le fasi di un'analisi post incidentale (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025):

1. Attivazione commissione di investigazione
2. Raccolta dati
3. Ipotesi
4. Analisi
5. Conclusioni e raccomandazioni
6. Reporting
7. Attuazione di modifiche
8. Riesame del sistema investigativo
9. Interiorizzazione degli insegnamenti tratti
10. Sistema di gestione della sicurezza

La composizione della squadra può variare notevolmente, a seconda della natura e complessità dell'incidente. Solitamente è comunque composto da: team leader, rappresentante aziendale, esperto del settore/ingegneri di processo, esperto nei sistemi di sicurezza, analista di sicurezza, operatore del settore. Possono comunque essere coinvolti, sia a tempo pieno sia per una consulenza, altri esperti a seconda della natura dell'incidente (es. chimico industriale, esperti antincendio, ecc.). In ogni caso è importante che i membri della squadra vengano selezionati in base alle loro capacità professionali (mentalità logica aperta, scrupolosità, esperienza, conoscenze specifiche, capacità di analisi), e in base alla loro formazione.

Per le fasi di raccolta dati, ipotesi, analisi e conclusioni svolge un ruolo importante la pianificazione dell'attività: è importante prefissare gli obiettivi che si vogliono raggiungere (es. raccolta e salvaguardia evidenze, determinazione delle cause radice, formulazione dei risultati e delle raccomandazioni), tenendo conto che ogni piano è specifico per ogni incidente e deve essere rivisitato man mano che vengono individuate nuove priorità con l'avanzare dell'investigazione, anche usando strumenti come *checklist*. Sin dall'inizio è importante, ad esempio, avere un protocollo per la registrazione, emissione e conservazione della documentazione (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La fase di raccolta dati comprende un sopralluogo iniziale: è una procedura di orientamento per stabilire le distanze, dimensioni e orientamento delle attrezzature per

stimare l'entità del danno. È possibile e consigliato pianificare le attività iniziali di fotografia, videoregistrazione e campionamento. Il sopralluogo è anche utile per effettuare una valutazione dei rischi a cui può andare incontro la squadra di investigazione durante i successivi lavori sul campo. Ci sono cinque tipologie di dati utili per il team investigativo: persone (testimonianze e dichiarazioni di partecipanti e/o vittime, rapporto dei vigili del fuoco), dati fisici (parti meccaniche, attrezzature, macchie, oggetti proiettati, residui o rifiuti generati), dati elettronici (telecamere di sorveglianza, e-mail scambiate tra lavoratori), posizioni (posizione di persone, oggetti fisici, dispositivi elettronici), dati cartacei (registri operativi, politiche aziendali, procedure operative, liste di controllo) (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La fase di analisi delle prove invece è fondamentale per eseguire una valutazione dei componenti coinvolti nell'incidente: inizialmente con esame visivo, foto, depositi, prelievo campioni e successivamente, se necessario, è possibile svolgere un'analisi più dettagliata dei componenti con prove per la valutazione dei materiali, dato che l'indicazione di rottura o le linee che mostrano la direzione di detonazione sono utili per la ricostruzione della dinamica dell'incidente. È anche possibile fare riferimento a software di simulazione (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La fase di ipotesi, invece, è supportata dall'utilizzo di tecniche strutturate, che verranno analizzate nei successivi paragrafi.

4.4.1 Valutazione e riduzione del rischio

Il concetto del “rischio”, nell'ambito dell'Ingegneria della Sicurezza, viene usato per quantificare il livello di sicurezza di una determinata attività umana. Diversamente da quanto comunemente inteso, con il termine rischio non si va a definire una probabilità avversa, bensì il prodotto tra il danno atteso e la probabilità che questo avvenimento si manifesti:

$$R = P * D$$

Dove R è il rischio, P è la probabilità di accadimento dell'evento avverso e D è il danno atteso nel caso in cui l'evento avverso si verifichi.

La valutazione dei rischi, la loro successiva riduzione, è un elemento importante non solo per nell'ambito dell'analisi post incidentale ma è un elemento fondamentale attorno al quale ruota la prevenzione nei luoghi di lavoro, e non solo. Grazie al processo di valutazione dei rischi, il datore di lavoro, sotto propria responsabilità deve compilare il cosiddetto “Documento di Valutazione dei Rischi” (DVR), di vitale importanza e obbligatorio da un punto di vista normativo. Tale documento consente di individuare tutti i rischi presenti sul luogo in questione e valutare tali rischi per determinare se questi rientrano nei limiti di accettazione. Lo scopo è l'eliminazione dei rischi o, ove ciò non sia possibile, la loro riduzione al minimo tramite all'applicazione di misure di protezione e/o misure gestionali (D. Lgs. 81/08).

Gli approcci per la stima del danno possono essere: qualitativi (viene stimata la gravità del danno) o quantitativo (viene calcolata la probabilità che si verifichi un danno). Ci si può avvalere di strumenti per la stima del rischio (come matrice dei rischi, alberi decisionali, ecc.).

Nell'ambito dell'analisi post incidentale è un passaggio fondamentale: una volta individuate le cause radici di un incidente è importante attuare tutte le misure necessarie affinché tale evento non si ripeta.

4.5 Tecniche strutturate

Nel tempo sono state sviluppate diverse tecniche pensate come strumento a supporto delle analisi post incidentali strutturate, basate sulle teorie della causalità e dei fattori umani.

Le tecniche strutturate, nell'ambito dell'analisi post incidentale, sono uno strumento importante per l'analisi dell'incidente e l'individuazione delle cause radici: sono metodologie logiche e sistematiche, da applicare con certo criterio a seconda della tecnica utilizzata, al fine di ricostruire l'evento e definire azioni correttive per evitare il ripetersi di tale evento. Sono chiamate “strutturate” perché prevedono fasi precise e linee guida.

Esistono circa venti diverse tecniche, ma tutte hanno in comune gli stessi obiettivi (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025):

- Organizzazione delle informazioni sull'incidente
- Descrizione delle causalità e sviluppo dell'ipotesi
- Identificazione e formulazione delle azioni correttive

Le tecniche possono essere ricondotte a 4 approcci diversi:

- Approccio induttivo
- Approccio deduttivo
- Approccio morfologico
- Approccio non orientato ai sistemi

4.5.1 Tecniche induttive

Le tecniche induttive sono tecniche caratterizzate da strategie che cercano di ricostruire la linea temporale; infatti, sono spesso evidenziate le sequenze di eventi in una catena incidentale (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

Inoltre, identificano l'impatto delle potenziali deviazioni dal normale funzionamento del sistema o del processo

Invece che individuare le singole cause tendono a focalizzarsi sul quadro d'insieme. L'approccio induttivo consente di sviluppare una mappa logica per ricostruire la sequenza degli eventi incidentali, a partire dagli eventi antecedenti l'incidente, fino all'evento finale. È dunque un approccio che si sviluppa a partire da osservazioni e sfruttando evidenze consente di scartare varie ipotesi, per ottenere una teoria (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

Sono, inoltre, spesso combinate con le tecniche deduttive per migliorare i risultati possibili. Esempi di alcune tecniche induttive sono: Event Tree Analysis (ETA), Accident Anatomy Method (AAM9), Action Error Analysis (AEA), Hazard and Operability Analysis (HAZOP).

Una delle tecniche più utilizzate è quella che viene chiamata *event tree analysis*: è usata per analizzare le sequenze di eventi che seguono dopo un evento di inizio, le quali

portano ad una serie di possibili conseguenze. Le conseguenze possono essere considerate accettabili o inaccettabili (fig. 4.1) (Villemeur, A. 1991).

La sequenza degli eventi è influenzata dal successo o dal fallimento di numerose barriere o sistemi di sicurezza.

La sequenza degli eventi è illustrata graficamente e ciascun sistema di sicurezza è modellato in base a due stati: funzionamento o guasto.

Nella fig. 4.2 viene riportato un esempio dell'applicazione di questa tecnica per una migliore comprensione. In questo caso la mappa è stata sviluppata a partire dalla situazione pericolosa in cui due treni si trovano sulla stessa rotaia e i due *outcome* possibili sono: collisione e non collisione. Il verificarsi di uno dei due dipende dall'intervento (o mancato intervento) delle quattro protezioni, come riportato nella mappa in fig. 4.2.

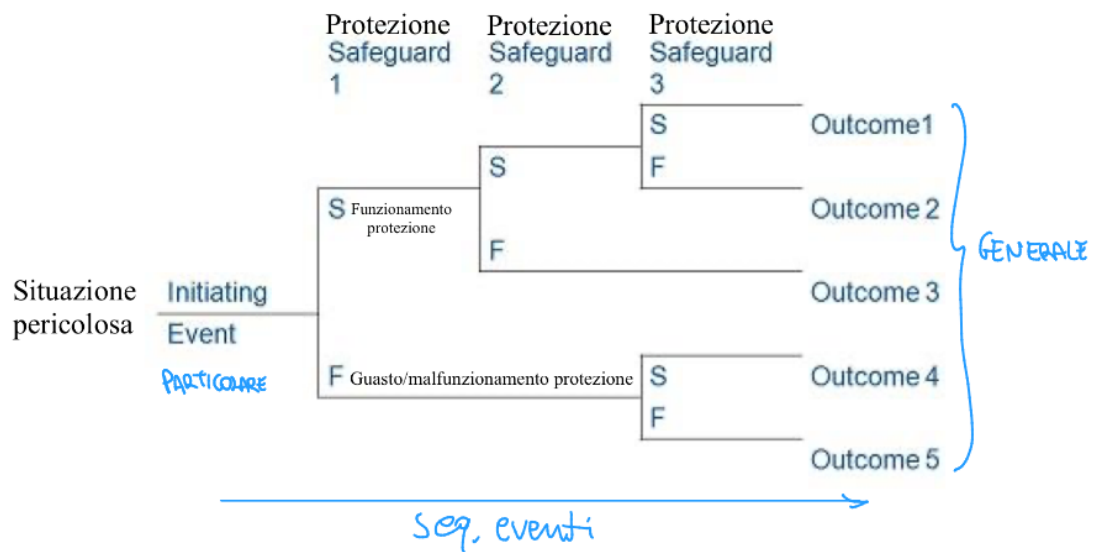


Fig. 4.1: Come applicare la tecnica ETA (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

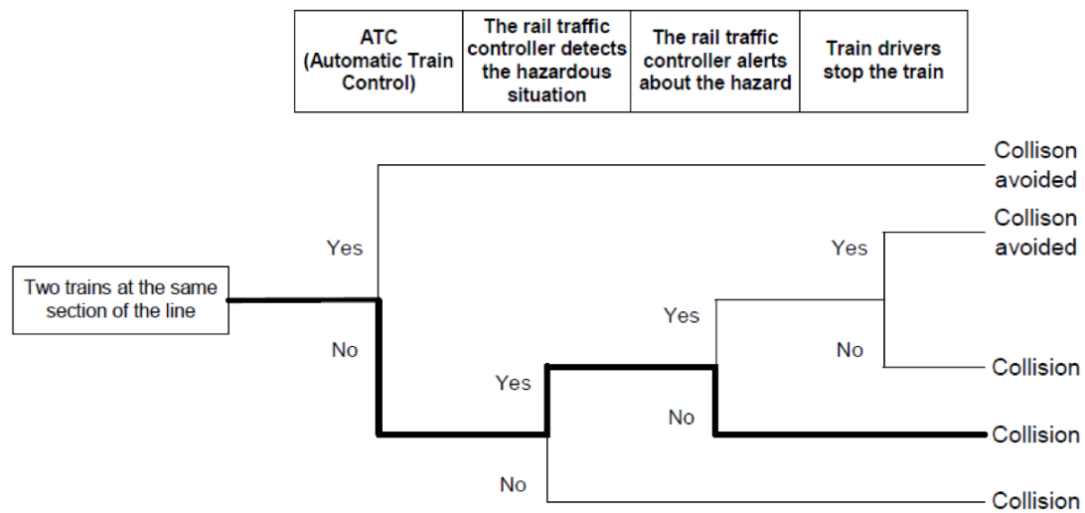


Fig. 4.2: Esempio applicazione della tecnica ETA (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

Un'altra tecnica che merita menzione è quella che prende il nome di *hazop*: è uno strumento di valutazione del rischio qualitativo e di identificazione per l'individuazione sia delle fonti di pericolo e sia delle situazioni in grado di compromettere la produttività dell'impianto, nonché per l'individuazione di quello che prende il nome di *Top Event*.

Viene sviluppata grazie ad un sistema di *brainstorming*, il lavoro di squadra gioca un ruolo fondamentale: vengono applicate una serie di parole chiave accoppiate a dei parametri fondamentali di processo. In altre parole, una parola guida (es. no, meno, più, parte di, ecc.) viene combinata con un parametro (es. portata, temperatura, pressione, ecc.) per ottenere quello che prende il nome di *deviazione* (es. no portata, abbassamento di temperatura, ecc.), che rappresentano gli effetti negativi prodotti da un incidente. Consente, inoltre, di sviluppare azioni correttive sulla base delle informazioni raccolte.

4.5.2 Tecniche deduttive

Le tecniche deduttive sono quelle che sono in grado di soddisfare maggiormente l'analisi post incidentale, alcune permettono di individuare sia cause dirette che indirette di un incidente (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

L'approccio deduttivo, contrariamente a quello induttivo, sfrutta una mappa logica per ricostruire le dinamiche dell'incidente secondo una sequenza temporale inversa, dunque a partire dall'evento finale. Viene inizialmente stipulata una teoria e, attraverso ipotesi e osservazioni, viene confermata o smentita tale teoria.

Alcuni esempi di tecniche deduttive sono: Fault Tree Analysis (FTA), Causal Tree Method (CTM), Management Oversight and Risk Tree (MORT), Multiple-causa, System Oriented Incident Investigation Technique (MCSOII).

È importante scegliere a quale livello fermare l'analisi prima di, cosa che non può essere scelta a priori. Può essere fatto (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025):

- Sulla base del giudizio dell'analista
- In base al grado di dettaglio delle informazioni impiantistiche e operative: l'analisi viene stoppata quando si ritiene che si sia raggiunto il giusto grado di dettaglio
- In base alla necessità o meno di classificare la tipologia di eventi
- Sulla base dell'esperienza derivante dall'applicazione di altre tecniche
- Può essere condotta fin quando non si è convinti di aver individuato le cause dell'incidente e non un sintomo

La *Fault Tree Analysis* o albero dei guasti fu concepito nel 1961 da H. A. Watson, del Bell Telephone Laboratories, assieme all'aeronautica militare statunitense, per studiare il sistema di controllo al lancio del missile Minute Man. Successivamente, nel 1965, al Safety Symposium sponsorizzato dall'università di Washington e dalla compagnia aerea Boeing, furono presentati numerosi studi che esaltarono la virtuosità di questo metodo di analisi post incidentale. Da quel momento la Fault Tree Analysis venne utilizzata come strumento affidabile per garantire le funzioni di sicurezza per sistemi dinamici complessi, come, per esempio, i reattori delle centrali nucleari (Favarin, 2021-2022).

È una tecnica usata per l'identificazione di un evento incidentale che analizza il sistema per determinare le cause dell'evento stesso, fornendo una rappresentazione grafica delle relazioni logiche fra gli eventi, i quali sono guasti di componenti, che

verificandosi possono portare all'accadimento del Top Event (incidente) (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

Le relazioni tra gli eventi sono rappresentate da porte logiche, quelle di uso comune sono:

- 1. OR: l'evento in uscita accade se si verifica almeno uno degli eventi in entrata;
- 2. AND: l'evento in uscita accade se si verificano tutti gli eventi in entrata;
- 3. INH (INHibit): l'evento in uscita accade se si verificano tutti gli eventi in entrata ad una sequenza definita (es. contemporaneità di un guasto di un componente e malfunzionamento di una protezione).

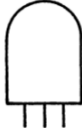
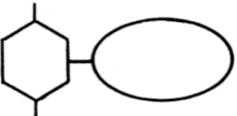
OPERATORI LOGICI		
	AND	Il cancello AND descrive l'operazione logica nella quale è richiesta la coesistenza di tutti gli eventi in input per produrre l'evento di output.
	OR	L'operatore OR definisce situazioni dove l'evento di output esisterà se uno o più degli eventi di input si avvererà.
	INHIBIT	INHIBIT è l'operatore logico che descrive la relazione di causalità tra due guasti. Se le condizioni sono soddisfatte, l'evento di input produce direttamente l'evento di output. Gli eventi devono quindi verificarsi con una certa sequenzialità perché si verifichi il danno.

Fig. 4.3: simbologia e operatori logici usati nella tecnica FTA (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La costruzione dell'albero avviene attraverso la ricerca della sequenza minima che porta all'evento incidentale. La sequenza è minima quando rappresenta la via più breve che congiunge gli eventi base a quello finale. Gli eventi base rappresentano le cause radice dell'incidente. L'albero dei guasti consente di quantificare le frequenze attese, ovvero la probabilità di accadimento dell'incidente, strumento fondamentale per l'attività di prevenzione (Hendrick K. And Benner Jr., 1987, Vesely W.E. et al., 1981, Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1989).

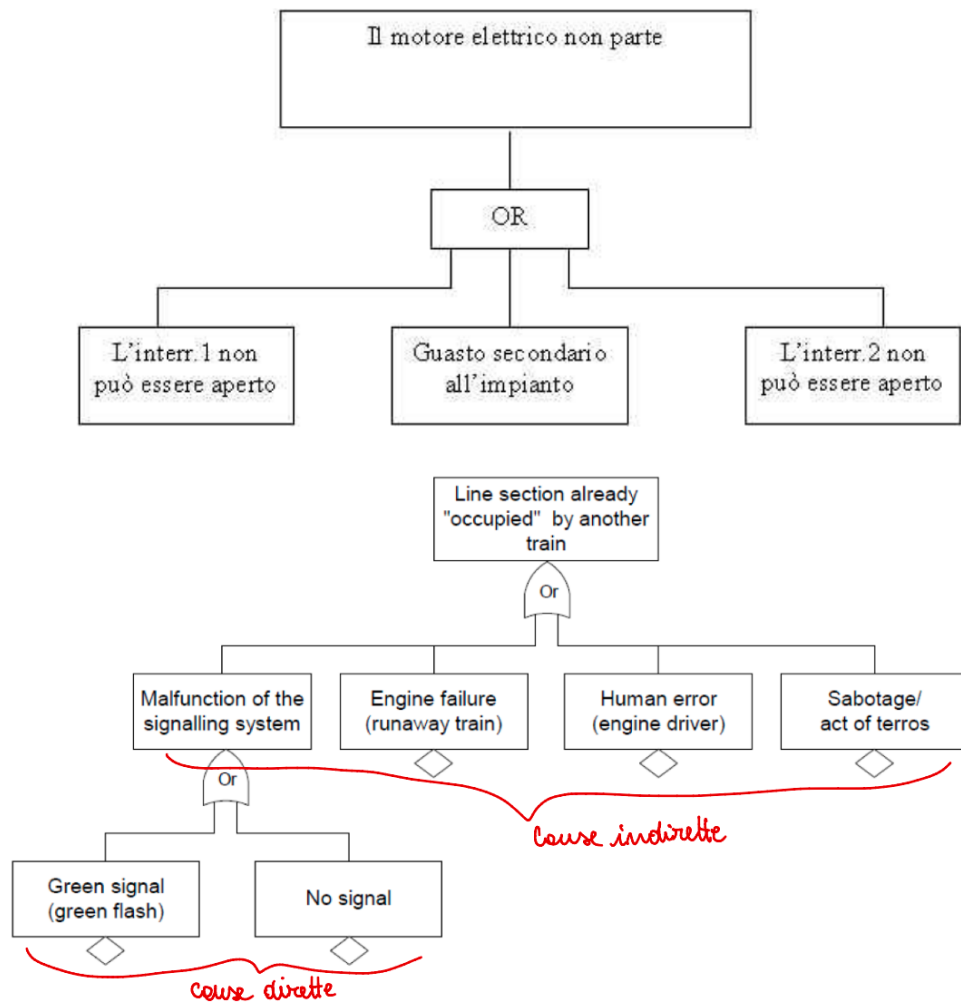


Fig. 4.4: esempi di applicazione della tecnica FTA (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La tecnica chiamata *Causal Tree Method* è una tecnica inizialmente sviluppata nell'ambito dell'analisi di incidenti sui luoghi di lavoro ma è possibile applicarlo con diversi gradi di complessità. Il metodo richiede la preventiva raccolta dati (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

Per costruire l'albero è necessario usare le seguenti tre parole chiave e porsi le seguenti domande:

1. Esito: "quale esito viene analizzato?"
2. Necessario: "il fattore identificato mediante la raccolta dati è necessario che si verifichi perché l'esito si producesse?"

3. Sufficiente: dopo l'identificazione dei fattori necessari, “questi fattori sono anche sufficienti a causare l'esito?”

Se i fattori sono necessari ma non sufficienti vanno eliminati dall'albero perché non rappresentano né una causa diretta né indiretta

Viene costruito l'albero finché gli analisti concordano di aver raggiunto un sufficiente grado di sviluppo dell'albero ed essere raggiunti alle cause radici dell'evento finale.

Devono esserci minimo tre fattori identificati e almeno uno per ogni macro-categorie: organizzativa, umana e materiale. I fattori causali identificati possono essere la fonte di raccomandazioni per azioni correttive.

È una metodologia di impiego semplice e intuitivo, non richiede personale esperto ed è molto diffusa. Tuttavia, non fornisce un'analisi quantitativa, diversamente dalla FTA, e per questo motivo perde anche di dettaglio.

4.5.3 Tecniche morfologiche

Le tecniche morfologiche consentono di svolgere un'analisi strutturata che sfrutta modelli derivanti dall'insieme di informazioni e insegnamenti dall'esperienza storica. Sono tecniche facili da applicare, ma non raggiungono il rigore tipico delle tecniche deduttive e induttive, per questo motivo sono utili per le semplificazioni che introducono. Esempi di tecniche morfologiche sono: Accident Evolution and Barrier Technique (AEB) e Work Safety Analysis (WSA) (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La prima è una tecnica finalizzata all'analisi di quasi incidenti.

L'analisi si scompone in due fasi: la prima consiste nel modellare l'evoluzione incidentale in termini di interazione tra fattori umani e sistemi tecnici mediante l'uso di un diagramma di flusso, è un metodo che non mira alla ricostruzione della sequenza di eventi, l'ordine cronologico è approssimativo.

La seconda fase, invece, consiste nell'identificazione delle funzioni barriera e la loro analisi (i fattori organizzativi possono essere integrati come funzione barriera).

Per funzione barriera si intende qualsiasi componente che può arrestare l'evoluzione di un incidente in modo che il prossimo evento nella catena non si realizzi. Viene sempre identificata in base al sistema che protegge

Le funzioni barriera possono essere: Inefficaci (non impediscono lo sviluppo dell'incidente), efficaci (impediscono lo sviluppo dell'incidente), o non esistenti (se presenti avrebbero impedito lo sviluppo dell'incidente).

Dal diagramma di flusso si capisce se la barriera è stata efficace, inefficace o non esistente (fig. 4.4).

Non è possibile che più di una freccia porti ad una finestra errore o che più di una freccia arrivi ad una casella.

Seppure non sia una tecnica consigliata per analisi complesse, è in grado di evidenziare la connessione tra i risultati dell'analisi di sicurezza e quegli dell'analisi post incidentale. È inoltre utile per il riesame delle evidenze raccolte sul campo (DOE, 1999, Svenson, O., 1991, Svenson, O., 1991).

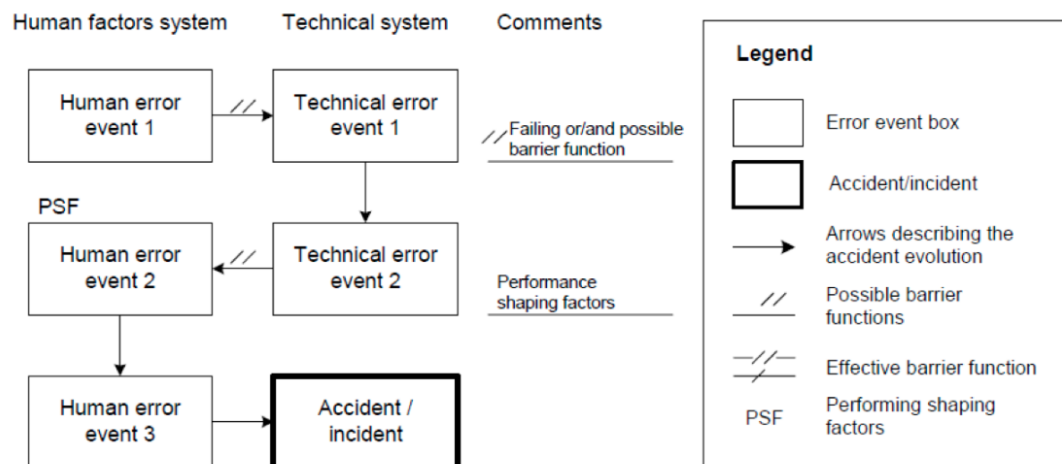


Fig. 4.5: esempio applicazione tecnica AEB (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La tecnica chiamata Work Safety Analysis (WSA), invece, è stata finalizzata dal *Safety Engineering Department* del *Technical Research Centre* finlandese (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

È indirizzata al campo della sicurezza sui luoghi di lavoro: è infatti un'analisi sistematica delle modalità di lavoro, apparecchiature e ambiente di lavoro al fine di individuare le potenzialità incidentali.

Infatti, il suo scopo è quelli di individuare i fattori contribuenti e le fonti di pericolo associati ad un sistema lavorativo.

La ricerca dei fattori contribuenti è effettuata in base alla scomposizione di un compito lavorativo in una sequenza di azioni elementari (fig. 4.5): ad ogni azione elementare vengono associati i pericoli e i fattori causali che portano a tale pericolo. Successivamente si individuano azioni preventive, azioni mitigative e azioni correttive.

Azioni elementari	Pericolo	Fattori causali	Azioni preventive	Azioni mitigative	Azioni correttive

Fig. 4.6: come applicare la tecnica WSA (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La tecnica però ha dei limiti: fallisce nell'individuare alcune fonti di pericolo che non sono direttamente collegate alle fasi lavorative e richiedere il supporto di altre tecniche, non può essere applicata da sola (Suokas J., 1981, Suokas J. and Rouhiainen, 1984, Suokas J., 1988).

4.5.3 Tecniche non orientate ai sistemi

Sono delle tecniche più recenti rispetto alle altre e consentono di effettuare un'analisi più profonda: infatti alcune di queste tecniche vengono usate per incidenti complessi e richiedono una formazione specifica (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

La *Root Cause Analysis* (RCA), per esempio, nasce come strumento per eventi avversi nel campo dell'aviazione, dell'industria aerospaziale e nel campo ingegneristico.

È una metodologia di indagine sistematica per la ricerca e identificazione dei fattori primari che causano variazioni della performance o che contribuiscono al verificarsi di

un evento avverso. Il suo scopo è quello di indagare le cause radici di un problema al fine di identificare le soluzioni più appropriate.

L'analisi delle cause richiede un certo grado di giudizio e prevede un approccio newtoniano, ovvero di causa-effetto, seguito dalla realizzazione di diagrammi causa-effetto.

È una metodologia interdisciplinare, coinvolge esperti in diverse discipline, identifica i cambiamenti necessari per il sistema e viene effettuata ad un certo livello di profondità. Inoltre, comprende la determinazione di fattori umani, tecnologici e infrastrutturali che possono contribuire all'evento, l'analisi di sottostanti sistemi di causa-effetto (profonda), identificazione dei rischi e dei loro determinanti e la successiva determinazione di potenziali miglioramenti.

Per riassumere, la tecnica si propone di: indagare cos'è successo, perché è successo e che cosa può essere fatto al fine di ridurre la probabilità che ciò accada di nuovo.

Un'altra tecnica morfologica che merita menzione è la *Change Evaluation/Analysis* (CE/A): Il cambiamento è qualcosa che disturba il bilanciamento di un sistema che funziona come pianificato ed è spesso la fonte di deviazioni nelle operazioni di sistema. Questa tecnica esamina le modifiche pianificate o non pianificate che hanno causato esiti indesiderati, analizzando la differenza tra ciò che si è verificato prima dell'incidente e la sequenza effettiva di eventi.

Le differenze vengono valutate per determinare se queste hanno causato o contribuito all'incidente (DOE, 1997, DOE, 1999, Sklet, S, 2002).

Gli step da seguire sono:

1. Categorizzare le modifiche in base alle domande della prima colonna: quali condizioni (what, where, when, who, how) erano presenti nella situazione di incidente che non ci sarebbero dovute essere nel normale funzionamento del sistema (fig. 4.7);
2. Descrivere le condizioni del sistema prima dell'incidente;
3. Descrivere l'evento o la condizione che si è verificata o che avrebbe dovuto verificarsi nella situazione di riferimento nella terza colonna;

4. Descrivere le differenze tra le condizioni nell'incidente e le situazioni base (accident free);
5. Discutere l'effetto che ogni cambiamento ha avuto sull'incidente.

<i>Factors</i>	<i>Accident situation</i>	<i>Prior, ideal, or accident-free situation</i>	<i>Difference</i>	<i>Evaluation of effect</i>
What Conditions Occurrences Activities Equipment				
When Occurred Identified Facility status Schedule				
Where Physical location Environmental conditions				
Who Staff involved Training Qualification Supervision				
How Control chain Hazard analysis Monitoring				
Other				

Fig. 4.7: foglio di lavoro per svolgere l'analisi CE/A (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

4.6 Applicazione delle tecniche di analisi post incidentale sugli incendi di natura elettrica

La scienza forense è definita come l'applicazione di un ampio spettro di scienze per rispondere a domande di interesse nell'ambito dell'ordinamento giuridico, comprese le

azioni sia penali che civili (Houck e Siegel 2006). Il compito di uno scienziato forense è quello di fornire prove scientifiche, in particolare l'analisi di dati scientifici o ingegneristici, al sistema giudiziario al fine di ridurre l'incertezza (Taroni et al. 2010). Le prove scientifiche sono di solito incomplete, il che significa che esiste una certa incertezza associata a ciascuna analisi. Di conseguenza, lo scienziato forense deve interpretare e presentare il significato delle prove al tribunale (Taroni et al. 2006).

L'indagine degli incendi è una delle scienze forensi più complicate a causa delle prove continuamente alterate, inquinate o distrutte dall'incendio stesso. Il fuoco è un processo tridimensionale altamente variabile nel tempo, con condizioni al contorno variabili nel tempo. L'altra difficoltà per gli scienziati forensi che indagano questi eventi è che le osservazioni dei danni dopo l'incendio possono spesso essere indipendenti dal suo percorso intrapreso, rendendo difficile identificare il punto di innesco. Pertanto, un investigatore antincendio deve avere una solida conoscenza della fisica e delle variabili che influenzano lo sviluppo di un incendio, nonché del modo in cui queste variabili possono o meno aver influenzato l'esito del danno (Gorbett et al., 2015).

Come disciplina scientifica forense, la *fire investigation*, dunque, è molto ampia in quanto comprende così tanti diversi campi accademici e investigativi. Coloro che svolgono tale professione (*fire investigators*), per svolgere correttamente il loro ruolo, devono essere esperti in chimica, fisica, fluidodinamica, dinamiche di sviluppo degli incendi. Devono avere determinate competenze anche nella raccolta e analisi dei dati, oltre che usare della scienza per rispondere a domande di interesse per il sistema giuridico (Lentini, J.J., 2019).

La NFPA 921 (Guide for Fire and Explosion Investigation) elaborata dalla National Fire Protection Association, organizzazione internazionale riconosciuta quale riferimento certo nel campo della Fire Investigation. È uno standard riconosciuto a livello globale adottato da autorità, investigatori e periti assicurativi in tutto il mondo. Fornisce un metodo scientifico rigoroso, basato su dati e osservazioni oggettive, al fine di limitare il rischio di errori e interpretazioni soggettive (Admin, 2025) e lo scopo è quello di fornire delle linee guida e delle raccomandazioni per un'indagine sistematica con analisi e accurata elencazione delle cause.

La norma UNI 11628:2016, invece, stabilisce e specifica le competenze professionali e i codici di comportamento per i periti assicurativi incaricati della liquidazione dei danni. Le competenze sono date dalla combinazione dei requisiti di:

- Conoscenze - Indicate nel prospetto 2 della Norma UNI 11628.
- Abilità - Indicate nel prospetto 2 della Norma UNI 11628.
- Comportamenti personali - Elencati nell'appendice A della Norma UNI 11628.

Si parlava per la prima volta di *fire investigation* nel 1977 nel documento intitolato "Arson and Arson Investigation: Survey and Assessment" prodotto da Law Enforcement Assistance Administration (LEAA) e pubblicato 3 anni dopo dal National Bureau of Standards (NBS). Gli autori di questo articolo hanno introdotto diversi "indicatori" per determinare le cause degli incendi, anche se non erano supportati dalla letteratura scientifica dell'epoca. Gli indicatori da loro citati che potrebbero essere usati per determinare se un incendio è a lento sviluppo o rapido sviluppo sono (Brannigan FL, Bright RG, Jason NH, 1980):

1. degradazione del legno: incendi producono danni e tracce diversi in base alla loro velocità di sviluppo;
2. fenomeno di "spalling" del calcestruzzo: avviene quando vengono raggiunte temperature elevate in un incendio;
3. "glass effetc"
4. danni al pavimento: basandosi sull'ipotesi che i soffitti subiscono gli stessi danni dei pavimenti, questi possono presentare tracce che mostrano la presenza di liquidi infiammabili.

Nei decenni successivi alla pubblicazione NBS, numerosi autori, nell'ambito della fire investigation hanno iniziato a citare tali indicatori e la letteratura al riguardo ha iniziato ad essere più corposa. La disciplina della fire investigation ha iniziato a diffondersi.

L'indagine sugli incendi (determinazione dell'origine e della causa) è parte integrante e fondamentale del modello di sicurezza antincendio totale, compresa la prevenzione e la protezione dagli incendi per una comunità. Le indagini sugli incendi consentono di identificare sia prodotti potenzialmente difettosi o progettati e installati in modo

improprio che potrebbero aver avuto un ruolo nell'incendio che persone che hanno deliberatamente appiccato un incendio con intenti dannosi. Uno dei compiti più importante dell'investigatore della scena è la corretta identificazione dell'origine dell'incendio (NFPA, 2014). La determinazione dell'origine è necessaria per effettuare una valutazione accurata della causa. Scienziati forensi, ingegneri forensi e investigatori antincendio (*fire investigators*), spesso lavorando insieme come una squadra, hanno comunemente il compito di determinare sia l'area di origine dell'incendio che la sua causa (Svare, 2023).

Un'indagine antincendio eseguita correttamente dovrebbe determinare la causa dell'incendio, la causa dei danni materiali risultanti e, soprattutto, la causa delle lesioni personali o della perdita di vite umane tra civili e vigili del fuoco (Gorbett et al., 2015). I primi testi pubblicati sulle indagini degli incendi sottolineavano l'importanza di utilizzare i danni e lo schema di propagazione di un incendio per determinare l'area di origine dello stesso (Rethoret 1945; Straeter e Crawford 1955; Kennedy 1959; Kirk 1969). In generale, questi testi hanno incoraggiato i ricercatori a identificare visibilmente quale lato di una parete o di un elemento strutturale potrebbe essere stato maggiormente influenzato dal calore. I danni variabili sono stati descritti in molti termini dagli investigatori antincendio e si riflettono nella letteratura, tra cui: schema di propagazione dell'incendio, tracce di materiale combusto, indicatori, indicatori di combustione, impronte digitali di incendio, modelli di trasferimento di incendio e una varietà di forme geometriche.

Tuttavia, la maggior parte dei primi testi pubblicati in materia, non offre una procedura ben definita su come utilizzare i dati raccolti durante un'indagine, a parte vaghe descrizioni su come identificare visibilmente aree più estese di danni e tracciare i modelli di incendio (Svare, 2023).

4.7 Analisi dell'arco elettrico nell'analisi post-incidentale

Il guasto ad arco (*arc fault*), come analizzato nei precedenti capitoli, rappresenta una delle principali cause di rischio negli impianti elettrici, richiedendo soluzioni tecnologiche avanzate per una sua rilevazione efficace.

Il guasto ad arco può presentarsi in due forme principali: arco di tipo serie, che coinvolge un singolo conduttore, e arco di tipo parallelo, che si verifica tra due o più conduttori adiacenti. Nel caso dell'arco serie le correnti in gioco sono di solito più basse rispetto all'arco parallelo, ma non per questo meno pericolose: le elevate temperature che genera possono comunque portare il conduttore ad una temperatura tale da poter innescare incendi nei materiali combustibili circostanti (Zinno, 2025).

La condizione di arco può essere causata da molteplici fattori come ad esempio:

1. Conduttori danneggiati o usurati;
2. Danneggiamento dell'isolante (dovuto a: animali, chiodi, fenomeni, atmosferici, invecchiamento, ecc.);
3. Collegamenti elettrici poco sicuri e Connessioni elettriche instabili;
4. Viti di serraggio allentate;
5. Errori di installazione;
6. Degrado di dispositivi elettromeccanici;
7. Vibrazioni o movimenti meccanici

Come già accennato nel terzo capitolo, la necessità di prevenire incendi e ridurre i loro conseguenti danni a persone, beni e ambiente ha portato allo sviluppo di dispositivi atti al miglioramento della sicurezza elettrica nelle abitazioni: gli AFDD (Arc Fault Detection Devices). Prima della loro introduzione, infatti, i dispositivi di protezione comunemente utilizzati (fusibili, interruttori magnetotermici, differenziali) non erano in grado di rilevare gli arc fault: i fusibili non intervengono in caso di archi a bassa intensità, i magnetotermici richiedono tempi di persistenza troppo lunghi, mentre gli interruttori differenziali sono sensibili solo alle dispersioni verso terra e non agli archi di tipo serie (Zinno, 2025). Realizzare un AFDD che sia efficace può essere complicato: un sistema di rilevazione deve infatti saper distinguere correttamente un

fenomeno pericoloso da uno innocuo. Un falso positivo potrebbe causare l'interruzione non necessaria della corrente, mentre un falso negativo potrebbe portare a un incendio (Zinno, 2025).

All'inizio degli anni '70 numerosi ricercatori hanno condotto esperimenti nel tentativo di sviluppare metodologie per distinguere le differenze tra eventi ad arco che causano un incendio ed eventi ad arco osservati sui conduttori elettrici danneggiati dopo un incendio. Tuttavia, alcuni ricercatori hanno concluso che non potevano trovare molte promesse con nessuno dei metodi proposti e nella comunità delle indagini forensi è comunemente accettato che non sia ancora stata sviluppata una metodologia affidabile per distinguere la differenza tra i due eventi (Svare, 2023).

Secondo la guida tecnica internazionale NFPA 921, la causa di un incendio viene identificata dopo averne determinato l'origine, utilizzando i dati raccolti da uno o più metodi di determinazione dell'origine riconosciuti. Nel corso di un'indagine antincendio, gli operatori addetti alle indagini possono implementare una metodologia di determinazione dell'origine elettrica denominata "mappatura dell'arco" (*arc mapping*), termine definito dalla norma NFPA 921 come "Identificazione e documentazione di un modello di incendio derivato dall'identificazione dei siti dell'arco utilizzati per aiutare a determinare l'area di origine o propagazione dell'incendio". La corretta applicazione della mappatura degli archi richiede al professionista qualificato di condurre un'indagine sull'impianto elettrico, identificare le caratteristiche dei danni da guasti elettrici e valutare i dati elettrici derivati. Tra le tecniche attualmente più utilizzate per identificare le caratteristiche dei danni osservati sui conduttori elettrici e sulle superfici conduttrici ci sono le radiografie: un metodo di test non distruttivi (NDT) e se usate nelle indagini sugli incendi possono aiutare il professionista a individuare le caratteristiche dei cablaggi e delle apparecchiature elettriche danneggiate dopo l'incendio, così analizzare in modo più affidabile gli artefatti danneggiati dopo l'incendio e a fornire ulteriori prove a supporto di una metodologia di determinazione dell'origine basata sul sistema elettrico (Svare, 2023).

L'affidabilità della metodologia di mappatura degli archi è stata successivamente valutata sia da Babrauskas che da Icove (Babrauskas, V., 2018): ciascuno aveva messo

in dubbio l'applicazione e l'affidabilità degli investigatori antincendio nell'eseguire la metodologia di mappatura dell'arco. McPherson ha inoltre esaminato, applicato e analizzato in modo forense un approccio sistematico all'indagine di scene di incendi residenziali (domestici) utilizzando le metodologie di mappatura dell'arco o di analisi dei circuiti di guasto dell'arco (McPherson J., 2022).

L'affidabilità di qualsiasi metodologia come metodo di determinazione dell'origine dipende dall'abilità, dalla conoscenza, dall'istruzione, dalla formazione e dall'esperienza della persona che la applica. Per effettuare con successo un'analisi dei guasti elettrici, è necessario essere qualificati e competenti nei settori della sicurezza elettrica e dei sistemi elettrici in esame (veicoli residenziali, commerciali, industriali, agricoli e di trasporto). Inoltre, è necessario essere in grado di adottare un approccio sistematico e scientifico per analizzare accuratamente i dati relativi ai danni osservati sui cablaggi e sulle apparecchiature elettriche (Svare, 2023).

Capitolo 5 – Esempi sull'uso dell'analisi post-incidentale

5.1 Rebuffi S.r.l.

Con sede a Mestre, Rebuffi S.r.l. è una società di perizie e consulenze assicurative specializzata nella gestione di danni complessi, indagini sugli incendi (fire investigations) e stime tecniche per settori industriali ad alto contenuto tecnologico come quelli dell'industria chimica, della produzione, trasformazione e trasmissione dell'energia elettrica e dell'industria siderurgica. In particolare, l'attività di fire investigator, svolta quotidianamente nella liquidazione dei sinistri, ha assunto nel tempo una propria dignità e autonomia, divenendo punta di diamante delle competenze dello studio Rebuffi S.r.l.; essa si rivolge alle principali compagnie assicurative. Le quattro società, grazie ad una struttura fortemente differenziata e specializzata, coprono ogni genere di richiesta giunga dai nostri clienti, dalla gestione di danni complessi con Rebuffi S.r.l., ai sinistri di frequenza con Erre2 S.r.l., alla gestione interna delle sostituzioni o riparazioni ad opera di Techno Loss Service S.r.l. sino alla consulenza specialistica nell'analisi del rischio da parte di Unisafe S.r.l., spin off partecipato dalla Università di Padova.

5.2 Tirocinio

La funzione dell'attività di tirocinio e tesi svolta è stata quella di consulenza nell'ambito dell'analisi post incidentale con l'obiettivo di conoscere i processi aziendali, studiando l'approccio metodologico per infine misurarsi con dei casi pratici. La modalità è stata l'affiancamento al personale con attività in presenza e accompagnamento nelle trasferte per sopralluoghi tecnici sul sinistro.

Durante l'attività di tirocinio ho avuto l'opportunità di affiancare un professionista specializzato nell'ambito delle indagini relative a sinistri da incendio. Il mio compito principale è stato quello di supportare la fase di raccolta e organizzazione dei dati e delle informazioni, attraverso la compilazione di relazioni tecniche relative a vari casi

di incendio, le quali hanno come scopo quello di chiarire le dinamiche del sinistro, con la possibilità di individuarne o ipotizzarne la causa, per consentire di valutare le migliori soluzioni tecniche e organizzative per evitare che l'evento accidentale si verifichi nuovamente. Queste relazioni venivano redatte sotto la supervisione del tutor, che mi ha fornito indicazioni e correzioni per garantire l'aderenza agli standard professionali richiesti nel settore,

Oltre all'attività in ufficio, ho partecipato a due sopralluoghi nei luoghi dei sinistri, dove ho potuto osservare direttamente il teatro dell'evento del tutor nella sua attività di fire investigator.

Questi momenti sul campo sono stati particolarmente formativi, poiché mi hanno permesso di comprendere le modalità con cui vengono raccolti nel teatro dell'evento i dati oggettivi, documentati e conservati, analizzati gli effetti dannosi e formulate le ipotesi sulle cause dell'incendio da validare con una specifica analisi utilizzando il metodo scientifico.

L'esperienza complessiva si è rivelata molto utile per approfondire la conoscenza del settore e per acquisire una visione concreta delle competenze necessarie nell'ambito delle indagini tecniche su sinistri da incendio e per applicare il metodo scientifico con i dati acquisiti e con i risultati valutati delle prove di laboratorio dedicate.

5.3 Relazioni svolte durante il tirocinio

Le relazioni tecniche relative ai sinistri che coinvolgono incendi e/o esplosioni svolte durante l'attività di tirocinio venivano strutturate nel seguente modo: la prima fase consiste nella ricostruzione dello scenario prima dell'incendio. Viene effettuata una descrizione dettagliata del luogo in cui è avvenuto l'incendio, per poi analizzare la porzione interessata dall'incendio, cercando di descrivere in maniera cronologica le circostanze e quanto più accuratamente possibile, le dinamiche con cui si è sviluppato l'incendio.

Successivamente si procede con la descrizione di:

1. Impianto elettrico e impianto di riscaldamento: viene fornita descrizione generale dell'impianto, le sue specifiche (tensione e frequenza di esercizio), insieme ad una descrizione dei dispositivi elettrici installati a protezione dei sovraccarichi, corto circuiti e da contatti indiretti.
2. Impianto allarme e antincendio: descrizione generale dell'impianto allarme e antincendio, se presente ed attivo;
3. Mezzi di chiusura e accesso: viene fornita descrizione dei mezzi di chiusura e accesso, esaminando quello violato per valutare la modalità di accesso al luogo dell'incidente attraverso le tracce di scasso o violenza sul mezzo.
4. Carico d'incendio: viene definito dal Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 3 agosto 2015 e s.m.i.) come il "potenziale termico netto della totalità dei materiali combustibili contenuti in uno spazio, corretta in base ai parametri indicativi della partecipazione alla combustione dei singoli materiali, espresso in MJ." Viene dunque fornita una stima di quello che può essere il carico di incendio, anche sulle base delle informazioni che si sono riuscite raccogliere durante la precedente fase di sopralluogo.
5. Sorgenti di innesco: la sorgente di innesco è l'elemento che rilascia un adeguato valore di energia termica in grado di dare avvio al processo di combustione (Prof. Bertolazzi A., 2024/2025). Sulla base dei dati raccolti durante la fase del sopralluogo vengono ipotizzate le possibili sorgenti di innesco, tenendo conto di quelle più comuni riscontrate solitamente nel contesto. Ad esempio, per incendi avvenuti in ambito residenziale si considerano tra le fonti di innesco: fiamme libere, come quelle prodotte da candele, accendini e sigarette; sorgenti calde, come lavatrice, forno, ferro da stiro, stufa a pellet; utilizzatori elettrici e impianto elettrico, quindi considerando il surriscaldamento di un televisore, computer o lavatrice come probabile fonte di innesco; archi elettrici (vedi § 2.3).

Nella fase successiva si procede a descrivere le condizioni atmosferiche al momento del sinistro, con l'ausilio di alcuni programmi di valutazione meteo, tra cui il programma *Radarmeteo*.

Bisogna tener conto della presenza o meno di:

1. Vento, poiché questo incide sulla direzione e sviluppo dell'incendio
2. Fulmini: possono essere loro stessi la fonte di innesco

Se possibile questa fase può essere anche supportata da video e foto pubblicati sui giornali per meglio corroborare le dinamiche con cui l'incendio si è sviluppato e i fattori che hanno influito, fornendo un'accuratezza cronologica.

Raccolte queste informazioni, è possibile proseguire a una descrizione dettagliata e cronologica degli eventi e delle dinamiche con cui si è sviluppato l'incidente. Questa fase è supportata dalle dichiarazioni e testimonianze delle persone presenti sul luogo al momento dell'incidente (raccolte nella fase di sopralluogo) e dal rapporto dell'intervento dei Vigili del Fuoco, descrivendo anche come avvenuta l'attività di spegnimento dell'incendio da parte dei Vigili del Fuoco.

Successivamente, viene fatta la ricostruzione di tutti quelli che sono stati i danni per il sinistro, realizzando una mappa cromatica della intensità dei danni del luogo, utilizzando e riportando anche foto e video prodotti nell'immediatezza dell'evento se disponibili. In questa fase, se è possibile evincerlo dai danni presenti sul luogo dell'incidente, si può ottenere una costruzione più realistica delle dinamiche con cui si è sviluppato l'incendio, individuandone il punto di origine, tenendo conto che i danni in quel punto saranno maggiori per la maggior durata dell'incendio e in base ai danni riportati individuare la direzione di propagazione ed accrescimento.

Se durante il momento del sopralluogo ci sono indizi ed elementi che lascino pensare che sia stato utilizzato un accelerante di fiamma, sarà possibile raccogliere dei campioni per successivamente svolgere delle analisi e verificare tale ipotesi, se il contesto lo permette. Quella dell'incendio doloso, infatti, è un'ipotesi che deve essere considerata ed eventualmente scartata successivamente.

La fase dell'analisi della causa viene svolta nel seguente modo: sulla base di tutte, le informazioni raccolte fino a questo punto si formulano tutte le ipotesi possibili della causa del sinistro. Successivamente le singole ipotesi vengono analizzate e spiegate, per poi procedere ad una verifica della loro validità, con i rispettivi limiti.

5.4 Caso studio 1

Il primo caso che ho scelto di riportare tratta di un incendio avvenuto in un edificio residenziale. Come riportato nella relazione: *“Il complesso di fabbricati, a forma di U, è elevato a due piani fuori terra, con un piano interrato, adibito a garage, e con un sottotetto ventilato in parte abitabile.*

La porzione interessata dall’incendio è costituita da otto appartamenti, quattro al primo piano fuori terra comprendenti una tavernetta al piano interrato, e quattro al secondo piano fuori terra con sottotetto mansardato. L’incendio si è sviluppato in questa parte del complesso, che comprende altre due unità immobiliari edificate in aderenza, che non sono state coinvolte dall’incendio. I locali maggiormente danneggiati sono le quattro mansarde, completamente danneggiate dalle fiamme, con il manto di copertura in tegole curve di cotto, crollato o gravemente compromesso; la struttura portante del tetto in legno è stata gravemente distrutta dall’incendio, la muratura perimetrale e di divisione interne, nonché gli impianti sono stati pure danneggiati.

Le mansarde ispezionate sono completamente ricoperte dai residui del tetto crollato e sono stati rinvenuti e fotografati i residui di otto pannelli solari termici facenti parte dell’impianto di riscaldamento. Essi sono, inoltre, rilevabili da una foto aerea antecedente il sinistro.”

Da una prima analisi dell’impianto elettrico e dei contatori posizionati al piano interrato che alimentano i sotto quadri di ciascun appartamento, risulta evidente che non sono stati interessati dall’incendio, e dunque si può scartare l’ipotesi che l’incendio sia originato da un guasto o da un malfunzionamento dell’impianto elettrico.

Il carico di incendio del fabbricato e dei piani interessati dall’incendio risulta compatibile con quello tipico di un’abitazione civile (arredamento in legno, elettrodomestici, plastica, ecc.).

Analizzando i piani interessati dall’incendio, le possibili fonti di innesco che abbiamo ipotizzato sono:

1. Fiamme libere, come quelle prodotte da candele, fiammiferi, accendini e sigarette. Come specificato nella relazione *“un incendio scaturito da fiamme libere è un incendio che ha origine direttamente dalla combustione di un combustibile, solitamente in forma liquida o gassosa, che produce fiamme visibili e propagate nello spazio”*.
2. Sorgenti calde, dato che sono presenti in generale lavatrice, ferro da stiro, computer, televisori ed una stufa a pellet (quest'ultima è stata considerata per completezza tra le sorgenti di innesco, ma, analizzando le foto prodotte durante il sopralluogo, è evidente non risulta interessata dall'incendio)
3. Utilizzatore elettrici e impianto elettrico, come computer televisore, lavatrice e stufa pellet
4. Archi elettrici: durante il sopralluogo non sono tuttavia state riscontrate tracce sulle prese di corrente a muro che lascino pensare ad un arco elettrico come possibile fonte di innesco. Ciò è stato stabilito poiché dalle foto prodotte durante il suo sopralluogo era evidente e visibile l'effetto esterno prodotto dall'incendio, mentre la cavetteria residua non rappresenta l'origine dell'incendio.

Dalla analisi delle condizioni atmosferiche, eseguita con il programma Radarmeteo, non risultano fulmini il giorno del sinistro e si evince che il pennacchio si sviluppa solo nella direzione verticale, dunque l'azione del vento, seppure presente, non è stata influente sullo sviluppo dell'incendio.

Sulla base delle dichiarazioni dei condomini e dal rapporto dei Vigili del Fuoco è stato poi possibile ricostruire la cronologia degli eventi antecedenti allo scoppio dell'incendio: tutti e quattro i proprietari degli appartamenti mansardati interessati dall'incendio erano nei rispettivi appartamenti al momento del sinistro. La Sig.ra A ha sentito un crepitio e ha visto fumo proveniente dalla mansarda alle ore 22:09.

Il Sig. C è stato avvertito dell'incendio dalla Sig.ra A e, uscendo in strada, ha notato il comignolo che faceva fiammate. Alle 22:11 c'è stata la chiamata ai vigili del fuoco.

Il Sig. B è stato avvisato da una chiamata dei vicini ed è uscito verso le 22:15. Sostiene che l'inizio di un incendio sia stato su una piccola porzione di tetto e dopo 40 minuti si

sia sviluppato su tutto il tetto. Il Sig. D è stato anche lui avvisato dai vicini dell'incendio. Al 22:26 i Vigili del Fuoco sono arrivati sul luogo.

Nel rapporto dei Vigili del Fuoco è stato riportato che le porzioni di fabbricato attaccate dall'incendio sono state il tetto il piano mansardato di ognuno dei quattro appartamenti mansardati. L'attività di spegnimento è stata descritta nel rapporto dei Vigili del Fuoco come segue: *“è stata predisposta una tubazione 70/40 per gestire l'incendio dall'interno, mentre si provvedeva allo spegnimento mediante naspo dall'esterno per contenere l'incendio. Con l'arrivo della autoscala è iniziato lo spegnimento dell'incendio dal tetto. All'avanzare dell'incendio è stato predisposto lo spegnimento dall'esterno e successivamente dall'interno.”*

L'intervento dei vigili del fuoco ha consentito di limitare i danni e contenere l'incendio ad una porzione del fabbricato.

Successivamente è stata creata una mappa cromatica dei danni, sia del tetto, sia di quelli presenti all'interno degli appartamenti mansardati: la maggior parte del tetto dei quattro appartamenti risulta distrutto. L'appartamento della Sig.ra A sembra essere il più danneggiato dall'azione dell'incendio, insieme ad una porzione dell'appartamento del Sig. B confinante. Gravi danni ha subito anche l'appartamento del Sig. D, mentre l'appartamento del Sig. C risulta almeno danneggiato e i danni che presenta si trovano al confine con gli appartamenti della Sig.ra A e del Sig. D.

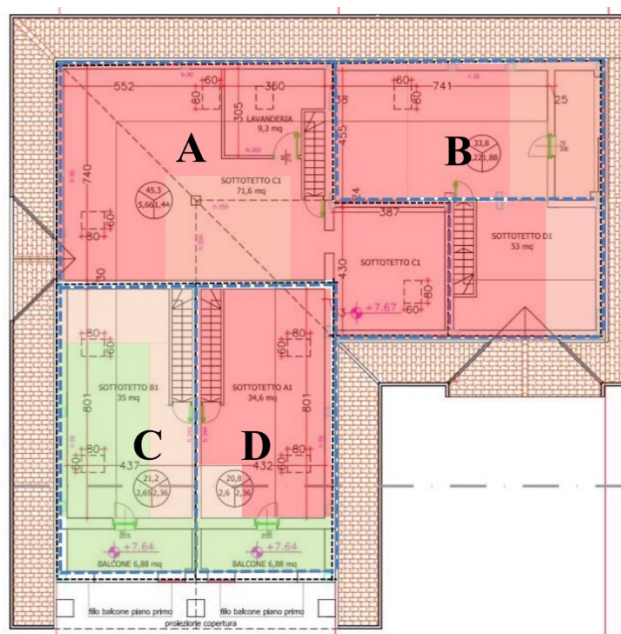


Fig. 5.1: mappa cromatica dei danni pavimento dei piani mansardati riportata nella relazione (in rosso il maggior danno, in verde il minore)

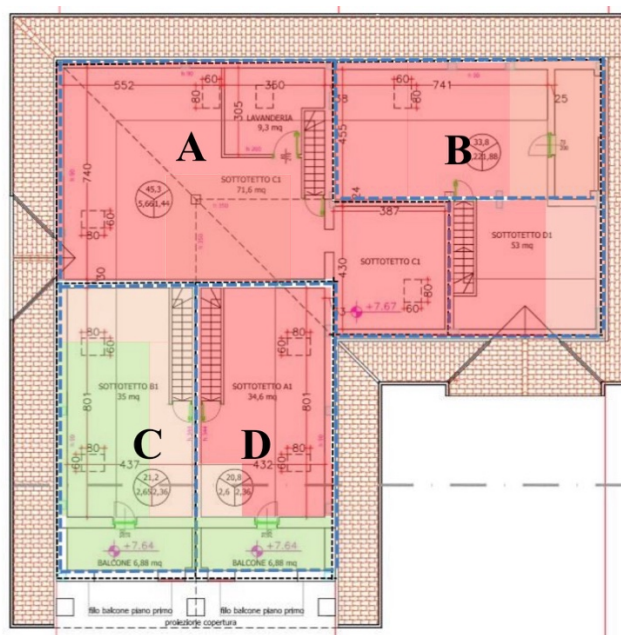


Fig. 5.2: Mappa cromatica dei danni del tetto ventilato del fabbricato.

Successivamente, si è proceduto ad analizzare le foto scattate durante il sopralluogo relative ai danni interni all'appartamenti mansardate interessati dall'incendio, al tetto ed infine quelle relative ai confini degli appartamenti al fine di capire con che dinamiche in che direzione si è sviluppato l'incendio per individuare il suo punto di origine. Sulla base di ciò sono state formulate due ipotesi sul luogo di innesco:

1. *l'appartamento della Sig.ra A, piano mansardato che conteneva una stireria con annesso ferro da stiro ed un computer;*
2. *l'appartamento del Sig. D, piano mansardato che conteneva una scrivania con computer, televisore e altri componenti elettronici*

Escludendo come luoghi di fonte di innesco gli appartamenti del Sig. C e Sig. B perché danneggiati in maniera minore rispetto agli altri due.

La presenza della stufa a pellet nell'appartamento della Sig.ra A è al secondo piano e da questo, tramite una scala interna, si accede alla mansarda. Ciò non lascia pensare alla stufa a pellet come possibile fonte di innesco; infatti, dalle foto sopra riportate si può notare come questa non risulti interessata dall'incendio, né origine, dunque questa ipotesi è stata scartata.

Per quanto riguarda la validità della prima ipotesi, questa risulta compatibile con quanto riscontrato durante il sopralluogo: ipotizzando che l'incendio sia partito dalla stireria dell'appartamento della Sig.ra A, la sua propagazione verso l'appartamento del Sig. B sarebbe avvenuta tramite combustione del tetto e del pannello solare che insiste su entrambi gli appartamenti. Successivamente, l'incendio si sarebbe propagato fino all'appartamento del Sig. D. Durante l'analisi delle foto scattate durante il sopralluogo dell'appartamento della Sig.ra A, è stata individuata una foto che ritraeva lo stipite della porta al confine tra la stireria e il resto dell'appartamento mansardato. I dettagli e le bruciature presenti sullo stipite della porta sono stati usati per individuare il percorso dell'incendio: la foto mostra come l'incendio si sia sviluppato dalla parte sinistra della soglia della porta verso la parte destra, e, dunque, dalla stireria verso il resto dell'appartamento.

Inoltre, seppur dai video disponibili dell'incendio non si noti uno sviluppo inclinato del pennacchio, la stazione a 14,28 Km di distanza dal fabbricato con una velocità di 0,7

m/s, che soffiava verso ovest, compatibile in caso avesse rinforzato (data la distanza dai punti di rilevamento) con i danni riscontrati durante il sopralluogo, dato che l'appartamento del Sig. D risulta danneggiato in maniera uguale a quello della Sig.ra A.

Come riportato nella relazione: *“sembra singolare che il piano mansardato del Sig. D, risulta a tal punto danneggiato da far sospettare questo come luogo di innesco. Questa gravosità del danno potrebbe essere spiegata dalla propagazione dell'incendio come indicato in figura.”*

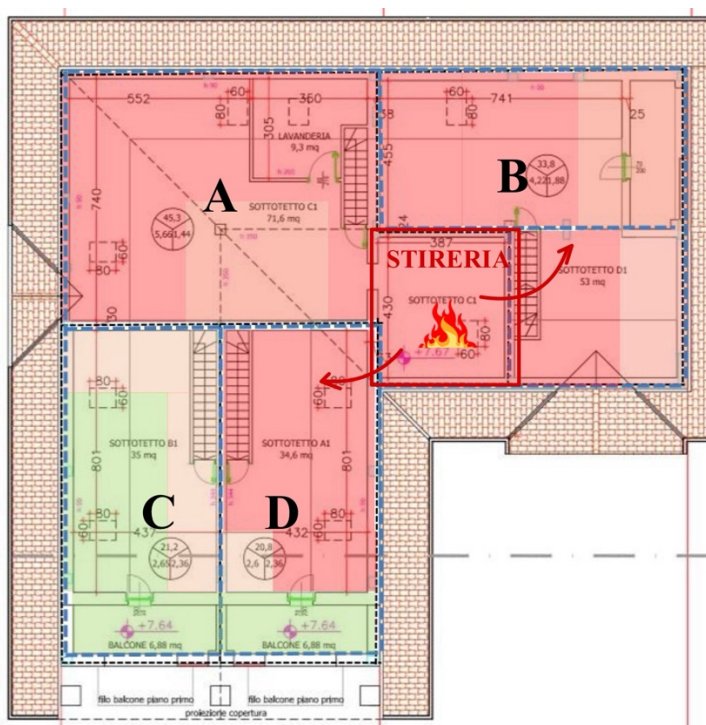


Fig. 5.3: foto riportata nella relazione che mostra l'ipotesi sul percorso seguito dall'incendio

L'ipotesi n°1 sembra dunque plausibile a maggior ragione perché la Sig.ra A, tra tutti e quattro gli inquilini dei piani interessati dall'incendio, è stata l'unica a notare l'incendio quando era in casa (alle 22:09 ha sentito un crepitio e ha visto fumo proveniente dalla mansarda).

Per quanto riguarda la seconda ipotesi, invece, si basa supposizione che l'incendio sia

scoppiato nell'appartamento del Sig. D, a partire da computer e televisore, e sia propagato verso l'appartamento del Sig. C e della Sig.ra A tramite combustione del tetto.

Questa versione, tuttavia, non è compatibile con i danni riscontrati durante il sopralluogo poiché l'appartamento della Sig.ra A risulta molto più danneggiato dell'appartamento del Sig. C, quest'ultimo riporta invece danni minori. Si potrebbe pensare che l'incendio si sia propagato tramite il lucernario del piano mansardato del Sig. C al lucernario del piano mansardato della Sig.ra A, ma non spiegherebbe come quest'ultimo sia molto più danneggiato.

Si ricorda anche che, come analizzato in precedenza, la direzione del vento e la sua velocità non sono compatibili con i danni riscontrati durante il sopralluogo, dato che il vento soffiava verso ovest e quindi verso l'appartamento del Sig. C e non della Sig. A. L'ipotesi n°2 sembra valida perché l'appartamento del Sig. D risulta molto danneggiato e compatibile con l'ipotesi che sia il luogo in cui l'incendio si sia innescato, ma non compatibile invece con i danni riscontrati durante il sopralluogo.

In conclusione, l'ipotesi più plausibile risulta essere la prima.

Individuata l'ipotesi più pertinente si procede ad analizzare e valutare quali possono essere le possibili cause dell'incendio. In questo caso sono state individuate le seguenti:

1. guasto dell'utilizzatore elettrico fisso
2. guasto all'impianto elettrico
3. azione antropica (candela rimasta accesa, ferro da stiro dimenticato acceso, sigaretta non spenta)

Successivamente, si procede ad analizzare tutte le possibili cause e individuare quella compatibile con dinamiche dell'incendio riscontrate.

Come riportato nella relazione: *“La prima è la più verosimile perché a quell'ora tutti gli utilizzatori elettrici erano in tensione e forse alcuni in attività, come la lavatrice. Pur non conoscendo le ragioni dell'innescò e l'elemento che lo ha prodotto, è molto probabile che questo appartenesse all'impianto di stireria, perché la sua posizione è compatibile con la dinamica dell'incendio descritta.*

Si esclude che l'impianto fisso elettrico abbia provocato l'incendio dopo aver esaminato punti luce, prese ed interruttori (seconda ipotesi).

La sigaretta ha una elevata temperatura ma una modesta capacità termica e provoca incendi solamente in casi particolarissimi, dove è a contatto con un combustibile a bassa accensione e con grande superficie specifica per l'aria, per esempio: carta veline appallottolata debolmente dentro un cestino, circostanze queste estremamente improbabili nella fattispecie, così pure una sigaretta lasciata accesa cadere su un divano imbottito. Essa avrebbe dato segni premonitori rilevanti e rilevabili dalla proprietaria, che per prima ha dato l'allarme dell'incendio del tetto, non certo imputabile alla concentrata combustione della tappezzeria del divano.

È molto probabile che l'incendio sia dovuto all'azione di accidentale attività del centro di stiro, che pur dotato di adeguato termostato in genere tarato su una temperatura di 200 °C, si accendeva con frequenza trasferendo il calore al piano combustibile, tanto da produrre la sua accensione nel tempo.”

5.4.1 Possibili misure di prevenzione

Come già visto nel precedente capitolo, uno degli scopi principali dell'analisi post incidentale è quello di individuare la causa di un evento incidentale, al fine di consentire di determinare le misure tecniche, organizzative e gestionali necessarie per evitare che si ripeta o, al più, per limitarne i danni.

Vista l'ipotesi più verosimile sulla causa del sinistro analizzato nel paragrafo precedente e vista la sua natura accidentale, le possibili misure che si possono attuare sono: come prima cosa, la formazione dei condomini circa i comportamenti pericolosi da evitare (come, ad esempio, evitare di lasciare materiali infiammabili e combustibili nelle vicinanze di sorgenti calde) e la corretta procedura di spegnimento degli elettrodomestici che, dopo il loro utilizzo, sono in grado di produrre abbastanza calore da innescare i materiali combustibili e infiammabili nelle vicinanze, accertandosi che, una volta terminato di utilizzarli, questi siano tornati a temperatura ambiente (circa 26 °C) prima di lasciarli inattesi. Un'altra soluzione potrebbe essere quella di prevedere

misure di protezione in fase di progettazione degli elettrodomestici, come dispositivi elettronici che misurano costantemente la temperatura raggiunta, al fine di interrompere la fruizione di corrente al raggiungimento di temperature troppo elevate o pericolose, oppure misure e dispositivi in grado di segnalare il malfunzionamento delle misure di protezione già esistenti.

Di seguito verrà realizzato un grafico esplicativo delle dinamiche con cui si è sviluppato l'incendio, tenendo conto dell'ipotesi più verosimile tra quelle proposte. Il grafico viene eseguito secondo la tecnica deduttiva *Causal Tree Method* (CTM) (vedi § 4.5.2), la quale è una tecnica spesso utilizzata per ricostruire le dinamiche con cui è avvenuto un incidente. Inoltre, è di semplice applicazione e consente di individuare, se eseguita correttamente, le cause dirette di un sinistro (Prof.ssa Vianello C., 2024/2025).

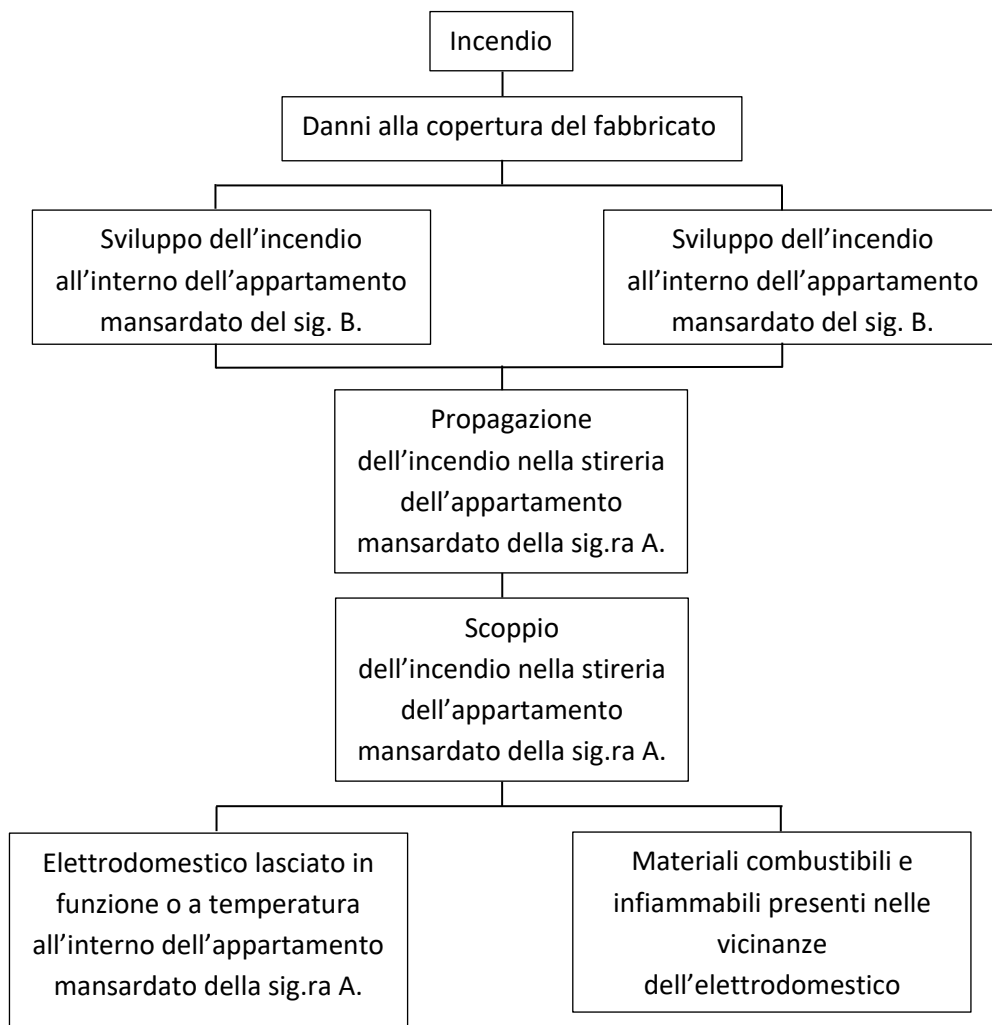


Fig. 5.4: grafico eseguito secondo la tecnica deduttiva CTM.

5.5 Caso studio 2

Il secondo caso che ho scelto di riportare tratta di un incendio che, secondo quanto riportato un dipendente presente sul luogo al momento del sinistro, sarebbe scoppiato

a partire da un carro miscelatore semovente di un'azienda agricola zootecnica per l'allevamento di bufale da latte con produzione di latte. Il macchinario in questione era utilizzato per preparare il mangime per circa 700 bovini.

Come riportato nella relazione: *“Il complesso assicurato sorge su un'area di circa 18.000 mq. ed è costituito da 4 blocchi di strutture comunicanti e non, in particolare:*

1) Fabbricati destinati a sala mungitura, infermeria, area parto e parto: il primo immobile è realizzato con strutture portanti in c.a.p., tamponamenti perimetrali in muratura ordinaria, copertura in lastre di cemento amianto, avente una superficie pari a circa mq. 250,00; gli altri corpi attigui (sale parto e parto) sono realizzati con strutture portanti in c.a.p., copertura con lastre in parte in lastre di cemento amianto e parte in fibrocemento ecologico, complessivamente sviluppano una superficie di circa mq. 650,00;

2) Tettoie per ricovero animali realizzate con strutture portanti in carpenteria metallica e copertura con lastre di fibrocemento ecologico, complessivamente sviluppano una superficie coperta di circa mq. 400,00;

3) Capannone adibito a stalla costruito con strutture portanti in carpenteria metallica e copertura con lastre di fibrocemento ecologico, avente una superficie di circa mq. 1500,00;

4) Capannone magazzino/deposito derrate alimentari (ove si è verificato l'incendio in esame), realizzato con struttura portante in carpenteria metallica, costituita profilati metallici HEA, copertura in pannelli sandwich (composti da uno o due paramenti metallici con interposta anima in poliuretano espanso ad alta densità con spessore del pannello 40 mm) ed aperto su tutti i lati, avente una superficie di circa mq. 1.850,00; Coesistono altre minori dipendenze e vasche per l'accumulo di liquame realizzate in materiali incombustibili.”

Il fabbricato è privo di impianto di illuminazione, presenta solamente una dorsale lungo tutta la lunghezza del capannone che alimenta un quadro, posto nella zona nord, con punto presa a servizio di un ventilatore. È dotato di protezione differenziale.

Il fabbricato è privo di impianti di allarme e antincendio e, per quanto riguarda mezzi di chiusura di accesso, è aperto su tutti i lati e l'area è solo parzialmente recintata.

Successivamente, si è proceduto ad analizzare nello specifico la tipologia e modello del macchinario che, visto la testimonianza del dipendente, era coinvolto nello sviluppo dell'incendio. Dalla relazione si legge: *“Un "carro miscelatore", in zootecnia, è una macchina che preleva, miscela e distribuisce mangimi ai ruminanti. La batteria del macchinario ha tensione nominale di 12 V e capacità pari a 95 Ah. I suoi componenti sono:*

- *Motore*

È un diesel a 4 tempi, modello FPT, con cilindrata 4500 cm³ ed un peso di 380 kg. È dotato di un filtro per il controllo della presenza di acqua nel gasolio.

Il motore aziona le coclee di miscelazione e la fresa per il carico dei foraggi oltre a fornire la potenza per la traslazione del mezzo.

- *Batteria di avviamento: tensione nominale di 12 V e capacità 95 Ah. La batteria alimenta il motore elettrico e viene ricaricata tramite un sistema plug-in.*
- *Cassone di miscelazione*
- *Due coclee per miscelare gli ingredienti realizzate in acciaio anti-usura per garantire l'efficacia e la durata nel tempo. Ha tre velocità di rotazione (200, 300, 350 rpm).*
- *Un sistema di scarico: permette di distribuire la razione miscelata.*
- *Un sistema di guida posizionato in una cabina nella zona anteriore è il sistema che permette al conducente di manovrare il carro durante il lavoro.*

Il carro miscelatore ha accumulato 4000 ore di utilizzo per 3 anni e mezzo, le batterie sono state cambiate al momento del primo utilizzo dell'utente.”

Dalle fatture fornite è stato possibile dedurre che il macchinario ha subito sia interventi di manutenzioni, sia ulteriori interventi a seguito di malfunzionamenti effettuati da un'officina esterna.

Successivamente si è proceduto a fornire una descrizione dettagliata di quello che è il carico d'incendio: in questo caso è stato possibile analizzare più nel dettaglio le sostanze infiammabili e le sostanze combustibili presenti all'interno del fabbricato grazie anche alla relazione dettagliata dei Vigili del Fuoco e alla prima relazione interlocutoria. Grazie a queste informazioni è stato anche possibile fornire, per

completezza, un calcolo approssimativo del carico di incendio specifico presente nel capannone, usando la formula semplificata del carico d'incendio riportata nel Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 3/08/2015). Il carico d'incendio è stato descritto e calcolato come segue: *“Dal rapporto dei Vigili del Fuoco è stato possibile individuare il*

carico di incendio presente all'interno del capannone.

1. *Il fabbricato, avente una superficie di copertura di 2000 mq, è diviso in due parti; 500 mq circa è adibito come recinto per le vacche, mentre i restanti 1500 mq circa, come deposito alimenti per gli animali.*

Al suo interno c'erano:

- *Due silos contenente canna da zucchero, fieno e paglia 130 ql. circa;*
- *Diversi bancali di farine (soia, girasole e colza) e integratori per gli animali.*

Secondo la prima relazione interlocutoria della Compagnia assicurativa AG

Insurance era adibito allo stoccaggio di:

- *rotoballe di fieno;*
- *fieno e erba medica accatastate nel lato sud-est, zona centrale e angolo nord-est;*
- *bancali di sacchi di integratori alimentari per bovini: sacchi da 15 kg in circa 7/8 bancali da 10 q.li cadauno;*
- *vari prodotti per alimentazione animale accatastati in apposite celle orizzontali, delimitate da pareti prefabbricate in c.l.s.;*
- *semi di cotone (circa 30/35 q.li) posti nelle celle nella zona sud, a confine con i separatori in c.l.s., tra la zona magazzino e la stalla dei bovini.*

2. *Pneumatici e componenti plastici del carro miscelatore (come tubi, serbatoi, rivestimenti);*

3. *Pannelli sandwich con cui è realizzata la copertura del tetto del capannone.” ... ” In questo paragrafo verrà calcolata una stima cautelativa del carico di incendio specifico presente nel capannone.*

1. *Pannelli sandwich*

Dati:

- Superficie dei pannelli: $20\text{ m} \times 97\text{ m} = 1.940\text{ m}^2$
- Quantità di poliuretano: varia dai 30–40 g/m², ovvero 0,03–0,04 kg/m², per arrotondare e avere un dato più cautelativo si sceglie 0,04 kg/m²

La formula semplificata del carico d'incendio specifico (Q_f) è:

$$Q_f = \frac{\sum m_i \cdot H_i}{A}$$

Dove:

- m_i : massa del materiale combustibile [kg]
- H_i : potere calorifico inferiore (PCI) del materiale [MJ/kg]
- A : superficie del compartimento [m²]

Massa totale del poliuretano:

$$m = 1.940\text{ m}^2 \cdot 0,04\text{ kg/m}^2 = 77,6\text{ kg}$$

PCI del poliuretano espanso rigido:

Valore tipico: 26–32 MJ/kg e si sceglie 30 MJ/kg come valore medio

- Carico di incendio totale Q_t :

$$Q_t = m \cdot PCI = 77,6 \cdot 30 = 2.328\text{ MJ}$$

- Carico di incendio specifico (Q_f):

$$Q_f = \frac{Q_t}{A} = \frac{2.328\text{ MJ}}{1.940\text{ m}^2} = 1,2 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$$

2. Fieno: 150 rotoballe

Massa totale delle rotoballe di fieno:

$$m = 150 \cdot 300 = 45.000 \text{ kg}$$

PCI delle rotoballe di fieno secco: 15 MJ/kg

- *Carico di incendio totale Q_t :*

$$Q_t = m \cdot PCI = 45.000 \text{ kg} \cdot 15 \text{ MJ/kg} = 675.000 \text{ MJ}$$

- *Carico di incendio specifico Q_f :*

$$Q_f = \frac{Q_t}{A} = \frac{675.000 \text{ MJ}}{1.000 \text{ m}^2} = 675 \text{ MJ/m}^2$$

Questo supponendo che le rotoballe non siano disposte su tutta l'area del capannone ma concentrate in una sola metà.

3. *Integratori per mangime animale:*

Massa totale degli integratori per mangime animale di cui si stima ci fossero 8 bancali da 10 quintali ciascuno:

$$m = 8 \cdot 1.000 = 8.000 \text{ kg}$$

Gli integratori zootecnici variano in composizione (vitamine, proteine, grassi, sali minerali). Se contengono materie organiche (es. grassi, amminoacidi, zuccheri), il loro potere calorifico può essere stimato in: 12 -20 MJ/kg, viene scelto un valore medio tra i due di 15 MJ/kg

- *Carico di incendio totale Q_t :*

$$Q_t = m \cdot PCI = 8.000 \text{ kg} \cdot 15 \text{ MJ/kg} = 120.000 \text{ MJ}$$

- *Carico di incendio specifico Q_f :*

$$Q_f = \frac{Q_t}{A} = \frac{120.000 \text{ MJ}}{1.000 \text{ m}^2} = 120 \text{ MJ/m}^2$$

Questo supponendo che gli integratori non siano disposti su tutta l'area del capannone ma concentrate in una sola metà.

4. *Semi di cotone (circa 30/35 q.li)*

Massa totale dei semi di cotone:

$$m = 35 \text{ quintali} = 3.500 \text{ kg}$$

PCI è stimato essere: 18 - 22 MJ/kg, viene scelto un valore medio tra i due di 20 MJ/kg

- *Carico di incendio totale Q_t :*

$$Q_t = m \cdot PCI = 3.500 \text{ kg} \cdot 20 \text{ MJ/kg} = 70.000 \text{ MJ}$$

- *Carico di incendio specifico Q_f :*

$$Q_f = \frac{Q_t}{A} = \frac{70.000 \text{ MJ}}{1.000 \text{ m}^2} = 70 \text{ MJ/m}^2$$

Questo supponendo che i semi di cotone non siano disposti su tutta l'area del capannone ma concentrate in una sola metà.

Dunque, il carico di incendio specifico totale è pari a: 866.2 MJ/m², che è compatibile con i danni riscontrati durante il sopralluogo."

L'incendio è avvenuto di notte e dunque quando non erano in corso lavorazioni. Le possibili sorgenti di innesco considerate dunque, sulla base delle valutazioni fatte durante il sopralluogo, sono: il carro miscelatore, le fiamme libere, archi elettrici/scintille, l'azione intenzionale ed il fieno. Come spiegato anche nella relazione, il fieno è stato considerato poiché in determinate condizioni (come umidità, accumulo di calore dovuto allo scarso ricambio d'aria e forte compressione) può generare

fenomeni di autoriscaldamento, con conseguente autogestione a causa del calore provocato dal metabolismo dei batteri che lo fanno fermentare.

L'analisi sulle condizioni atmosferiche e metereologiche, eseguita con il programma *radarmeteo* ai fini delle considerazioni sullo sviluppo dell'incendio, non riporta fulmini durante il giorno dell'incendio e, vista la direzione, l'intensità e la bassa velocità del vento, anche questo è risultato influente sullo sviluppo dell'incendio.

Nella fase successiva si è proceduto a ricostruire quanto più accuratamente possibile la cronologia degli eventi durante il giorno del sinistro, sulla base del rapporto dei Vigili del Fuoco e dalla dichiarazione dei conduttori dell'immobile: la macchina è stata utilizzata per l'ultima volta alle 18:30 e l'ultimo operaio è andato via alle 19:00. Verso le 2:00 gli operai si sono recati in azienda per iniziare il loro turno notturno. Alle 2:30 un operaio notava il carro miscelatore parcheggiato all'interno del capannone con un principio di incendio. Immediatamente avvisava telefonicamente il titolare, il quale ha prontamente allertato il 113 e il 115 le fiamme poi si sono propagate in pochi minuti al roto balle stipate all'interno del capannone. L'attività di spegnimento del fuoco ha occupato quattro diverse squadre dei Vigili del Fuoco dalle 3:22 alle 13:22.

Sulla base delle informazioni e delle foto raccolte durante il sopralluogo, insieme al rapporto dei vigili del fuoco è stato possibile individuare i danni subiti dal fabbricato, per poi costruire una mappa cromatica dei danni. *“L'incendio ha portato danni alla struttura e all'impianto elettrico, inoltre sono andati distrutti 130 ql circa di paglia fieno, un carro miscelatore e vari bancali di farine. Nessuna persona è stata infortunata.”*

Dalla mappa cromatica dei danni riportati alla copertura e all'interno del capannone risulta evidente che i danni maggiori e più gravi sono concentrati in prossimità del carro miscelatore, ciò vuol dire che il punto di origine dell'incendio si trova nei pressi del carro miscelatore.



Fig. 5.5: La mappa cromatica dei danni riportati dal fabbricato in esame. Cerchiato in blu è riportato il carro miscelatore e indicate in celeste ci sono le vasche di contenimento del mangime, del fieno e delle farine.

Durante il sopralluogo e in seguito all'analisi delle foto scattate durante il sopralluogo sono stati individuati segni di formazioni di archi elettrici nei cavi elettrici del carro miscelatore (il punto di fusione del rame è di 1085 °C, temperatura più elevata di quelle

che può raggiungere un incendio con il carico di incendio presente nel vano motore, che è di circa 500-800 °C).

Visto lo stato dei luoghi al momento del sopralluogo, non è stato possibile prelevare i campioni poiché avrebbero prodotto risultati inattendibili, vista la presenza di fango e l'alterazione dei luoghi a seguito dei danni subiti.

Sulla base degli elementi raccolti durante il sopralluogo e sulla base dell'analisi fatta finora è stato possibile formulare le seguenti ipotesi:

1. Autoriscaldamento del fieno
2. Surriscaldamento del materiale combustibile in prossimità del carro miscelatore
3. Malfunzionamento del motore endotermico del carro miscelatore
4. Malfunzionamento dell'impianto elettrico del motore del carro miscelatore
5. Azione intenzionale

Quanto alla discussione della validità delle ipotesi formulate, la prima è stata scartata poiché il rischio di autocombustione è massimo nei primi 30 giorni dopo l'imballaggio del fieno: *“in caso di insufficiente essiccazione di paglia e fieno si può generare un surriscaldamento che può condurre all'autocombustione. Questa tipologia di innesco prevede lunghi tempi di latenza e raggiungimento di elevate temperature nel nucleo interno del cumulo, dove il calore si accumula per la difficoltà ad essere smaltito. Quando questi nuclei caldi raggiungono le condizioni di innesco e producono fiamme visibili l'incendio degenera rapidamente provocando incendi generalizzati.*

Tuttavia, il primo taglio del fieno avviene:

- *Centro-Nord Italia: tra fine aprile e metà maggio;*
- *Sud Italia e zone più calde: anche da metà aprile;*
- *In zone montane o più fredde: può slittare a giugno.”*

La seconda ipotesi si basa sull'assunzione che il calore sviluppato dal motore del carro miscelatore dopo il suo ordinario utilizzo sia stato causa diretta dell'accensione dei materiali combustibili in prossimità del macchinario. *“tuttavia, il mezzo risultava spento già da diverse ore antecedenti lo sviluppo dell'incendio è quindi già freddo da tempo. Era stato usato per l'ultima volta alle 18:30 e l'incendio è stato notato dal dipendente verso le 2:30 del giorno successivo”.*

La terza ipotesi invece si basa sull'assunzione che il calore generato da malfunzionamento del motore endotermico del carro miscelatore abbia incendiato i materiali combustibili in prossimità del macchinario. *“Per malfunzionamento si può intendere un difetto o un guasto nel motore a combustione interna di un macchinario. Questo tipo di incendio può verificarsi a causa di surriscaldamento del motore, perdite di carburante o altri problemi meccanici che portano a una scintilla o a una fiamma che innesca l'incendio. Il surriscaldamento del motore può essere causato da vari fattori, come un malfunzionamento del sistema di raffreddamento, un'eccessiva usura dei componenti del motore o una lubrificazione insufficiente. Il calore generato può quindi innescare la combustione di materiali infiammabili presenti nel motore o nelle sue vicinanze. Tuttavia, un incendio che si sviluppa per via di questi motivi, si svilupperebbe negli istanti successivi allo spegnimento del motore, quando questo è ancora caldo e dalla testimonianza rilasciate dal dipendente si evince che questo era rimasto spento per vario tempo prima dello scoppio dell'incendio.”* Inoltre, dall'analisi delle fatture degli interventi e delle manutenzioni svolte sul macchinario nel periodo antecedente al sinistro, risulta evidente che gli interventi non riguardano componenti del motore il cui malfunzionamento guasto può comportare un incendio.

Quanto alla quarta ipotesi, circa il malfunzionamento dell'impianto elettrico del motore del macchinario, è supportata e validata dalle foto prodotte durante il sopralluogo (fi. 5.6a e fig. 5.6b), poiché da queste si può notare come il motore riporti danni maggiore rispetto al resto del macchinario.



Fig. 5.6a: a sinistra viene riportato il motore del macchinario danneggiato dall'incendio.

Fig. 5.6b: a destra si riporta la foto dei cavi in rame che hanno raggiunto il punto di fusione.

Tuttavia, risulta incerta la natura e l'origine del malfunzionamento dell'impianto elettrico: *“questa ipotesi è anche compatibile con l'arco elettrico come sorgente di innesco, ipoteticamente scatenatosi da un cortocircuito o, più genericamente, da un guasto nell'impianto elettrico del motore (invecchiamento dei materiali o deterioramento dell'isolamento): la corrente che fluisce nell'arco elettrico genera calore elevato (fino a oltre i 5000 °C) che riscalda i materiali circostanti, ionizzando ulteriormente l'aria e creando un canale conduttivo. Le particelle incandescenti proiettate dall'arco, insieme alle elevate temperature, possono incendiare materiali combustibili nelle vicinanze, dando inizio a un incendio. A conferma di questa ipotesi, dalle foto dei dettagli dei cavi in rame si nota come alcuni di questi abbiano raggiunto il punto di fusione (1085 °C), temperature più elevate di quelle che può raggiungere un incendio con il carico di incendio presente nel vano motore.*

La potenza di un arco elettrico, si manifesta con un'elevata intensità di corrente e temperature estremamente alte, raggiungendo anche i 10.000°C. Si può effettuare una stima della potenza elettrica rilasciata dall'arco elettrico, considerando che:

- *le batterie di alimentazione del motore hanno una tensione di 12 V*
- *si può ipotizzare una portata massima dei cavi di 100 A, compatibile con quella tipica di una macchina agricola*
- *se l'arco assorbe una corrente pari a 100 A, la potenza elettrica rilasciata dall'arco sarà pari a:*

$$P = 12V \times 100A = 1200 W$$

La quale è una quantità irrisoria rispetto alla potenza termica raggiunta dall'incendio (dell'ordine dei 4 - 8 MW).

Sarebbe utile capire, ai fini di una più completa analisi, se l'arco elettrico sia nato da un guasto all'impianto elettrico del motore prima dell'incendio, oppure se l'incendio sia causa diretta del guasto all'impianto elettrico e quindi dell'arco elettrico. Con gli elementi a disposizione purtroppo non è possibile confermare una delle due ipotesi.”.

Quanto all'ultima ipotesi circa l'azione intenzionale, questa risulta compatibile visto sia l'orario notturno sia l'accesso facilitato al fabbricato. Tuttavia, dalle informazioni raccolte durante il sopralluogo e dalle dichiarazioni dei dipendenti presenti al momento del sinistro, non sono emersi elementi sufficienti a sostegno di questa ipotesi.

Nell'ultima fase di discussione della validità di ciascuna ipotesi, è emerso che quella più verosimile risulta la quarta, ovvero il malfunzionamento dell'impianto elettrico del motore del carro miscelatore, poiché validata dalle foto scattate durante il sopralluogo che mostrano una fusione locale dei cavi in rame dell'impianto elettrico, segno inequivocabile di un arco elettrico. Tuttavia, come analizzato in precedenza, non è stato possibile stabilire se l'arco elettrico sia stata la causa dell'incendio, o semplicemente un effetto di quest'ultimo, visto che le temperature raggiunte durante la fusione del rame sono più elevate rispetto alle temperature raggiunte durante un incendio con il carico di incendio presente nel vano motore.

5.5.1 Possibili misure di prevenzione

Le possibili misure di prevenzione, come nel caso precedente, visto che l'ipotesi più verosimile è il malfunzionamento dell'impianto elettrico, riguardano l'implementazione di misure di protezione previste nella fase di progettazione, che siano in grado di segnalare tempestivamente il malfunzionamento dell'impianto elettrico. In questo caso, non è stato possibile individuare con certezza quando si è formato l'arco elettrico, se prima dell'incendio o a causa di quest'ultimo, ma, anche supponendo che sia stato la causa dell'incendio, è comunque complesso individuare misure di prevenzione a priori poiché questo fenomeno, come già analizzato nel paragrafo 2.3, è difficile da prevedere in quanto favorito anche dal danneggiamento dell'isolamento del cavo o da fenomeni di invecchiamento, complesse da individuare nella fase di sopralluogo visti gli ampi danni riportati.

Inoltre, durante il sopralluogo, non sono state riscontrate informazioni sufficienti a lasciare intendere che il sinistro fosse dovuto ad uno scorretto comportamento dei dipendenti, visto che il suo ultimo utilizzo è stato intorno alle 18:30 e il principio di incendio è stato notato dai dipendenti notturni intorno alle 2:30 del giorno dopo.

Di seguito, sulla base dell'ipotesi più verosimile tra quelle proposte (quella dell'arco elettrico come fonte di innesco) verranno realizzati due grafici esplicativi delle dinamiche con cui si è sviluppato l'incendio secondo la tecnica deduttiva *Causal Tree Method* (CTM) (vedi § 4.5.2). Il primo è stato realizzato ipotizzando che l'arco elettrico sia nato da un guasto all'impianto elettrico del motore prima dell'incendio (fig. 5.7a), il secondo, invece, è stato realizzato ipotizzando che l'incendio sia stato causa diretta del guasto all'impianto elettrico e quindi dell'arco elettrico (fig. 5.7b).

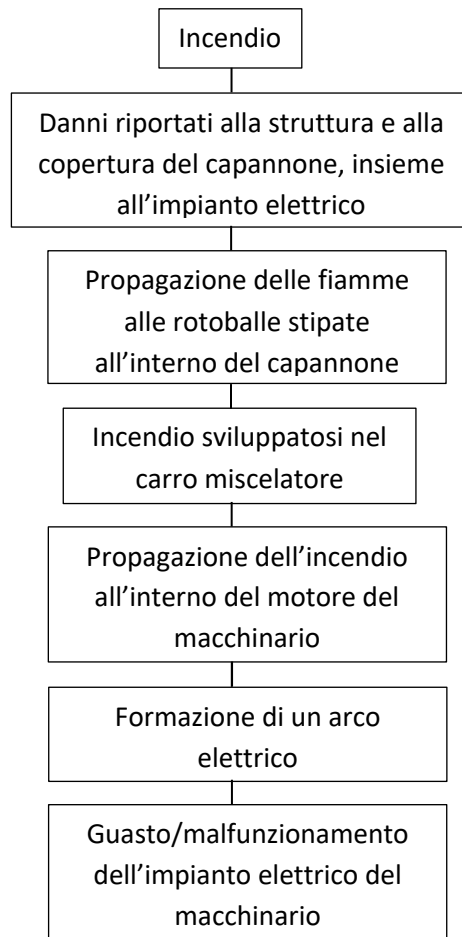


Fig. 5.7a: grafico eseguito con la tecnica CTM, esplicativo delle dinamiche con cui si è sviluppato l'incendio ipotizzando l'arco elettrico come sorgente di innesco

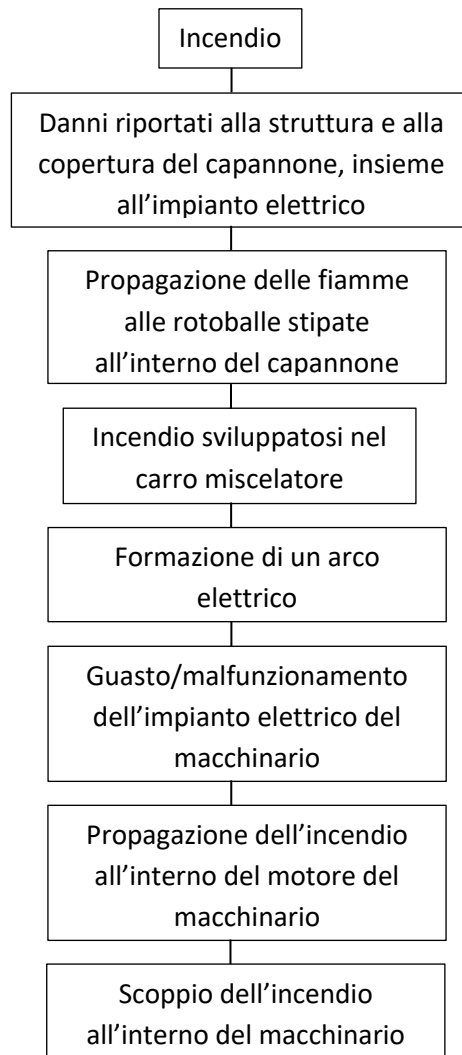


Fig. 5.7b: grafico eseguito con la tecnica CTM, esplicativo delle dinamiche con cui si è sviluppato l'incendio ipotizzando l'arco elettrico sia stato una conseguenza dell'incendio

Conclusioni

Dall'analisi svolta in questo elaborato, come ampiamente discusso in § 1.5, risulta evidente che gli incendi di origine elettrica sono molto diffusi (in Italia si stima che circa il 10% e il 20% degli incendi siano di origine elettrica). Secondo il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, solo in Italia ogni anno si verificano tra i 30.000 e i 50.000 incendi in ambienti civili. Il 20% degli incendi che si verificano sul luogo di lavoro sono di origine elettrica. L'impatto economico complessivo ogni anno si aggira attorno a 2,5 Mld di euro (Blogger & Blogger, 2024). La pericolosità dell'energia elettrica viene erroneamente di solito associata a possibili contatti accidentali con parti in tensione, quando invece, come già analizzato nel primo capitolo, gli incendi di natura elettrica dipendono da fenomeni meno visibili come sovraccarico, guasti di isolamento, scarsa connessione o arco elettrico (Bosica, 2025) e, nell'ambito residenziale, il rischio aumenta visto il contemporaneo utilizzo di più elettrodomestici. Inoltre, l'uso improprio e scorretto di un utilizzatore elettrico è una delle principali cause degli incendi di origine elettrica in ambito residenziale, insieme all'usura dei componenti elettrici: nel 2022 è scoppiato un incendio in un appartamento a New York perché una coperta elettrica era rimasta accesa per più di 12 ore, incendiando la biancheria da letto circostante (vedi § 3).

Nell'ambito lavorativo, il sistema “impianti – attrezzature”, come ampiamente analizzato nel terzo capitolo, deve essere organizzato e progettato in modo tale da gestire i fattori di rischio e dunque consentire e miglioramento continuo della salute e sicurezza del cittadino/lavoratore che li utilizza, al fine di ridurre guasti ed eventi incidentali, tenendo conto però che la sicurezza assoluta non esiste e non è raggiungibile.

Le cause degli infortuni dovuti a guasti o malfunzionamenti degli impianti possono essere ricondotte a errori di progettazione, errori di costruzione, errori di gestione e modifiche e ampliamenti non compatibile con gli impianti preesistenti (vedi § 3.2); mentre i fattori di rischio più comuni sono: impianti tecnologici non a norma o installazioni poco sicure, macchine attrezzature non conforme alle norme di sicurezza,

insufficiente manutenzione dei componenti dell'impianto e delle attrezzature ed infine comportamenti non conformi a quanto prescritto dalle norme di sicurezza.

Anche i dispositivi di protezione (fusibili, interruttori automatici o differenziali) – che hanno lo scopo di interrompere il circuito elettrico automaticamente nel caso in cui si generi una corrente di intensità tale da essere pericolosa per il circuito stesso o per le persone – possono contribuire ed influire nelle dinamiche di un evento avverso: il loro malfunzionamento (sia esso dovuto ad un cortocircuito o ad un sovraccarico) o il loro mancato intervento, (sia esso dovuto ad un fenomeno non rilevato oppure ad un guasto delle protezioni stesse) potrebbero essere causa di un incendio viste le alte temperature generate a causa di questi fenomeni (vedi § 3.3). In questo caso, Individuare i fattori e gli indici che consentono di determinare quale sia stato il fenomeno scatenante durante la fase di sopralluogo – effettuato per la redazione di una relazione post incidentale – è molto complesso e non è sempre possibile.

Inoltre, quando si verifica arco elettrico in serie, ovvero quando è coinvolto solo un conduttore, nessuno dei dispositivi installati è in grado di rilevarlo e interrompere automaticamente il circuito, poiché non si verificano delle sovracorrenti che possono attivare interruttori magnetotermici o fusibili, né circolano correnti di dispersione verso terra, che possono attivare l'interruttore differenziale (vedi § 3.7). La Nona Edizione della norma CEI 64-8 prescrive l'adozione di provvedimenti contro il rischio di guasto serie, ma non obbliga all'installazione di dispositivi che siano in grado di riconoscere e prevenire la formazione di un arco elettrico pericoloso.

L'analisi post incidentale è un processo gestionale che ha lo scopo di individuare le cause dirette e indirette di un evento incidentale, per consentire di individuare le misure tecniche e gestionali che possono essere implementate per evitare il ripetersi di tale incidente (vedi § 4.1) e, più nello specifico, l'indagine degli incendi è una disciplina scientifica forense molto ampia e multidisciplinare che comprende diversi campi accademici e investigativi. Coloro che svolgono tale professione (*fire investigators*), devono avere determinate competenze tecniche in vari settori (chimica, fisica, fluidodinamica, ecc.) oltre che essere ben formati nella raccolta e analisi dei dati.

Devono, inoltre, usare la scienza per rispondere a domande di interesse per il sistema giuridico.

È una delle scienze forensi più complicate a causa delle prove continuamente alterate, contaminate o distrutte dall'incendio stesso. Un'indagine antincendio eseguita correttamente dovrebbe determinare la causa dell'incendio, la causa dei danni materiali risultanti e, soprattutto, la causa delle lesioni personali o della perdita di vite umane tra civili e vigili del fuoco, tuttavia, essendo le prove di solito incomplete esiste una certa incertezza associata a ciascuna analisi.

Lo scopo di questo elaborato è stato, dunque, quello di individuare le cause più comuni degli incendi di origine elettrica – in ambito residenziale e lavorativo – insieme alle dinamiche con cui progrediscono e il ruolo che i dispositivi di protezione elettrica installati nei luoghi in cui si verifica l'evento possono avere nel suo sviluppo, per poi procedere ad illustrare e spiegare la metodologia investigativa con cui sono state svolte le relazioni relativi a sinistri che coinvolgono incendi (e/o esplosioni), prendendo come esempio due casi svolti durante l'attività di tirocinio, spiegandone anche i suoi limiti.

Riferimenti bibliografici

Jaime, F. A. (2011). Analisi di un modello semplificato per la dinamica degli incendi. Il Modello semplificato di Mowrer.

<https://upcommons.upc.edu/entities/publication/511c8213-9a62-4b32-8f5e-f2653fe81d07>

Compartimentazione antincendio - AF Systems. (n.d.). AF Systems: Soluzioni per La Protezione Passiva Dal Fuoco. <https://www.af-systems.com/it/compartimentazione-antincendio>

Controls, D. I. P. (n.d.). *Il Flash Point (Punto di Infiammabilità) - Mercipericolose.it - il Portale italiano sulle merci pericolose.*

<https://www.mercipericolose.it/approfondimenti-mp/varie/415-il-flash-point-punto-di-infiammabilita>

Sbarbati, S. & Sbarbati, S. (2024, March 29). *Cos'è la temperatura di autoignizione?* Le Vernici Ignifughe per Il Legno Firewall. <https://www.vernicifirewall.it/cose-la-temperatura-di-autoignizione/>

Spatola, G. (2026, March 25). Incendi di natura elettrica: cause, dinamiche e prevenzione nei luoghi di lavoro. PQA. <https://www.pqa.it/news/incendi-di-natura-elettrica-cause-prevenzione-luoghi-di-lavoro/>

NIA (Nucleo Investigativo Antincendi) del Dipartimento dei Vigili del fuoco e del soccorso nazionale, Capannelle Roma, Settembre 2017.
http://www.geosicur.it/public/allegati/GuidaVVFF_-_Incendi_di_natura_elettrica.pdf

Fire Services Department. (2008-2010). Hong Kong Fire Services Department Review 2008-2010, Hong Kong Special Administrative Region, Appendix 5.

Taipei City Fire Department (2010). Taipei City Fire Statistics Year Report (in Chinese), Taipei City Government, Taipei, Taiwan, p. 75.

Runyan, C.W. Bangdiwala, S.I. Linzer, M.A. Sacks, J.J. and Butts, J. (1992). "Risk Factors for Fatal Residential Fires," The New England Journal of Medicine, Vol. 327, No. 12, pp. 859-863.

Ducic, S. and Ghezze, H.R. (1980). "Epidemiology of Accidental Home Fires in Montreal," Accident Analysis & Prevention, Vol. 12, pp. 67-73.

Chien Chen-Wen, and Wu Guan-Yuan (2008). "The Strategies of Fire Prevention on Residential Fire in Taipei," Fire Safety Journal, 43, Vol. 1, pp. 71-76.

The Sun. (2011). “Summary of Mobile Batteries Explosion in Hong Kong” (in Chinese), http://the-sun.on.cc/cnt/news/20111027/00407_003.html.

Smith, L.E. and McCoskrie, D. (1990). “What Causes Wiring Fires in Residences,” *Fire Journal*, Vol. 84, pp. 19-24, 69 Jan/Feb.

Hall, J.R. Jr. Bukowski, R.W. and Gomberg, A. (1983). *An Analysis of Electrical Fire Investigation in Ten Cities*, National Bureau of Standards Reports NBSIR 82-2803, Gaithersburg, MD, USA.

Lee, H.M. (2012). *Review of Residential Fire due to Electric Faults*, BE-Research Project supervised by Professor W.K. Chow, Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University.

National Fire Protection Association.(2006). *Aged Electrical System Research Application Symposium*. Fire Protection Research Foundation-NFPA, Quincy MA, USA.

Smith, L.E. and McCoskrie, D. (1990). “What Causes Wiring Fires in Residences,” *Fire Journal*, Vol. 84, pp. 19-24, 69 Jan/Feb.

Gillman T.H. Le May I. (2007) “Mechanical and Electrical Failures Leading to Major Fire,” *Engineering Failure Analysis*, Vol. 14, pp. 995-1018.

Lam, H.Y. (2011). “Investigation of Residential Electrical Design” (in Chinese), *China New Technologies and Product*, No. 11, pp. 162.

Yang, K. Zhang, R. Yang, J. Liu, C. Chen, S. & Zhang, F. (2016). A novel arc fault detector for early detection of electrical fires. *Sensors*, 16(4), 500. <https://doi.org/10.3390/s16040500>

United States Fire Administration National Fire Data Center. Residential building fires (2011–2013). *Top. Fire Rep. Ser.* 2015, 16, 1–15. [[Google Scholar](#)]

Tleis N. (2009). *Power System Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*, Elsevier India.

H.M. Lee, W.K. Chow e H.Y. Hung, (2016). A Study on Residential Fires due to Electrical Faults in Hong Kong
<https://www.phrc.psu.edu/assets/docs/Publications/2016RBDCCPapers/Lee-2016-RBDCC.pdf>

Casciaro, V. (2017). *Dispositivi Per Il Rivelamento Dell'arco Elettrico* [Tesi Di Laurea Triennale, Università Degli Studi Di Palermo].

Babrauskas V. (2003). *Ignition Handbook : Principles and Applications to Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management and Forensic Science*, Issaquah, Wash. : Fire Science Publishers : Society of Fire Protection Engineers.

Babrauskas V. (2009). “Research on Electrical Fires, The States of the Art” *Fire Safety Science - Proceedings of the Ninth International Symposium*, pp. 3-18.

Siemens. (2018, July 13). *Come proteggi il tuo impianto dai guasti da arco in serie?* Voltimum. <https://www.voltimum.it/notizie/siemens/come-proteggere-impianto-guasto-arco-serie>

Li, Y. (2010.) “Investigation of Building Electrical Fire Control System(i”n Chinese), MYKJ, Vol. 10, pp. 305.

Wong, W.M. (2011). “Investigation of Applied Electrical Fire Control System”(in Chinese), *Fire Technology and Product Message*, Vol. 6, pp. 44-46.

Ricketts, M. (2020). “The Case of the OVERLOADED ELECTRICAL CIRCUIT”, *Professional Safety* , JANUARY 2020, Vol. 65, No. 1 (JANUARY 2020), pp. 52-56, 63 Published by: American Society of Safety Professionals (ASSP)

Tremblay, K. (2014). “Woman Dies in Electrical Fire”, *NFPA Journal*, 108(4), 30.

Gosland, L. (1956). “Age and the Incidence of Fires in Electrical Installation Proceedings IEE, Vol. 103A, pp. 271-284.

Li, G. Guo, J. Kang, Y. Huang, Q. Zhao, J. & Liu, C. (2025). Classification and Prevention of Electrical Fires: A Comprehensive review. *Fire*, 8(4), 154. <https://doi.org/10.3390/fire8040154>

Wiki, C. T. M. (n.d.). *Soviet submarine K-278 Komsomolets*. Military Wiki. https://military-history.fandom.com/wiki/Soviet_submarine_K-278_Komsomolets

Staff, I. (2022, January 11). What We Know About the Deadly Bronx Apartment-Building Fire. *Intelligencer*. <https://nymag.com/intelligencer/2022/01/bronx-apartment-building-fire-kills-at-least-19-updates.html>

Fire Services Department. (2008-2010). Hong Kong Fire Services Department Review 2008-2010, Hong Kong Special Administrative Region, Appendix 5.

Natasi V. (2020). “La sicurezza negli impianti”, ed. VI.

Shelby Hall, Novembre 2025. Fire Loss in the United States [EB/OL]: <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/nfpa-research/fire-statistical-reports/fire-loss-in-the-united-states?os=httpswww.google.com&ref=app>.

Prevenzione E Sicurezza | Descrizione del rischio. (n.d.). Prevenzione E Sicurezza.
https://www.inail.it/portale/prevenzione-e-sicurezza/it/come-fare-per/conoscere-il-rischio/rischio-elettrico/descrizione-del-rischio.html?utm_source=chatgpt.com

Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro. (2018). *Gli incendi di origine elettrica.*

Calvas R. (1999). “Residual current devices in LV”. Edizione aggiornata a febbraio 1999.
https://download.schneider-electric.com/files?p_File_Id=905251744&p_File_Name=ECT114.pdf&p_Reference=ECT114&p_enDocType=Cahier+Technique&utm_source=chatgpt.com

Lezioni del Prof. Bignucolo F., corso di “Sicurezza dei sistemi elettrici”, Università di Padova, anno accademico 2024/2025

Carrescia V. (2008). “Fondamenti di sicurezza elettrica”, edizione aggiornata a settembre 2008.

Varalda, A. (2022, April 2). *L'esperto: risponde Impianti a Livelli*. ElettricoMagazine.
<https://elettromagazine.it/normative-impianti/esperto-risponde-impianti-a-livelli-afdd/>

Lezioni della Prof.ssa Vianello C., corso di “Analisi post incidentale: metodologie e casi studio”, Università di Padova, anno accademico 2024/2025.

Favarin, L. tesi di laurea magistrale, *Analisi post-incidentale applicata a caso studio aziendale nel settore metalmeccanico della Provincia di Vicenza*, anno accademico 2021/2022.

Bills, K. Costello, L. & Cattani, M. (2023). Barry Turner: the Under-Acknowledged Safety Pioneer. *Safety*, 9(4), 68. <https://doi.org/10.3390/safety9040068>

Pierlot, 2007, fattori organizzativi patogeni non trovo il testo di riferimento per citarlo

Villemeur, A. 1991. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessement Volume I Methods and Techniques. ISBN 0 471 93048 2, Chichester, UK.

Hendrick K. And Benner Jr. 1987. Investigating Accidents with S-T-E-P. New York: Marcel Dekker.

Vesely W.E. et al. 1981, Fault Tree Handbook, NUREG-0492. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1989, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Assessment, New York: American Institute of Chemical Engineers. Pp. 509-518

DOE, 1999. Conducting Accident Investigations DOE Workbook, Revision 2, May 1, 1999, U.S. Department of Energy, Washington D.C, USA.

Svenson O. 1991. AEB Analysis of Incidents and Accidents in the Processing Industries. In Apostolakis G.E. (Ed.). Probabilistic Safety Assessment and Management. New York: Elsevier. Pp.271-276.

Svenson O. 1991. The Accident Evolution and Barrier Function (AEB) Model Applied to Incident Analysis in the Processing Industries. *Risk Analysis: An International Journal*, 11(3): 499-507.

Suokas J. 1981. "Experiences of Work Safety Analysis", SCRATCH Seminar 7. Methods for Risk and Safety Analysis, NORDFORSK, Stockholm, Sweden.

Suokas J. and Rouhiainen, 1984. Work Safety Analysis. Method Description and User's Guide, Research Reports No. 314. Espoo, Finland: Technical Research Centre of Finland.

Suokas J., 1988. The Role of Safety Analysis in Accident Prevention. *Accident Analysis & Prevention*, 20(1): 67-

DOE, 1997. Implementation Guide For Use With DOE Order 225.1A, Accident Investigations, DOE G 225.1A-1 November 26, 1997/Rev. 1, U.S. Department of Energy, Washington D.C, USA.

DOE, 1999. Conducting Accident Investigations DOE Workbook, Revision 2, May 1, 1999, U.S. Department of Energy, Washington D.C, USA.

Sklet S., Methods for accident investigation, NTU 2002

Lentini, J. J., Gennaio 2019, *Fire Investigation: Historical Perspective and Recent Developments*

Admin. (2025, April 10). *NFPA 921: il riferimento internazionale per l'analisi delle cause di incendi ed esplosioni*. Corbo Rosso Corporation. <https://www.crcorporation.it/nfpa-921-il-riferimento-internazionale-per-lanalisi-delle-cause-di-incendi-ed-esplosioni/>

Brannigan FL, Bright RG, Jason NH: Fire Investigation Handbook (NBS Handbook 134); National Bureau of Standards: Washington, DC; 1980.

Houck M., Siegel J., 2006, Fundamentals of Forensic Science. Elsevier, Massachusetts (USA).

Taroni F., Aitken C., Garbolino P., Biedermann A., 2006, Bayesian Networks and Probabilistic inference in Forensic Science (Statistics in Practice). Wiley, Chichester (UK).

Biedermann A., Taroni F., Delemont O., Semadeni C., Davison A., 2004, The evaluation of evidence in the forensic investigation of fire incidents (Part I): an approach using Bayesian networks. Forensic Science International 147:49–57.

Taroni F., Bozza S., Aitken C., 2005, Decision analysis in forensic science. J Forensic Sci 50(4):894–905.

Taroni F., Bozzo S., Aitken C., Garbolino P., Biedermann A., 2010, Data Analysis in Forensic Science: A Bayesian Decision Perspective. Wiley, Chichester (UK).

Gorbett, G. E. Meacham, B. J. Wood, C. B. & Dembsey, N. A. (2015). Use of damage in fire investigation: a review of fire patterns analysis, research and future direction. Fire Science Reviews, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40038-015-0008-4>

NFPA (1992) NFPA 921-Guide for Fire and Explosion Investigation. National Fire Protection Association, Quincy (USA).

NFPA (2001) NFPA 921-Guide for Fire and Explosion Investigation. National Fire Protection Association, Quincy (USA).

NFPA (2002) Recommendations of the Research Advisory Council on Post-fire Analysis – A White Paper. Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA.

NFPA (2004) NFPA 921-Guide for Fire and Explosion Investigation. National Fire Protection Association, Quincy (USA).

NFPA (2008) NFPA 921-Guide for Fire and Explosion Investigation. National Fire Protection Association, Quincy (USA).

NFPA (2014) NFPA 921-Guide for Fire and Explosion Investigations. National Fire Protection Association, Quincy (USA).

Svare, M., (2023). Forensic examination of Post-Fire damaged electrical conductors by using X-Ray radiographs. *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*, 40(1). <https://doi.org/10.51501/jotnafe.v40i1.845>

Rethoret H., (1945) Fire Investigations. Recording and Statistical Corporation, Canada.

Straeter R., Crawford C (1955) Techniques of Arson Investigation. Self-published, California (USA).

Kennedy J (1959) Fire and Arson Investigating. Investigations Institute, Illinois (USA).

Kirk P., (1969) Fire Investigation. Wiley, California (USA).

Zinno, A. 25 novembre 2025. *Studio e sviluppo di algoritmi innovativi per l'identificazione dell'ARC FAULT adatti per l'implementazione su dispositivi innovativi di misura per impianti elettrici domestici ed industriali.* <https://tesidottorato.depositolegale.it/handle/20.500.14242/310347>

National Fire Protection Association, 921 Guide for Fire and Explosion Investigations. NFPA, Quincy, MA, USA, 2021.

Babrauskas, V., 2018, "Arc mapping: a critical review," Fire Technology, vol. 54, no. 3, pp. 749-780.

Icove D., May T. R., 2021, "State of the arc (mapping)," Journal of the National Academy of Forensic Engineers, vol. 38, no. 1, pp. 63-75.

McPherson J., 2022, "FE Use of Arc Mapping / Arc Fault Circuit Analysis in a Residential Kitchen Fire Investigation," Journal of the National Academy of Forensic Engineers, vol. 39, no. 1.

Lezioni della Prof. Bertolazzi A., corso di "Scienza e Tecnica per la Prevenzione Incendi", Università di Padova, anno accademico 2024/2025.

Bosica. (2025, April 15). *Incendi di origine elettrica: quali sono le cause?* Bosica - Sicurezza Sul Lavoro E Antincendio. <https://bosica.it/sicurezza-e-antincendio/incendi-di-origine-elettrica-quali-sono-le-cause/?srsltid=AfmBOorC7Nj-jU4Ukd20bTIQZTK5JY2jQXHs67F1y7nfIPwy0qCtXtji>

Blogger, G., & Blogger, G. (2024, March 20). *Sicurezza elettrica: 5 consigli per evitare gli incendi di natura elettrica in ambito commerciale e industriale*. Schneider Electric Blog. <https://blog.se.com/it/gestione-dell-energia/2022/07/01/sicurezza-elettrica-5-consigli/>