

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Energetica



Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino (Italy)

Tel. +39.011.564.4464 Fax +39.011.564.4499 email: zucchetti@polito.it

Prof. Ing. Massimo Zucchetti

Cattedra di Sicurezza e Analisi di Rischio

APPUNTI DI SICUREZZA E ANALISI DI RISCHIO

MASSIMO ZUCCHETTI

Anno Accademico 2004/2005

CAPITOLO I

STABILITA' DEI SISTEMI CHIMICI

1.1 Generalità

All'interno dell'industria la maggior parte degli incendi è causata dal comportamento anomalo o incontrollato di alcune sostanze chimiche. Per esempio è possibile che due o più sostanze si incontrino per dar luogo ad una miscela esplosiva, oppure che una singola sostanza, inizialmente in condizioni non pericolose, modifichi, per qualche ragione, i valori delle sue variabili di stato e diventi quindi a rischio.

I rischi¹ specifici delle singole situazioni sono strettamente connessi:

- alle caratteristiche delle sostanze coinvolte (reagenti, prodotti, sottoprodotti, impurezze), ovvero: stabilità termodinamica, infiammabilità, possibilità di dar luogo a miscele esplodibili, ad esplosioni termiche o ad incendi, tossicità;
- alle caratteristiche delle reazioni coinvolte o potenziali: esotermicità ed incrementi adiabatici della temperatura dei sistemi, con possibili aumenti anomali della pressione;
- ad altri fattori, quali: inneschi accidentali di miscele esplodibili, resistenze dei materiali e delle strutture, assetto degli impianti, ecc.

Le principali cause ultime di incidenti gravi e di situazioni di alto rischio nell'industria chimica sono le seguenti:

⇒ Esplosioni e scoppi dovuti a:

- * sostanze esplosive o comunque termodinamicamente instabili;
- * miscele esplodibili;
- * reazioni esotermiche note, ma incontrollate;
- * reazioni esotermiche ignote, incontrollate;
- * sovrapressioni accidentali e implosioni;
- * esplosioni fisiche;
- * cedimento di materiali e strutture.

⇒ Incendi

⇒ Rilasci di sostanze altamente tossiche.

E' importante vedere, dalla tabella successiva, quali ed in quale misura siano state le cause principali di incidenti:

Errori di progettazione o di realizzazione	15,5%
Scelte errate dei materiali	8,5%
Errori di calcolo	1,0%
Errori di montaggio	6,0%
Esplosioni o shock termici	7,5%
Cattivo funzionamento di sistemi di allarme, di protezione o di impianti elettrici; manutenzione carente	9,5%
Procedure operative non corrette	6,0%
Errori umani	32,0%

¹ Il termine "rischio", per il concetto probabilistico che introduce è da distinguere da quello di "pericolo", associato invece ad una concezione di tipo deterministico della sicurezza.

Cause tecniche varie (disservizi, strumenti di controllo, sovrappressioni, caricamenti eccessivi, vuoto)	26,0%
Eventi esterni	3,5%

Per meglio interpretare le informazioni sopra scritte è necessario riportare alcune definizioni:

ESPLOSIONE: rilascio di energia in un tempo relativamente breve, con generazione di onda esplosiva. E' dovuto a:

reazione chimica;
 brusco e notevole abbassamento di pressione in sistema gassoso o liquido (con conseguente vaporizzazione);
 rapida ebollizione di un liquido.

SCOPPIO: dovuto a cedimento strutturale di contenitori in pressione.

DEFLAGRAZIONE: esplosione con velocità di propagazione < 330 m/s.

DETONAZIONE: esplosione con velocità di propagazione dell'ordine delle migliaia di m/s.

Considerando i danni causati da un'onda d'urto di un'esplosione, è possibile risalire alla sovrappressione e quindi all'energia liberatasi in seguito all'esplosione stessa. Dalla successiva tabella è possibile analizzare questo fenomeno:

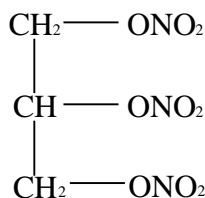
Sovrappressione in aria (kPa) ²	Danno
0,2 - 6	Rottura di vetri
1	Rottura di vetri (valore tipico)
3 - 15	Danni a edifici
15 - 20	Distruzione di muri e mattoni
20 - 30	Cedimento di serbatoi per combustibili liquidi
30 - 70	Distruzione totale di edifici
35	Rottura di timpani
35	Abbattimento di pali di legno
50 - 60	Rovesciamento di vagoni ferroviari carichi
70	Danni letali ai polmoni

² 1 kPa = 0,01 Kg/cm²

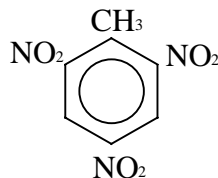
1.2 Sostanze esplosive

Le sostanze esplosive sono composti termodinamicamente instabili, cioè basta una piccola variazione del loro stato fisico perchè si trasformino.

Le più comuni sono i nitro-derivati, ossia composti che hanno la presenza del gruppo ossidante NO_2 , come per esempio la nitroglicerina e il trinitrotoluene (TNT).



Nitroglicerina

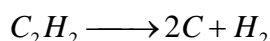


Trinitrotoluene (TNT)

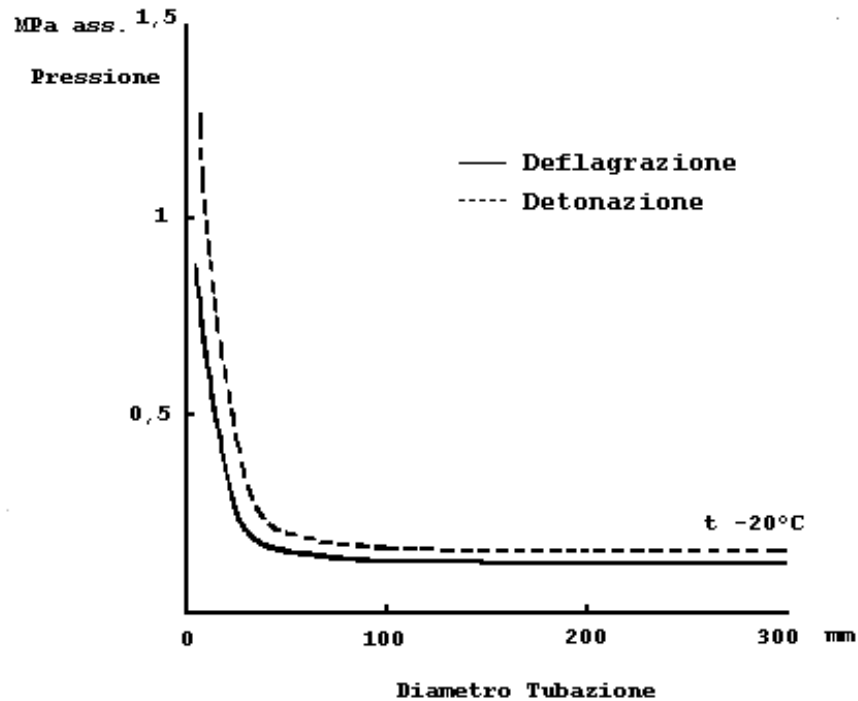
Questi esplosivi sono composti da una parte organica (carbonio e idrogeno) che, ossidandosi nelle condizioni di esplosività, produce anidride carbonica e acqua e liberano una grande quantità di energia. Se all'interno della molecola è presente anche dell'ossigeno, l'ossidazione a CO_2 e H_2O è maggiormente favorita. Inoltre bisogna evidenziare che anche l'ossigeno contenuto nell'aria interviene nell'ossidazione, seppure in minima parte.

Per ottenere i nitro-derivati si esegue una reazione di nitrurazione sul composto (es. si parte dal benzene per ottenere il toluene che a sua volta viene nitrato completamente per ottenere il trinitrotoluene). Il termine "completamente" è stato evidenziato poichè è possibile nitrare solo parzialmente un composto, il quale, in questo modo, non assume l'etichetta di "esplosivo" (es. il mononitrotoluene e il dinitrotoluene non sono degli esplosivi). Si può quindi affermare, in linea del tutto generale, che un composto può essere o meno un esplosivo a seconda del suo grado di nitrurazione, che viene identificato come tenore di azoto presente (come nitrogruppo) nella molecola.

Esistono poi delle sostanze che non sono classificate come esplosivi, ma possono esplodere se si trovano in certe condizioni: una di queste è l'Acetilene. Esso è termodinamicamente instabile, non è un esplosivo. Si decompone in carbonio e idrogeno sviluppando una grande quantità di calore. La reazione è la seguente:



Come si può notare, essendo C un solido, la reazione avviene senza aumento di volume, ossia si parte da una mole gassosa di acetilene e si ottiene una mole gassosa di idrogeno. Nel caso dell'ossidazione del TNT, invece, da una mole di TNT ossidata si ottengono svariate moli di anidride carbonica e di acqua (oltre che ossidi di azoto), la reazione avviene con aumento di volume: questo dà origine all'esplosione ($4\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3 + 33\text{O}_2 \longrightarrow 28\text{CO}_2 + 10\text{H}_2\text{O} + 12\text{NO}_2$). Nel caso dell'acetilene quello che si ha è solo un grosso aumento di temperatura, poichè l'energia liberata è notevole, ma se l'acetilene si trova in un recipiente chiuso, l'aumento di temperatura interna al recipiente stesso provoca un aumento di volume e quindi si ha lo stesso effetto "meccanico" esplosivo del TNT. Questo tipo di ragionamento vale per tutte le sostanze simili all'acetilene, tanto che sono stati effettuati degli studi su questi tipi di sostanze all'interno di tubazioni, che, come risultato, hanno dato il grafico seguente:



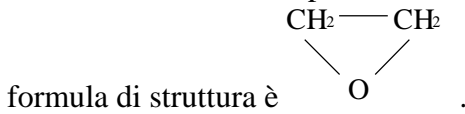
Da esso si può comprendere come per diametri di tubazioni superiori a circa 100 mm la pressione limite al di sotto della quale non si ha deflagrazione è circa 0,15 MPa mentre il valore limite al di sotto del quale non si ha detonazione è circa 0,2 MPa. Per diametri inferiori a 100 mm il livello limite di pressione cresce. La spiegazione di questo fenomeno è di tipo chimico: le reazioni esplosive sono di tipo radicalico, cioè iniziano con la formazione di determinate molecole, chiamate appunto “radicali”, che hanno la possibilità di legarsi ad altre molecole presenti per il fatto che hanno elettroni disponibili a creare legami chimici. La formazione di questi radicali è detta fase di iniziazione (o attivazione), e richiede apporto di energia dall'esterno. Una volta formati questi radicali, la reazione prosegue con la formazione di ulteriori radicali generati dalla reazione dei primi con molecole non radicaliche. Questo stadio si chiama fase di propagazione. Quando la concentrazione di radicali presenti comincia a diventare elevata, ha inizio il terzo ed ultimo stadio detto fase di terminazione, in cui coppie di radicali si ricombinano tra loro dando origine a molecole non radicaliche. Questa fase libera energia verso l'esterno. Se questa energia viene asportata, si rendono difficoltose ulteriori fasi di attivazione e di propagazione: la parete della tubazione, vista come luogo contro cui avvengono le ricombinazioni radicaliche, è in grado di assorbire, e quindi asportare, questa energia. Minore è il diametro della tubazione, maggiore sarà il rapporto superficie/volume e quindi saranno più favorite le reazioni di terminazione. Siccome la velocità di propagazione di una reazione radicalica è funzione diretta della concentrazione dei radicali, se questi sono in piccole quantità, si avranno velocità piuttosto basse, e quindi è possibile operare a pressioni più elevate (si ricorda che un aumento di pressione in un recipiente chiuso provoca un aumento di temperatura che a sua volta provoca un aumento di energia cinetica delle molecole e quindi della loro velocità).

Il meccanismo citato vale per tutte le reazioni di tipo radicalico, non solo per quelle esplosive, ma queste ultime hanno una fase di propagazione con diramazione, nel senso che si formano anche radicali di tipo diverso da quelli di partenza. Ciò contribuisce ad aumentare notevolmente la velocità di reazione.

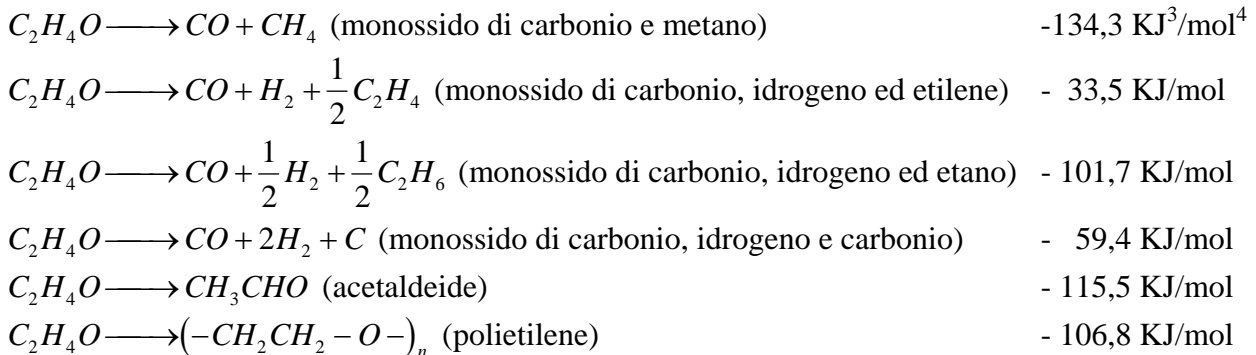
Si può raggiungere lo stesso risultato, per quanto riguarda la ricombinazione dei radicali, aggiungendo all'acetilene (o ad un altro gas simile) un gas inerte, le cui molecole siano in grado di

asportare l'energia formatasi dalla ricombinazione dei radicali stessi. Questo procedimento viene utilizzato per trattare composti instabili, come l'acetilene, anche a pressioni elevate.

Un'altra sostanza che potrebbe creare qualche problema di stabilità è l'ossido di etilene, la cui



Esso si può decomporre in vari modi

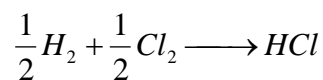


ognuno dei quali sviluppa una certa quantità di calore (riportato a fianco di ciascuna reazione). I valori delle quantità di calore sono molto significativi per quanto riguarda la temperatura finale di un sistema dopo la decomposizione: conoscendo, infatti, il valore del calore Q di reazione, la massa m di composto che interessa la trasformazione ed il calore specifico c_p dello stesso composto, è possibile calcolare la temperatura al termine della trasformazione con la seguente relazione:

$$\Delta T_{ad} = \frac{Q}{m \cdot c_p}$$

in cui ΔT_{ad} indica la differenza tra la temperatura finale e quella iniziale nell'ipotesi di adiabaticità, ossia di non asportazione del calore. E' lecito fare questa ipotesi nel caso di reazioni esplosive in quanto il fenomeno è talmente rapido che non si ha il tempo necessario per asportare il calore prodotto.

Un esempio di applicazione della precedente formula potrebbe essere la reazione di formazione dell'acido cloridrico a partire dagli elementi:



Il calore sviluppato da questa reazione vale 22.500 cal/mol, il calore specifico c_p vale $7/2 R^5$, quindi supponendo di avere una sola mole si ha:

³ 1 Kcal = 4,1868 KJ.

⁴ La "mole" è una grandezza chimica che indica una quantità di sostanza. Più precisamente una mole contiene $6,023 \times 10^{23}$ ($N = 6,023 \times 10^{23}$ è il numero di Avogadro) molecole di un certo gas. La differenza tra una mole di un gas ed una mole di un altro gas è il peso di quella mole. Per esempio nel caso dell'azoto una mole di N_2 pesa 28 g, mentre per l'ossigeno una mole di O_2 pesa 32 g, poichè questi sono i pesi molecolari rispettivamente di azoto e ossigeno molecolari. La definizione di mole è analoga a quella di "dozzina".

⁵ R è la costante universale dei gas che assume i seguenti valori a seconda delle unità di misura utilizzate:

$$R = 0,082 \frac{\text{l} \cdot \text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$$

$$R = 1,98 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$$

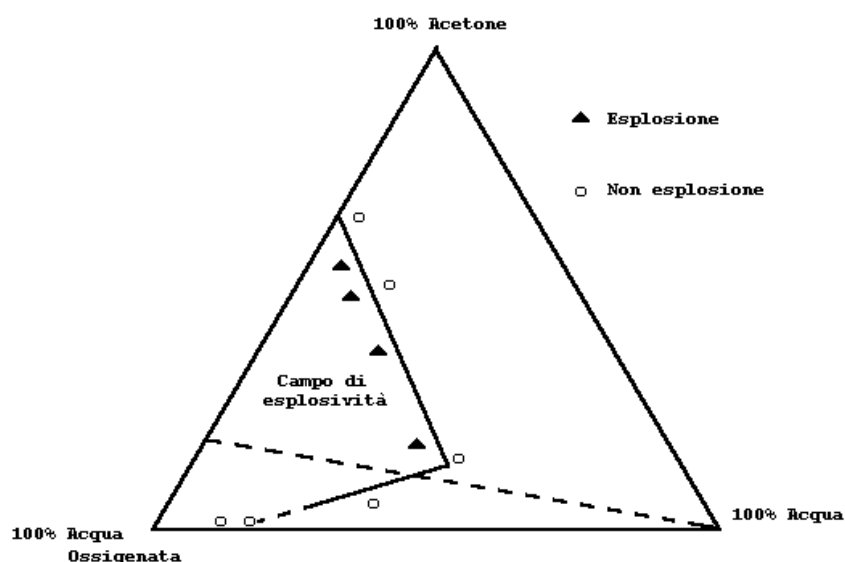
$$\Delta T_{ad} = \frac{22.500}{1 \cdot \frac{7}{2} \cdot 1,98} \cong 3.250^{\circ} C$$

In un sistema chiuso, conoscendo il ΔT_{ad} e la pressione iniziale, con l'ausilio della legge dei gas perfetti $PV = nRT$, si può conoscere la pressione finale a cui si porta il sistema a causa dell'aumento di temperatura. Poichè volume V e numero di moli n rimangono costanti per tutto il periodo della trasformazione (essendo il sistema chiuso), la legge di gas perfetti diventa $\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$,

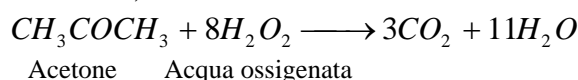
da cui si ricava l'incognita P_2 . Per la reazione dell'esempio, che in genere si esegue a circa $1000^{\circ} C$, col suo ΔT_{ad} arriverebbe a circa $4000^{\circ} C$, cioè 4 volte la temperatura iniziale. Allora anche la pressione finale sarà 4 volte quella iniziale.

Le esplosioni causate dalle reazioni di decomposizione dell'ossido di etilene sono definite esplosioni termiche, in quanto il fenomeno dipende, oltre che dalla velocità di reazione, anche dalla capacità del sistema di smaltire il calore di reazione. Se questo smaltimento viene effettuato in tempi sufficientemente brevi, ecco che si avrebbe la trasformazione senza effetti negativi aggiuntivi. Purtroppo, però, si è visto che già con recipienti dell'ordine del metro cubo di volume si hanno difficoltà di smaltimento, quindi ancora peggiore è la situazione a livello industriale.

In conclusione, è doveroso fare un cenno ai cosiddetti diagrammi ternari, ossia diagrammi triangolari ai cui vertici vengono indicate le tre sostanze componenti la miscela (esplosiva in determinate condizioni) e sui lati del quale sono indicate le percentuali (in volume, in peso o molari).



Ogni punto interno a questo triangolo rappresenta una miscela con una determinata composizione. All'interno della regione delimitata dalla linea continua (nell'esempio viene riportata la miscela acqua - acqua ossigenata - acetone) c'è la zona di esplosività. La linea tratteggiata rappresenta invece la stechiometria della reazione, cioè



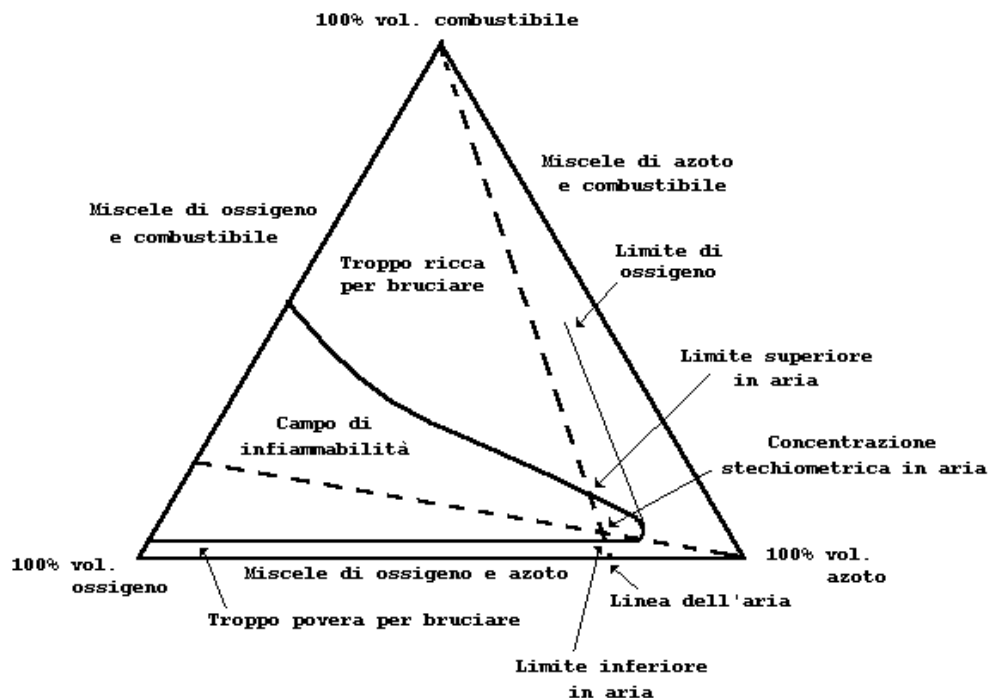
Questo tipo di diagramma è fondamentale per lavorare in sicurezza, poichè indica quali sono le condizioni operative da adottare per rimanere al di fuori della zona delimitata dalla linea continua.

1.3 Miscele esplosibili

Una miscela si definisce esplosibile quando è composta da un comburente (aria, ossigeno, ozono, cloro, fluoro, perossidi organici, ecc.) e da un combustibile (idrogeno, ossido di carbonio, idrocarburi, ammoniaca, polveri di carbone o di materiale organico, polveri metalliche, ecc.) che, in presenza di un adeguato innesco, dà luogo ad una esplosione.

Fissate le condizioni di temperatura e pressione, per ogni composto esistono dei limiti inferiori e superiori di esplosibilità. All'aumentare della temperatura l'intervallo si allarga.

Come esempio si può vedere il diagramma ternario azoto - ossigeno - combustibile.



Unendo il punto di rappresentazione dell'aria (circa 79% azoto e 21% ossigeno) con il vertice relativo al combustibile puro, si ha una linea che rappresenta tutte le possibili concentrazioni di combustibile in aria. Tale linea taglia la curva di delimitazione del campo di infiammabilità in due punti che sono i limiti superiore ed inferiore di infiammabilità in aria. Cambiando la composizione ossigeno - azoto, cambia la posizione della linea, descrivendo un'area (area di infiammabilità) che si allarga andando verso miscele più ricche in ossigeno. Come conseguenza si ha che anche i limiti superiore ed inferiore variano, racchiudendo valori sempre maggiori. Si vede che in realtà il limite inferiore cambia poco al contrario del limite superiore. Se si opera in contenuti di azoto superiori a quello dell'aria, ci si sposta verso destra rispetto alla linea dell'aria. Il punto di tangenza tra la linea che indica la composizione O₂-N₂ e la linea che delimita il campo di infiammabilità, punto in cui i limiti superiore ed inferiore di infiammabilità coincidono, determina il valore minimo di azoto al di sotto del quale si può avere infiammabilità. Quindi operare in eccesso di azoto (cioè inertizzando

l'ambiente operativo) significa non dover mai incontrare il campo di infiammabilità per qualunque valore della percentuale di combustibile (questo significa lavorare in sicurezza attiva).

Per quanto riguarda le condizioni di sicurezza, è necessario fare attenzione a determinate caratteristiche in cui può trovarsi il fluido: punto di infiammabilità e temperatura di autoaccensione. Il punto di infiammabilità (flash point) è la minima temperatura a cui può bruciare una miscela aria-vapore (che sovrasta un liquido) qualora ci sia un adeguato innesco. Chiaramente il vapore emesso da un liquido deve formare, con l'aria, una miscela infiammabile. La temperatura di autoaccensione è, invece, la minima temperatura alla quale una miscela combustibile-comburente si accende in modo spontaneo, in assenza cioè di innesco. Poichè questo dato non ha un valore assoluto, in quanto dipende in misura sensibile dalle condizioni operative, il suo utilizzo ai fini della sicurezza richiede molta cautela.

Si è visto precedentemente che la decomposizione di sostanze termodinamicamente instabili e l'accensione di miscele esplodibili presuppongono una temperatura sufficientemente elevata oppure l'azione di un innesco. In entrambi i casi è richiesto un apporto di energia. Quando l'energia è fornita ad una zona ristretta del sistema il fenomeno si innesta localmente per poi propagarsi più o meno rapidamente a seconda delle sostanze. Per quanto riguarda i composti termodinamicamente instabili si è visto che questi resistono senza incendiarsi a pressioni tanto più alte quanto più basse sono le temperature operative (i valori dipendono chiaramente dalla sostanza considerata), mentre per quanto riguarda le miscele esplodibili, da studi effettuati è emerso che per una data miscela l'energia di innesco presenta un minimo, detto *energia minima di innesco*, che varia con la composizione.

Esclusivamente a titolo indicativo, si riconoscono sostanze che non si incendiano in seguito a scintille dovute a percossa o ad urto, poichè l'energia emessa in queste condizioni è inferiore all'energia minima di accensione degli stessi materiali:

Acetaldeide	Ammoniaca	Etano	Etere etilico	Alcool etilico	Acetone
Benzina	Benzene	n-butano	Cicloesano	n-eptano	Metano
Metanolo	n-pentano	Propano	Toluene	Vinilacetato	

Le principali cause di innesco sono:

- Fiamme libere
- Superfici calde
- Scintille da attrito o urto
- Scariche atmosferiche
- Scariche elettriche
- Scariche elettrostatiche
- Impulsi di pressione

1.4 Esplosione di nubi non confinate

Quando si ha a che fare con esplosioni dovute a gas o liquidi infiammabili, magari sotto pressione, è possibile trovarsi di fronte a due tipi di eventi catastrofici: il fire-ball (sfera di fuoco) e l'UVCE (*Unconfined Vapour Cloud Explosion*, cioè esplosione di nube di vapore non confinata). Il fire-ball si verifica quando le condizioni di rilascio non consentono il premiscelamento della nube con l'aria circostante. La combustione riguarda inizialmente la parte periferica della nube, quindi una modesta quantità rispetto al totale, per poi propagarsi verso l'interno. Tale fenomeno dà origine ad una palla di fuoco che si eleva dal terreno trascinando con sé detriti e rottami che poi ricadono verso il suolo anche a grandi distanze dall'esplosione stessa. L'energia in gioco viene rilasciata in tempi molto brevi (dell'ordine di 1/10 di secondo).

Le caratteristiche della palla di fuoco sono valutabili con le seguenti formule empiriche:

$$D = 3,86 \cdot M^{0,333}$$

$$\tau = 0,299 \cdot M^{0,333}$$

dove D è il diametro espresso in metri, M è il peso di combustibile in Kg e τ è la durata della sfera espressa in secondi.

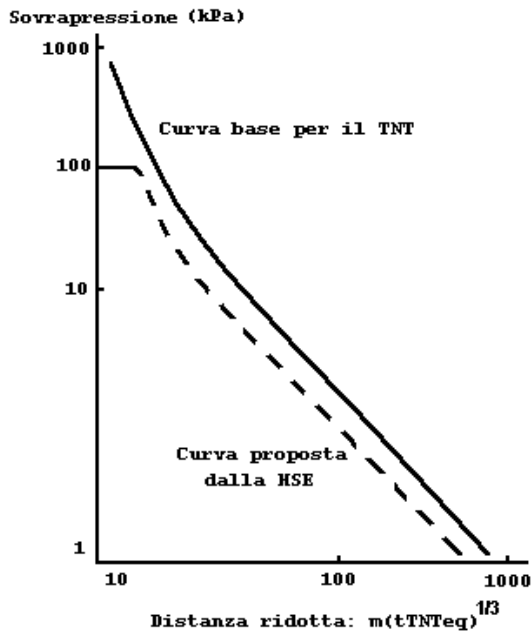
La conseguenza peggiore di una fire-ball è la capacità di produrre un forte irraggiamento termico tale da provocare gravi ustioni (anche mortali) e da innescare ulteriori combustioni anche a distanze maggiori rispetto agli incendi convenzionali. L'unico vantaggio, se così si può chiamare, è che tutta l'energia è rilasciata sotto forma di energia termica, quindi il fenomeno non è accompagnato da effetti di sovrappressione.

L'esplosione UVCE si verifica, invece, quando una nube è interessata da premiscelazione con aria, ed il suo innesco è ritardato. In tal caso il fenomeno è accompagnato da sovrappressione (circa il 60% dell'energia termica si trasforma in energia cinetica, producendo velocità di fiamma anche dell'ordine dei 100 m/s).

Le conseguenze di una UVCE sono calcolabili col metodo "*TNT equivalente*". La massa equivalente di TNT si calcola come:

$$M_{TNT} = \frac{M \cdot Q \cdot r}{4690}$$

dove M_{TNT} è la massa di TNT equivalente espressa in Kg; M è la massa in Kg di sostanza presente nella nube; Q è il calore di combustione di un Kg di sostanza, espresso in KJ; 4690 KJ è l'energia liberata dall'esplosione di 1 Kg di TNT; r è il fattore di resa. Di seguito viene riportato un grafico che indica l'andamento della sovrappressione prodotta dall'esplosione in funzione della distanza ridotta (cioè la radice cubica del rapporto tra la distanza in metri dall'epicentro dell'esplosione (m) e il peso di TNT equivalente espresso in tonnellate (t_{TNTeq})) (HSE = Health and Safety Executive).



Qualora si abbiano quantità rilevanti di liquido che vaporizzano istantaneamente per ebollizione con conseguente brusco aumento di volume si parla di “esplosioni fisiche”. E’ noto il fenomeno del BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*), in cui l’onda di pressione che si genera è paragonabile a quella provocata da un esplosivo. Il tipico caso di BLEVE è la rottura di recipienti in pressione contenenti, per esempio, GPL, metano, etilene, propano, ammoniaca, cloro, anidride solforosa, anidride carbonica, ecc.

Se come conseguenze di un BLEVE si ha rilascio di una sostanza infiammabile, tale fenomeno può essere accompagnato da fire-balls o da pool-fires, cioè incendi “galleggianti” causati da liquidi infiammabili (e loro nubi di vapori) adagiati su uno strato d’acqua.

Ai fini della sicurezza è necessario prestare attenzione al fatto che alcune sostanze, per il semplice fatto di venire in contatto tra loro, possono dare luogo a reazioni spontanee altamente esotermiche, a sviluppo di gas tossici o infiammabili o alla formazione di prodotti termodinamicamente instabili. Sarebbe difficile elencare tutte le possibilità in cui possa accadere una situazione simile, ma conoscenze di tipo chimico possono aiutare a prevedere il comportamento di alcune sostanze in base alla loro classe di appartenenza. A pagina seguente è riportata la cosiddetta tabella delle incompatibilità tra le sostanze, da cui è possibile prevedere alcune situazioni.

Gravi conseguenze si possono avere anche per il solo contatto tra alcune sostanze, con caratteristiche che dipendono dalla concentrazione delle sostanze stesse, dalla modalità con cui queste vengono a contatto e dalle quantità in gioco. Esistono, però, casi in cui l’effetto è ritardato rispetto all’inizio del fenomeno. Un esempio è l’interazione tra un acido forte ed un metallo, che dà origine ad un lento sviluppo di idrogeno. Se, nel tempo, questo idrogeno si accumula in qualche apparecchiatura od in qualche luogo chiuso, è prevedibile la formazione di una miscela esplosiva con l’aria, suscettibile di essere poi innescata accidentalmente.

Classi di sostanze incompatibili	Evento dannoso
Acidi-Basi. Acidi forti-Acqua. Anidridi (SO ₃ , P ₂ O ₅ , anidride acetica, ecc.), PCl ₅ , PCl ₃ , POCl ₃ -Acqua.	Reazioni fortemente esotermiche, con proiezione o sviluppo di sostanze aggressive e scoppio di apparecchiature.
Ossidanti energici (H ₂ O ₂ , perossidi, O ₃ , O ₂ liquido, permanganati, acido ipocloroso e suoi sali, cloriti alcalini, ClO ₂ , clorati, acido nitrico, N ₂ O ₄)-Sostanze facilmente ossidabili, quali diversi composti organici.	Reazioni fortemente esotermiche: esplosione o incendio.
Acido nitrico o ossido di azoto-Ammoniaca, fosforo, o talune sostanze organiche (alcooli, cellulosa, glicoli, composti insaturi, aromatici, grassi vegetali o animali).	Reazioni fortemente esotermiche, formazione di prodotti (nitroderivati) termodinamicamente instabili: esplosione o incendio.
Composti metallorganici e idruri (alluminio alchili, litio alluminio idruro, ecc.)-Aria, acqua e alcoli.	Reazioni fortemente esotermiche: incendio, esplosione.
Metalli, solfuri metallici ed altre sostanze piroforiche, sottoforma di polveri o di particelle ad elevata area superficiale-Aria, alogeni o solventi alogenati.	Reazioni fortemente esotermiche: incendio, esplosione.
Alluminio-Taluni composti organici fluorurati o clorurati; Titanio-Cloro anidro.	Reazioni fortemente esotermiche: incendio, esplosione.
Solventi alogenati-Ammine, chetoni	Reazioni fortemente esotermiche: incendio, esplosione.
Acidi forti-Polveri metalliche. Metalli alcalini o alcalino terrosi-Acqua. Alluminio-Soda caustica.	Sviluppo istantaneo di idrogeno e formazione con l'aria di miscela tonante: esplosione.
Acqua ossigenata, perossidi, ozonuri-Ioni metallici, batteri, enzimi, diverse sostanze organiche.	Decomposizione anche esplosiva; sviluppo di O ₂ e possibilità di formazione di miscele esplodibili con vapori di sostanze organiche, incendio.
Acidi forti-Sali di acidi deboli volatili e tossici (cianuri, solfuri, solfiti, ecc.).	Sviluppo di gas tossici.
Zolfo-Acqua a 100÷600 °C.	Sviluppo di H ₂ S e SO ₂ .
Metalli fusi o sali fusi-Acqua.	Ebollizione istantanea: esplosione fisica.

Esiste una particolare classe di composti che, data la loro struttura molecolare, se vengono a contatto con l'aria, possono condurre, anche in tempi lunghi, alla formazione di prodotti instabili: queste sostanze vengono chiamate perossidabili. L'ossigeno presente nell'aria è in grado di reagire con queste sostanze per formare dei perossidi (composti aventi il legame -O-O-). Se queste sostanze vengono stoccate per lungo tempo, è possibile che ci sia la formazione di perossidi. In caso di incendio o esplosione bisogna quindi intervenire sapendo con che tipo di sostanza bisogna trattare.

Di seguito viene riportata una tabella in cui si possono vedere i gruppi perossidabili.

$\begin{array}{c} \\ -\text{C}-\text{O}- \\ \\ \text{H} \end{array}$	Acetali, eteri, eterocicli ossigenati
$\begin{array}{c} -\text{CH}_2 \diagdown \\ -\text{CH}_2 \diagup \text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array}$	Derivati isopropilici, decaidronaftalina
$\begin{array}{c} \diagdown \text{C}=\text{C}-\text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array}$	Derivati alilici
$\begin{array}{c} \diagdown \text{C}=\text{C}-\text{X} \\ \\ \text{H} \end{array}$	Alcoali
$\begin{array}{c} \diagdown \text{C}=\text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array}$	Derivati vinilici
$\begin{array}{c} \diagdown \text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{C} \diagdown \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Dieni
$\begin{array}{c} \diagdown \text{C}=\text{C}-\text{C}\equiv\text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array}$	Vinilacetileni
$\begin{array}{c} \diagdown \text{C}=\text{C}-\text{Ar} \\ \\ \text{H} \end{array}$	Cumeni, tetraidronaftalina, stirene
$\begin{array}{c} -\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{O} \end{array}$	Aldeidi
$\begin{array}{c} -\text{C}-\text{N}-\text{C} \diagup \\ \quad \quad \\ \text{O} \quad \quad \text{H} \end{array}$	N'-Alchilammidi o N'-alchilurea, lattami

CAPITOLO II

NOCIVITÀ DELLE SOSTANZE CHIMICHE

2.1 Generalità

Un argomento fondamentale per quanto riguarda l'utilizzo delle sostanze chimiche, è l'effetto che queste possono avere nei riguardi dell'essere umano. Nei confronti di un organismo vivente, le sostanze chimiche possono essere suddivise nel seguente modo:

- asfissianti semplici (N₂, CO₂, H₂, gas rari, idrocarburi leggeri);
- ustionanti (o corrosive) (composti acidi o caustici);
- allergiche;
- genericamente nocive;
- genericamente tossiche;
- mutagene (alterazione del DNA delle cellule germinali di un individuo, che porta a variazioni ereditarie);
- teratogene (danno specifico dell'embrione, che porta a malformazioni nel corso dello sviluppo);
- cancerogene (trasformazione di cellule normali in cellule tumorali).

Secondo una classificazione ufficiale italiana, i prodotti chimici si distinguono in:

- ⇒ **altamente tossici e tossici**: prodotti che per inalazione, ingestione o penetrazione cutanea, possono comportare rischi gravi, acuti o cronici ed anche la morte;
- ⇒ **nocivi**: prodotti che per inalazione, ingestione o penetrazione cutanea possono comportare rischi di gravità limitata;
- ⇒ **corrosivi**: prodotti che, a contatto con i tessuti vivi, possono esercitare su di essi un'azione distruttiva;
- ⇒ **irritanti**: prodotti non corrosivi il cui contatto immediato, prolungato o ripetuto con la pelle o con le mucose, può provocare una reazione infiammatoria.

Per meglio operare in condizioni di sicurezza con alcune sostanze chimiche, è necessario effettuare un'indagine epidemiologica, ossia determinare le correlazioni esistenti tra esposizione ad una data sostanza e danni subiti da una popolazione. Questo tipo di indagine, però, richiede molto tempo, in quanto deve tener conto di numerosi fattori, alcuni dei quali richiedono periodi lunghi per pervenire a risultati attendibili. Indagini tossicologiche vengono, invece, effettuate più velocemente in laboratorio (in tossicologia esiste una netta distinzione tra effetto tossico e rischio: il primo è determinato dalle proprietà intrinseche della sostanza, il secondo è legato alle sue condizioni di utilizzo). Esse consistono nella somministrazione di sostanze su animali da laboratorio (ratti, topi, pesci, criceti, ecc.) ed analisi del loro comportamento in seguito a tale somministrazione. Da questi esperimenti si creano le schede di caratterizzazione tossicologica dei vari prodotti, in cui viene riportato il valore di DL₅₀ (Dose Letale per il 50% della popolazione analizzata) ed il valore del CL₅₀ (Concentrazione Letale, nell'aria, di vapori tossici che provoca la morte del 50% della popolazione analizzata). I valori di DL₅₀ e di CL₅₀ sono espressi in mg/Kg di peso corporeo o in µg/Kg di peso corporeo.

In tabella seguente è riportato un esempio per la diossina:

Animale	DL ₅₀ µg/Kg di peso corporeo
Cavia	1
Ratto	22 - 45
Scimmia	<70
Topo	114 - 120
Coniglio	115
Criceto	5000

Una normativa CEE recepita dalla legislazione italiana ha introdotto una specifica classificazione delle sostanze tossiche:

Sostanze molto tossiche

- * sostanze con DL₅₀ (orale) ≤ 5 mg/Kg corporeo;
- * sostanze con 5 < DL₅₀ (orale) ≤ 25 mg/Kg di peso corporeo, che, date le loro proprietà fisiche e chimiche, possono comportare rischi di incidenti rilevanti analoghi a quelli provocati dalle sostanze con DL₅₀ ≤ 5 mg/Kg di peso corporeo.

Sostanze tossiche

- * sostanze con 25 < DL₅₀ (orale) ≤ 200 mg/Kg di peso corporeo e che hanno proprietà tali da poter comportare rischi di incidenti rilevanti.

Moderatamente tossiche

- * sostanze con 500 < DL₅₀ < 5000;

Debolmente tossiche

- * sostanze con 5000 < DL₅₀ < 15000;

Praticamente non tossiche

- * sostanze con DL₅₀ > 15000.

Esiste anche una grandezza chiamata **IDLH** (*Immediately Dangerous to Life and Health*, cioè Pericolo Immediato per la Vita e la Salute), che rappresenta la massima concentrazione che un lavoratore può sopportare per 30 minuti prima di subire danni irreversibili. In altre parole è il livello di concentrazione da cui è possibile fuggire. Chiaramente il rischio aumenta al diminuire dell'IDLH. Tale indice è definito come il rapporto tra la concentrazione pericolosa per esposizioni brevi (CP) e la capacità della sostanza a diffondersi nell'ambiente (V):

$$IDLH = \frac{CP}{V}$$

dove:

$$CP = \frac{CL_{50}}{10} \text{ o } \frac{DL_{50}}{100}, \text{ espressi rispettivamente in mg/l e in mg/Kg;}$$

$$V = \frac{G}{Q} \text{ in cui:}$$

G = quantità evaporata nell'unità di tempo per unità di superficie;

Q = quantità di liquido rilasciato;

per i gas e per i solidi (allo stato di polvere) si assume $V = 1$; per i liquidi V è il rapporto tra la massa evaporata nell'unità di tempo e per unità di superficie evaporata e la quantità sparsa; per un liquido in aria stagnante si applica la relazione:

$$G = 3.78 \cdot 10^{-4} \cdot M^{2/3} \frac{AP}{RT}$$

dove:

M = peso molecolare;

A = superficie della pozza in cm^2 ;

P = tensione di vapore in mmHg;

T = temperatura assoluta;

R = costante dei gas.

Un altro indice della tossicità di una sostanza è il **TLV** (*Threshold Limit Value*, cioè Valore Limite Soglia). Esso prevede tre categorie limiti, di particolare interesse per i lavoratori:

- **TLV-TWA** (*Time Weight Average*, cioè Media Ponderata nel Tempo), rappresenta la concentrazione media ponderata nel tempo per una giornata lavorativa di 8 ore e per 40 ore settimanali a cui quasi tutti i soggetti possono essere esposti ripetutamente, giorno dopo giorno, senza effetti negativi.
- **TLV-STEL** (*Short Time Exposition Level*, cioè Limite per Breve Tempo di Esposizione), è la concentrazione a cui quasi tutti i soggetti possono essere esposti continuativamente per un breve periodo di tempo senza che insorgano:
 - ◊ irritazioni;
 - ◊ alterazione cronica o irreversibile del tessuto;
 - ◊ narcosi di intensità sufficiente ad accrescere la probabilità di infortuni o di menomare le capacità dell'individuo.
- **TLV-C** (*Ceiling*, cioè letteralmente "soffitto"), è la concentrazione che non deve essere superata neppure istantaneamente.

Quando due o più sostanze nocive sono presenti contemporaneamente si devono prendere in considerazione gli effetti combinati piuttosto che quelli dei singoli componenti. In generale gli effetti sono da ritenersi additivi, per cui la sommatoria $\sum_i \left(\frac{C_i}{T_i} \right)$ (dove C_i e T_i rappresentano rispettivamente la concentrazione e il TLV della sostanza i) non deve superare l'unità.

CAPITOLO III

GRANDI RISCHI POTENZIALI

3.1 Generalità

Come è già stato evidenziato precedentemente, gli incidenti rilevanti, all'interno di stabilimenti industriali, possono derivare da:

- sostanze tossiche, gassose, volatili, o comunque disperse su ampie zone di territorio a seguito di incidenti;
- gas e vapori infiammabili e, in misura più limitata, liquidi o solidi infiammabili;
- esplosivi.

L'entità del rischio e delle relative conseguenze di un incidente sono ovviamente legate alle quantità in gioco e dipendono dalle caratteristiche tossicologiche delle sostanze interessate. Per questa sua importanza e complessità, la problematica relativa ai rischi di incidenti rilevanti connessi con le attività dell'industria chimica è stata presa in considerazione dalla CEE, che ha emanato una Direttiva, nota come direttiva Seveso, recepita poi in Italia con un D.P.R. (n° 175/88) successivamente modificato e integrato. Il D.P.R. 175/88 raggruppa le attività a seconda della natura e dei quantitativi delle sostanze presenti in depositi o in impianti. In tabella seguente sono riportati i depositi separati di sostanze, come previsto dal D.P.R. 175/88 (Allegato II del D.P.R.):

Sostanze o categorie di sostanze	Quantità (t) ≥	
	Ai fini della applicazione dell'art. 6 (dichiarazione)	Ai fini della applicazione dell'art. 4 (notifica)
Gas infiammabili ⁶	50	300
Liquidi facilmente infiammabili ⁷	10.000	100.000
Acilonitrile	350	5.000
Ammoniaca	60	600
Cloro	10	75
Biossido di zolfo	20	500
Nitrato d'ammonio ⁸	350	2.500
Nitrato d'ammonio sottoforma di fertilizzante ⁹	1.250	10.000
Clorato di sodio	25	250
Ossigeno liquido	200	2.000
Triossido di zolfo	15	100

⁶ Sostanze che, allo stato gassoso a pressione normale e mescolate con aria, diventano infiammabili ed il cui punto di ebollizione è ≤ 20°C alla pressione normale.

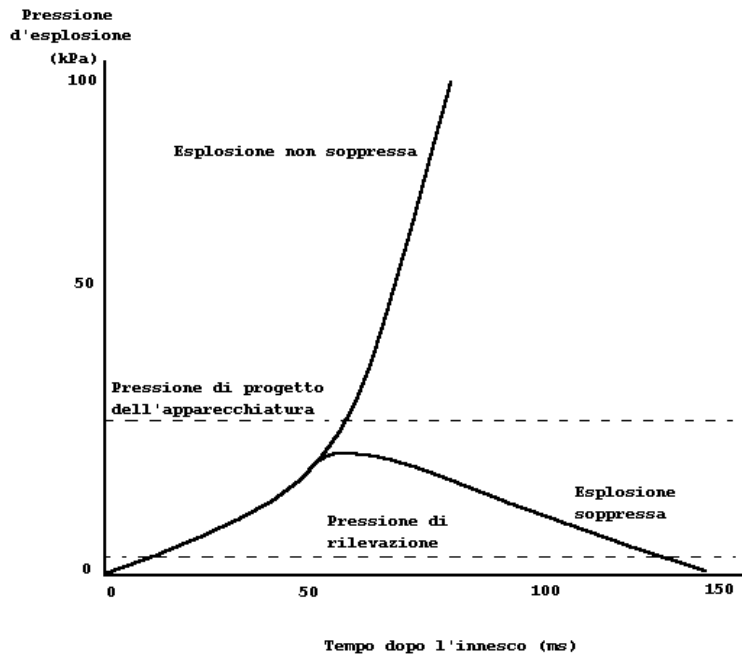
⁷ Sostanze che hanno un punto di infiammabilità al di sotto di 21°C e un punto d'ebollizione, a pressione costante, al di sopra di 20°C.

⁸ Include sia il nitrato d'ammonio e i miscugli di nitrato d'ammonio, in cui il contenuto d'azoto derivato dal nitrato d'ammonio è superiore al 28% in peso, sia le soluzioni acquose di nitrato d'ammonio in cui la concentrazione di nitrato d'ammonio è superiore al 90% in peso.

⁹ Si applica ai fertilizzanti di nitrato d'ammonio che sono conformi alla direttiva 80/876/CEE e ai fertilizzanti composti in cui il contenuto di azoto derivato dal nitrato d'ammonio è superiore al 28% in peso (un fertilizzante composto contiene nitrato d'ammonio insieme a fosfati e/o potassa).

3.2 Protezione dagli incendi e loro prevenzione

Alla luce di quanto visto nei paragrafi precedenti, ci si chiede se è possibile cercare di prevenire un incendio dal suo verificarsi, quando si ha a che fare con apparecchiature all'interno di uno stabilimento industriale. La risposta è affermativa. Con la tecnologia esistente al giorno d'oggi è possibile rilevare le condizioni operative del sistema in tempi abbastanza veloci e quindi agire di conseguenza. Di seguito è riportato un grafico che mostra l'andamento della pressione di esplosione (in kPa) in funzione del tempo (ms) dopo l'innesco:



Rilevando la pressione in queste frazioni di secondo, è possibile comandare in modo automatico l'immissione di "qualcosa" nel sistema. Questo qualcosa potrebbe essere un "soppressore" di esplosione, come ad esempio azoto, acqua, polveri, ecc. L'aspetto importante di questa fase è quello elettronico-meccanico. E' un intervento di tipo "passivo", cioè un intervento che ha inizio dopo la partenza dell'esplosione, ma prima che questa si manifesti.

CAPITOLO IV

L'ANALISI DEL RISCHIO

4.1 Generalità

L'analisi del rischio è, in realtà, uno degli strumenti che compongono l'analisi di sicurezza, necessaria alla progettazione di un impianto. Essa non viene effettuata solamente per creare un rapporto di sicurezza, ma per garantire un corretto funzionamento dell'impianto stesso.

Il problema fondamentale che una società costruttrice di impianti deve porsi, è che tali impianti siano progettati "BENE"; in questo modo si garantisce che la possibilità di rischio ambientale sia ridotto e che l'impianto stesso produca maggior quantitativi di prodotto (aumento della disponibilità operativa). Il progettare "BENE" un impianto, però, è un compito abbastanza mal definito, nel senso che non esiste una linea di livello oltre il quale si possa dire che l'impianto sia totalmente sicuro. In più è necessario controllare che il livello di sicurezza voluto sia stato effettivamente raggiunto. Per fare ciò, è necessario riferirsi a degli standard di ingegneria di progettazione di un certo livello e poi sono necessarie delle attività di integrazione chiamate *safety management*, cioè delle operazioni che rivedono tutto il progetto e le interazioni tra le parti dello stesso, per poi dire se l'impianto è stato progettato ad hoc.

Gli obiettivi dell'attività di management della sicurezza sono:

- assicurare una presa di coscienza dei problemi di sicurezza da parte dei progettisti;
- assicurare il raggiungimento del livello di sicurezza desiderato;
- assicurare una riduzione del rischio.

All'interno delle grandi società di ingegneria esiste una "funzione sicurezza e affidabilità" che ha lo scopo di valutare e fornire garanzie sul livello di sicurezza e sul livello di operabilità/funzionalità/produzione di un sistema/impianto. Tale funzione comprende sia la sicurezza che l'affidabilità per due motivi: in primo luogo vengono usate le stesse metodologie di analisi, poi, per definire la sicurezza è spesso necessario passare attraverso l'affidabilità di alcuni componenti dell'impianto in esame.

La valutazione di sicurezza e affidabilità viene eseguita:

- a livello di sistema/impianto **integrato** (vengono analizzate le compatibilità, dal punto di vista della sicurezza, dei vari componenti che formano l'impianto);
- in condizioni operative e **condizioni incidentali** (considerando l'area e l'ambiente in cui l'impianto deve essere collocato).

Poichè le condizioni incidentali sono fenomeni probabilistici è necessario studiarli con metodologie che permettano un'analisi statistica dei fenomeni. Un esempio è la cosiddetta **RISK ANALYSIS**. Una sua definizione può essere la seguente:

analisi che tende ad ottenere una indicazione del rischio associato ad un determinato sistema, impianto o insediamento industriale e basata sulla valutazione combinata delle probabilità di accadimento di determinati eventi di interesse e delle conseguenze sanitarie (per uomo e ambiente), operative e produttive che ne derivano.

Utilizzare la risk analysis per determinare le condizioni di sicurezza non significa definire completamente il problema: infatti è necessario specificare con quali strumenti viene effettuata la risk analysis. Questo punto è da chiarire immediatamente prima di iniziare lo studio di sicurezza di un impianto. Si fa quello che si chiama Piano di Sicurezza, che consiste essenzialmente in due documenti: il primo riguarda i criteri generali di sicurezza che l'impianto deve avere, il secondo è il

“programma di controllo rischi”, che dettaglia gli studi di sicurezza e affidabilità che bisogna effettuare per quell'impianto. Il dettaglio arriva fino a specificare le tipologie di analisi, le metodologie di analisi, quando vanno fatte ed i criteri di accettabilità per quell'impianto, cioè definisce la struttura e il target dell'analisi di sicurezza e operabilità dell'impianto.

4.2 Analisi di rischio

E' una raccolta ed elaborazione sistematica e documentata di informazioni fatta per prendere delle decisioni. Il parametro decisionale è il **rischio**, visto come combinazione di probabilità di accadimento e conseguenze associate. Il rischio è una funzione della probabilità di accadimento di un evento non desiderato e delle conseguenze associate a tale evento. I passi da effettuare per intraprendere questa analisi sono:

- identificazione degli eventi incidentali;
- valutazione della frequenza attesa di accadimento;
- valutazione delle conseguenze associate;
- identificazione della “funzione” di rischio più opportuna e relativi criteri di accettabilità;
- processo decisionale (misure per ridurre le frequenze e/o le conseguenze degli eventi incidentali).

L'**analisi di sicurezza** è un'analisi di rischio in cui la valutazione delle conseguenze riguarda l'uomo e l'ambiente.

L'**analisi di affidabilità** è un'analisi di rischio le cui conseguenze sono valutate in relazione all'operabilità e produttività dell'impianto.

Quindi sia l'analisi di sicurezza sia quella di affidabilità fanno capo alla stessa metodologia: quella dell'analisi del rischio.

La seguente tabella riassume le tipologie di analisi ed il rischio ad esse connesso:

Analisi di affidabilità/disponibilità	rischio operativo/produttivo
Analisi di sicurezza	Rischio sanitario (+ rischio amministrativo)
Analisi di rischio globale	Rischio d'impresa (sanitario, amministrativo, economico, imprenditoriale).

La seguente tabella riassume, invece, le tipologie di analisi ed il campo di applicazione delle decisioni:

Analisi di Sicurezza (Analisi di Rischio “Sanitario”)	Impatto sanitario Modifiche/adequamenti impiantistici Modifiche/adequamenti gestionali Rischio d'area
Analisi di Affidabilità (Analisi di Rischio “Operativo”)	Operatività impianto Down time (periodo di non funzionamento) Politiche manutentive Modifiche/adequamenti
Analisi di Rischio “ad Indici”	Definizione priorità Prospettiva delle problematiche Decisioni generiche

Si prenda ora in analisi l'identificazione degli eventi incidentali. Vi sono varie modalità per affrontare il problema: si può far riferimento a dei dati storici presenti su banche dati, in modo tale da conoscere il comportamento di apparecchiature già note; è possibile utilizzare delle *check list* (liste di controllo), che dettagliano la composizione delle apparecchiature e suggeriscono, in base a tale dato, se l'apparecchiatura è idonea o meno per una determinata applicazione. Lo svantaggio di utilizzare le liste di controllo è che queste sono predisposte per applicazioni e componenti standard, quindi se esiste la necessità di considerare un'applicazione specifica fuori dal comune, la lista di controllo è di poco ausilio.

Quando vi sia la necessità di analizzare specifiche applicazioni, si usano altre metodologie, quali:

- HAZOP (*HAZard and OPerability analysis*)
- ANALISI DI OPERABILITA'
- FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*)

Le prime due metodologie sembrano equivalenti, ma in realtà sono soltanto simili: l'hazop (inglese) nasce per prima e fa riferimento ad una determinata procedura; l'analisi di operabilità (italiana) è nata come completamento dell'hazop. Nella sua procedura, infatti, sono presenti i medesimi step dell'hazop in unione con altri che meglio specificano le condizioni di processo. Nell'hazop esiste una procedura di questo tipo

- ⇒ Parola guida
- ⇒ Deviazione
- ⇒ Possibile causa che ha creato la deviazione
- ⇒ Conseguenze della deviazione
- ⇒ Azione da intraprendere

che serve soprattutto per fare delle revisioni di sicurezza degli schemi di processo: si valutano i P & I e si decide quali azioni intraprendere.

Nell'analisi di operabilità, oltre agli step precedenti, ne sono stati inseriti altri relativi alle segnalazioni e le protezioni previste per certe deviazioni. Queste informazioni servono a correlare le deviazioni con il mancato intervento delle protezioni, servono, cioè, a costruire il cosiddetto "Albero dei Guasti". E' da notare, però, che questa procedura di scrittura dell'analisi di operabilità, per avere le informazioni che permettano la stesura dell'albero dei guasti, non è codificata in alcun modo, si tratta solo di un possibile *modus operandi*. Al contrario, l'hazop, è una procedura ben definita. Al termine di questo capitolo viene riportato un esempio di modulo per l'hazop (inglese) ed uno per l'analisi di operabilità (italiano). Per effettuare un'analisi hazop sono necessarie le seguenti informazioni:

- Obiettivi del progetto
- Descrizione del processo
- Diagrammi P & I
- Specifiche tecniche delle apparecchiature
- Filosofia dello start-up, dello shut-down, del blowdown, ecc.
- Aspetti ambientali
- Lay-out dell'impianto
- Norme, leggi e regolamenti

Inoltre, per un buon risultato dell'analisi deve esserci un team, un leader che sia esperto in questo campo, che quindi abbia la facoltà di prendere delle decisioni in merito alle deviazioni e alle protezioni, alcune sessioni di studio e di analisi ed un report finale. Tutto viene diretto dal leader del team che prende il nome di *Hazop Chairman*. L'analisi hazop può essere effettuata quando lo si ritiene più opportuno: nella fase concettuale, a livello di PFD (*Process Flow Diagram*), sui P & I a vari livelli (prima edizione, revisione intermedia e revisione finale), sul modello, sulla costruzione. In generale si effettua sui P & I a livello iniziale e finale.

La FMEA è invece un tipo di analisi che considera il modo di guasto dei componenti. Essa consiste in:

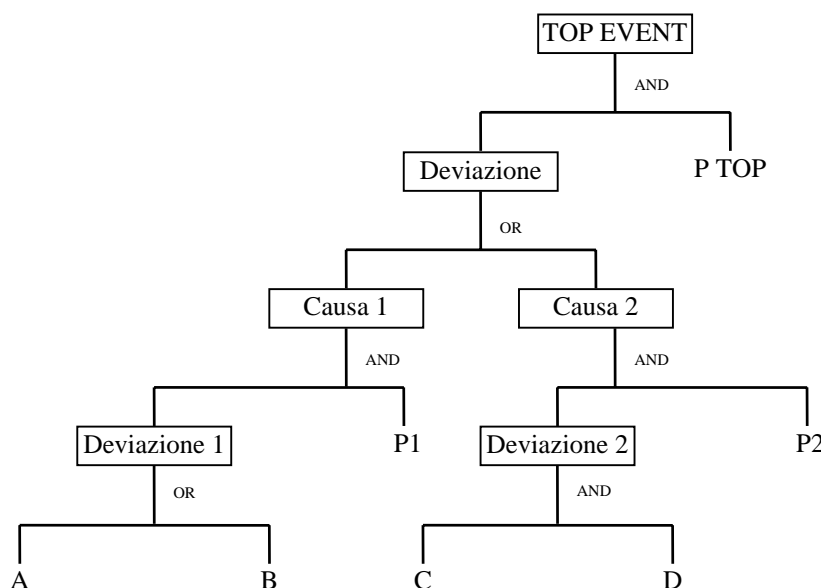
- Identificazione dei componenti
- Determinazione modi di guasto di ciascun componente
- Determinazione, per ciascun modo di guasto, degli effetti su altri componenti e sul sistema
- Stima delle conseguenze di ciascun guasto
- Altre caratteristiche come modalità di rilevazione, modalità di ripristino, ecc.

4.3 Frequenze di accadimento

Per la determinazione delle frequenze di accadimento è possibile ricorrere a vari metodi:

- esperienza, si considera il fatto che, per un lungo periodo di tempo, una certa macchina non abbia mai avuto malfunzionamenti, quindi è rara l'occorrenza;
- banche dati, da cui è possibile avere determinate informazioni riguardo all'apparecchiatura in esame;
- tecniche ad hoc, come:
 - ⇒ *Fault tree analysis* (analisi ad albero dei guasti), che rappresenta un tentativo di modellare il funzionamento di un impianto secondo un vero e proprio "albero". Si parte dalle conseguenze (*Top Event*) per poi arrivare alle cause che hanno determinato tali conseguenze.
 - ⇒ *Event tree analysis* (analisi ad albero degli eventi), che risulta simile alla *Fault tree analysis* tranne per il fatto che si parte dagli eventi iniziatori per determinare il *Top Event*. Esso è più aderente alla realtà, poichè segue il processo logico del verificarsi di un fenomeno incidentale. Sarebbe quindi più adatto rispetto al precedente, se non fosse che non sono così facilmente disponibili informazioni e codici di calcolo adatti a risolverlo come nel caso dell'albero dei guasti. Per questa ragione l'analisi frequentistica nei rapporti di sicurezza fa sempre riferimento alla *fault tree analysis*.

Di seguito viene riportato un esempio schematico di albero dei guasti, definibile come rappresentazione grafica delle relazioni logiche fra gli eventi che, verificandosi, possono dar luogo al TOP EVENT.



Come si può notare dal diagramma, l'utilizzo degli operatori AND e OR dell'algebra di Boole, permette di far comprendere come il top event possa accadere se si verificasse l'occorrenza contemporanea di una deviazione e il mancato funzionamento della protezione. La deviazione, a sua volta, può accadere se si verificasse una sola di eventuali cause possibili. Ciascuna causa, analogamente al top event, può aver luogo se si hanno contemporaneamente delle deviazioni e delle mancate protezioni. Chiaramente è possibile estendere l'albero fino a comprendere ogni singolo particolare dell'impianto da analizzare.

I parametri affidabilistici, necessari per correlare gli eventi iniziatori di un dato fenomeno con le protezioni da inserirsi per limitare i danni del fenomeno stesso, sono di tre tipi:

per quanto riguarda gli eventi iniziatori si ha il **rateo di guasto** (λ), che indica il numero di guasti nell'unità di tempo, ricavabile dalle banche dati; inoltre esiste il **rateo di manutenzione** (μ), che indica il tempo impiegato per ripristinare un dato componente.

Per quanto riguarda le protezioni è necessario il rapporto λ/μ , ma anche l'**intervallo di test** (θ), cioè l'intervallo di tempo che passa tra due test successivi, necessario per identificare se un'apparecchiatura di emergenza funziona bene (p.e. il guasto di una pompa in continuo è facilmente identificabile, poichè essa smette di lavorare, invece il guasto di una seconda pompa, messa per condizioni di emergenza, che quindi lavora solo quando la prima non è in funzione, non è immediatamente identificabile poichè essa è ferma).

Una volta identificato l'evento incidentale e le frequenze di accadimento, bisogna fare l'analisi delle conseguenze. Si può dare la seguente definizione: l'analisi delle conseguenze è quella parte dell'analisi di rischio che valuta gli effetti fisici dei fenomeni di rilascio legati al verificarsi di eventi incidentali. La valutazione delle conseguenze è una cosa abbastanza complessa, in quanto i fenomeni incidentali possono essere molteplici. Si possono avere casi di rilascio di energia termica, di energia barica o di sostanze tossiche. Per ognuno dei casi bisogna avere a disposizione strumenti che permettano di ricavare le conseguenze che, rispettivamente, provocano irraggiamento, sovrappressioni e "missili" (cioè oggetti scagliati in aria a grande velocità), e concentrazioni di sostanze pericolose. Tutto ciò non è però sufficiente, poichè sono necessari altri tipi di strumenti che rilevino gli effetti di queste conseguenze su persone, ambiente e strutture. Per quest'ultimo stadio sono utilizzabili i cosiddetti modelli di vulnerabilità.

Questi tipi di analisi, affinché siano efficaci, vengono effettuati con l'ausilio di codici di calcolo. Ne esistono un gran numero a causa della varietà di avvenimenti che possono accadere e del gran numero di sostanze che possono coinvolgere.

4.4 La matrice di rischio

Le valutazioni effettuate finora servivano per verificare se un determinato impianto fosse ben progettato o meno. Ma per arrivare a delle conclusioni, cioè al processo decisionale, è necessario avere dei criteri di accettabilità. Per esempio, uno strumento semplice di combinare le probabilità con le conseguenze e quindi di dare una risposta al processo decisionale è la **matrice di rischio**. In un piano cartesiano ortogonale X-Y, vengono rappresentate in ascisse la severità delle conseguenze e in ordinate le frequenze di accadimento. Ogni situazione è quindi identificata da un punto nel piano. Il piano è poi diviso in tre zone, una delle quali (scura) rappresenta un alto rischio poichè individuata da alti valori di frequenza ed alti valori di conseguenze; una zona potenzialmente consentita (chiara) poichè individuata da bassi valori di frequenze e bassi valori di conseguenze; una zona intermedia (grigia) in cui la situazione non è ben definita. Tarando una matrice di questo tipo e costruendone varie per esplosioni, concentrazioni, ecc. è come se si fossero stabiliti dei livelli di accettabilità. Il problema principale è proprio tarare queste matrici : per farlo, si rappresentano una serie di punti nel piano cartesiano, individuati ciascuno da una frequenza di occorrenza di un evento incidentale e da una severità di conseguenze; si vede dove questi punti sono situati rispetto

alla globalità del piano e si stabiliscono le aree di alto, medio e basso rischio. Chiaramente è possibile particolareggiare la matrice di rischio a proprio piacimento, inserendo più livelli di severità e di frequenza.

4.5 Rischio di area

La matrice di rischio è un metodo poco usato quando bisogna affrontare la valutazione del rischio per un intero stabilimento, composto quindi da più impianti, oppure per intere aree industriali, dove sono presenti più soggetti di rischio. Esempi tipici sono le raffinerie, in cui sono presenti vari impianti, ciascuno con i propri rischi operativi.

Si supponga di considerare un'area in cui sono presenti due impianti: il desiderio è quello di costruirne un terzo. Come si fa per stabilire se il livello di rischio è accettabile o meno? Il primo passo è quello di correlare il rischio associato ai tre impianti con quello preesistente, cioè è necessaria una valutazione globale punto per punto che comprenda tutti e tre gli impianti. Inoltre, se la costruzione del terzo impianto obbliga l'organizzazione di mezzi di collegamento, di condotte per il trasporto materiale, ecc., la valutazione deve comprendere anche tutti questi aspetti.

Per calcolare la valutazione del rischio di un insediamento industriale è necessario risolvere due problemi: il primo si riferisce alla rappresentazione del rischio, il secondo alla ricomposizione del rischio di area, cioè valutare il rischio, dovuto a sorgenti, punto per punto in relazione alle caratteristiche della zona. La presenza nella zona di un ospedale piuttosto che di una scuola influisce in modo marcato sul livello di rischio. Per la risoluzione del primo problema si può ricorrere alla considerazione di più concetti o parametri di rischio:

- **RISCHIO LOCALE** (o intrinseco), cioè il rischio associato ad un individuo costantemente presente in un dato luogo. Questo parametro è fondamentale per quanto riguarda la costruzione di edifici, come ospedali e scuole, per la scelta della loro posizione. Il rischio locale R è dato dalla frequenza dell'incidente F_a , dalla probabilità $p\left(\frac{c}{a}\right)$ che avvenga la conseguenza "c" supposto che accada l'incidente "a" e la probabilità $p\left(\frac{e}{c}\right)$ che avvenga il danno "e" supposto che accada la conseguenza "c". Quindi si può scrivere:

$$R = F_a \cdot p\left(\frac{c}{a}\right) \cdot p\left(\frac{e}{c}\right)$$

A seguito di tale funzione di probabilità è possibile ricavare le cosiddette Curve di Iso-rischio, che racchiudono un'area con punti aventi la medesima probabilità di rischio annuo.

- **RISCHIO INDIVIDUALE**, analogo al precedente, ma con la differenza che tiene conto della distribuzione della popolazione e della possibilità che certe persone possano scappare, ripararsi o schermarsi. Il rischio individuale I è dato dal rischio sociale R , dalla probabilità "p_p" di presenza nel punto di certe persone, dalla probabilità "p_{i/o}" di essere all'aperto o al chiuso, dalla probabilità "p_e" associata alla possibilità di evacuazione. Quindi si può scrivere:

$$I = R \cdot p_p \cdot p_{i/o} \cdot p_e$$

Come conseguenza di tale funzione probabilistica è possibile ricavare i cosiddetti Grafici I-N_e, cioè dei diagrammi, in generale a barre, che rappresentano il valore del rischio individuale I in funzione del numero di persone "N_e" esposte al rischio.

- **RISCHIO SOCIALE**, cioè il rischio globale alla popolazione nel suo complesso. Il rischio sociale S è funzione di "F_a", di $p\left(\frac{c}{a}\right)$, di "N_e" e di $p\left(\frac{e}{c}\right)$. Quindi si può scrivere:

$$S = f\left(F = F_a \cdot p\left(\frac{c}{a}\right), N_a = N_e \cdot p\left(\frac{e}{c}\right)\right)$$

Come conseguenza di tale funzione si possono costruire le cosiddette Curve F-N_d, cioè delle funzioni che rappresentano la frequenza di accadimento di un certo danno in funzione del numero di persone che subiscono il danno stesso. Le curve F-N_d vengono considerate come base per dare dei limiti di accettabilità alla popolazione.

Il problema, a questo punto, diventa ricomporre le sorgenti di rischio di più impianti in una certa area per ricavare il rischio complessivo dell'area stessa. E' necessario fare una sommatoria di tutte le sorgenti di rischio, sia puntiformi che lineari. Il processo logico deve comprendere: il censimento di tutte le sorgenti di rischio; per ogni sorgente bisogna fare l'analisi di rischio (essendo disponibili per gli impianti i rapporti di sicurezza, le analisi di rischio sono già pronte). Il problema importante è che nei rapporti di sicurezza non viene specificato il rischio punto per punto (se, per esempio, si ha un irraggiamento, nel rapporto di sicurezza verranno riportate delle curve di iso-irraggiamento, non dei valori punto per punto), ma un andamento generale nell'area considerata. Di conseguenza, per avere le informazioni puntuali è necessario interpolare le curve date. Il problema, allora, si sposta sul metodo utilizzato per l'interpolazione. In genere si utilizzano dei calcolatori con appositi programmi, che sono in grado di effettuare le linearizzazioni delle informazioni parziali.

4.6 Il contesto legislativo “Grandi Rischi”

Incidente rilevante: un avvenimento quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di rilievo, connessi ad uno sviluppo incontrollato di una attività industriale che dia luogo a un pericolo grave, immediato o differito, per l'uomo, all'interno o all'esterno dello stabilimento, e per l'ambiente e che comporti l'uso di una o più sostanze pericolose.

Esistono delle normative in vigore che regolano gli impianti a rischio di incidente rilevante. Più precisamente, esiste la direttiva CEE 501/82 che regola situazioni quali incendi, esplosioni, rilasci tossici. In Italia, il Ministero dell'Interno, il 29 luglio 1982, aveva emesso il DPR n° 577 (seguito successivamente da altri decreti collegati), col quale stabiliva un iter autorizzativo: bisogna effettuare un rapporto di sicurezza per “Nulla Osta di Fattibilità” (NOF), nella fase iniziale del progetto, che è propedeutico alla **licenza di costruzione**. Poi viene richiesto un rapporto di sicurezza per “Progetto Particolareggiato” (PP) sul progetto finale, necessario per avere la **licenza di esercizio**. Il Ministero dell'Ambiente, col DPR 175 del 17 maggio 1988, cambiò l'iter autorizzativo nel seguente modo: per poter avere la licenza di esercizio era necessario un rapporto di sicurezza per “notifica” o per “dichiarazione”, in relazione alla quantità di sostanza e alla tipologia di impianto, quindi alla fine del progetto. Fino a circa due anni fa, esistevano questi due iter sovrapposti ma differenti per quanto riguardava i tempi di presentazione dei rapporti. In questi ultimi due anni un decreto regola le autorizzazioni che vanno richieste: è necessario un rapporto di sicurezza NOF all'inizio del progetto ed un rapporto di sicurezza per “notifica” o “finale” al termine di questo.

Il DPR 175/88 afferma che il fabbricante è tenuto a prendere tutte le misure atte a prevenire gli incidenti rilevanti e a limitarne le conseguenze per l'uomo e per l'ambiente; inoltre il fabbricante è tenuto a dimostrare di avere provveduto all'individuazione dei rischi di incidenti rilevanti, alla adozione delle appropriate misure di sicurezza. La dimostrazione che i rischi siano stati individuati, che tutte le misure di prevenzione siano state prese e che comunque siano state adottate le appropriate misure di sicurezza, avviene attraverso il RAPPORTO DI SICUREZZA. Il rapporto di sicurezza è regolato dal DM del 2 agosto 1984 e comprende i seguenti punti:

- Individuazione dell'attività industriale.

- Individuazione della natura, valutazione della probabilità e delle modalità di accadimento di incidenti.
- Individuazione e valutazione delle conseguenze che possono avere luogo all'interno e/o all'esterno.
- Descrizione delle misure assunte per:
 - ⇒ la sicurezza delle operazioni;
 - ⇒ la prevenzione di eventi anomali;
 - ⇒ l'individuazione di procedure di emergenza.
- Dimostrazione che il fabbricante abbia valutato i rischi di incidenti rilevanti dell'attività e abbia adottato adeguate misure di prevenzione ed emergenza.

4.7 Analisi del rischio: quantificazione delle probabilità di accadimento

L'analisi del rischio porta con sé due concetti base fondamentali: il concetto di **evento incidentale** e quello di **danno**. E' importante stabilire la probabilità con cui un fenomeno possa accadere e cosa succede se questo accade. Per ottenere queste informazioni viene in aiuto la Teoria dell'Affidabilità.

Definizione quantitativa di affidabilità: la probabilità che, in un intervallo di tempo assegnato, un oggetto (componente, sistema) compia correttamente la funzione per cui è stato costruito, date le condizioni ambientali e di sollecitazione in cui opera.

Concettualmente, l'affidabilità è l'abilità di un oggetto a compiere correttamente, in un dato intervallo di tempo, la funzione assegnata, date le condizioni ambientali e di sollecitazione in cui opera. Questa definizione di affidabilità mette in relazione quattro elementi:

- Probabilità (valore che si vuole ottenere)
- Requisiti di funzionamento (risultato minimo della variabile da ottenere, al di sotto del quale si considera il malfunzionamento)
- Tempo (di funzionamento)
- Condizioni di funzionamento (condizioni ambientali)

L'affidabilità è inversamente proporzionale al tempo, nel senso che maggiore è il tempo di funzionamento, minore è l'affidabilità, cioè è più probabile il guasto. E' necessario trovare una relazione tra questi quattro elementi. Per fare ciò si considera un numero N_0 di componenti di prova da sottoporre a sperimentazione. Trascorso un certo periodo di tempo si analizzano i componenti guasti $N_r(t)$ e quelli sani $N_v(t)$. Ovviamente sarà:

$$N_0 = N_r(t) + N_v(t)$$

Al termine del periodo di tempo trascorso, si potranno riconoscere due variabili: l'inaffidabilità, cioè la probabilità che un componente si guasti nell'intervallo di tempo t , definita come:

$$F(t) = \frac{N_r(t)}{N_0}$$

in cui $F(t)$ è la funzione cumulativa di probabilità, cioè la probabilità che il tempo al guasto sia minore di t ; e l'affidabilità, cioè la probabilità che un componente rimanga sano nell'intervallo di tempo t , definita come:

$$R(t) = \frac{N_v(t)}{N_0} = 1 - F(t)$$

Si può introdurre la funzione $f(t)$, chiamata "densità di probabilità", cioè la probabilità che un componente messo in prova al tempo $t = 0$ si rompa nell'intervallo $t + dt$. Essa vale:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN_r(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Dal punto di vista pratico e operativo si introduce il concetto di **tasso di guasto** $\lambda(t)$, cioè la probabilità che un componente si rompa fra t e $t + dt$ ammesso che sia sopravvissuto fino a t . Si può scrivere:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_v(t)} \cdot \frac{dN_r(t)}{dt} = \frac{N_0}{N_v(t)} \cdot \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN_r(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

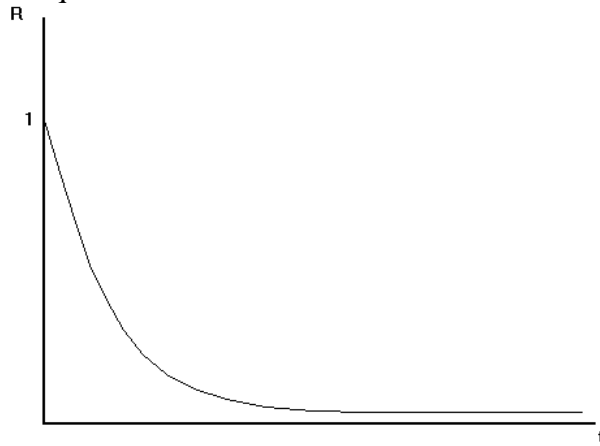
Se si fa l'ipotesi che il tasso di guasto λ sia costante nel tempo, cioè sugli elementi sani sopravvissuti la probabilità che uno di questi si rompa è sempre la stessa, si arriva all'espressione:

$$\lambda = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

che integrata dà

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

e quindi l'affidabilità ha questo andamento:



La relazione scritta precedentemente è una delle relazioni fondamentali dell'affidabilità. Con essa è possibile calcolare l'affidabilità R in funzione del tempo (mentre si è supposto il tasso di guasto λ indipendente dal tempo). Inoltre, con essa, è possibile dare una definizione migliore di tasso di guasto, e cioè il tempo medio $1/\lambda$ (valore medio della funzione) in cui un componente subirà un guasto. E' facile trovare λ espresso nel seguente modo:

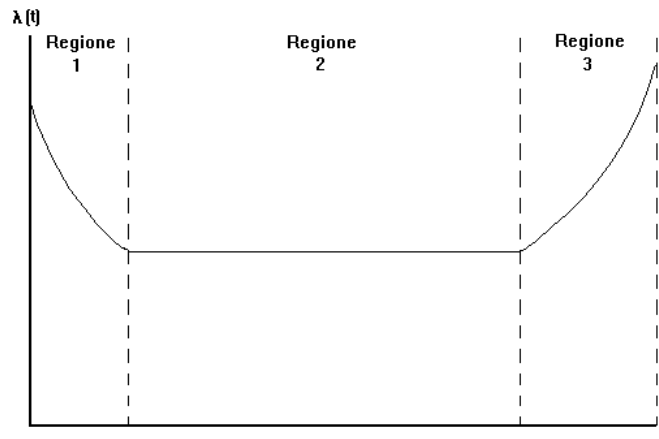
$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad \text{MTBF (Mean Time Between Failures)}$$

oppure

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad \text{MTTF (Mean Time To Failure)}$$

Tutta la trattazione svolta fino a questo momento è valida per componenti non riparabili, perchè altrimenti entrano in gioco altre variabili viste in seguito.

Finora si è supposto che il tasso di guasto λ fosse indipendente dal tempo, ma in realtà non è così. Il diagramma seguente mostra l'andamento del tasso istantaneo di guasto in funzione del tempo di servizio.



Come si può notare dalla figura, il tasso di guasto diminuisce all'inizio della vita del componente, fino a stabilizzarsi (e quindi a rimanere quasi costante) nel cosiddetto periodo di vita "utile"; esso tenderà poi ad aumentare verso la fine della propria vita. È importante notare che, dal punto di vista pratico, per poter allungare la vita del componente, è necessario intervenire con manutenzioni verso la fine della Regione 2, prima che inizi la Regione 3. L'ipotesi fatta in precedenza del tasso di guasto indipendente dal tempo, può essere accettabile per componenti che hanno una vita utile decisamente maggiore rispetto all'inizio e alla fine del loro periodo di funzionamento.

I valori del tasso di guasto vengono trovati in banche dati, che vengono aggiornate di volta in volta. In esse è possibile trovare il tasso di guasto di moltissime apparecchiature riferito agli anni di funzionamento delle apparecchiature stesse. Addirittura, se un componente può guastarsi in vari modi, è presente il tasso di guasto per ognuno di essi. Dopo essere venuti a conoscenza del tasso di guasto, è possibile modificarlo in base alla propria esperienza e alla propria conoscenza, giustificando, tecnicamente, i motivi di tale modifica.

Nota il tasso di guasto è possibile, con l'ausilio delle formule viste precedentemente, calcolare l'affidabilità di un componente. Essendo però un sistema composto da tanti componenti, bisognerà in qualche modo correlare le affidabilità di ciascun componente. Le due configurazioni principali in cui possono essere posti i vari componenti di un sistema sono serie e parallelo. Ogni sistema, pur complesso che sia, può sempre essere ridotto a sistemi in serie o in parallelo.

Sistema in serie: tutti i componenti devono essere funzionanti perchè anche il sistema sia funzionante. Basta che un componente si guasti per avere il malfunzionamento di tutto il sistema.

Si supponga di avere n componenti in serie: come si calcola l'affidabilità di questo sistema? Essa sarà il prodotto delle affidabilità di ogni componente:

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdots R_n(t)$$

ma essendo

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$$

si ricava che

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s t}$$

quindi

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_s}$$

dove

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{per la proprietà degli esponenziali}).$$

Si veda l'esempio seguente:

si supponga di avere quattro componenti collegati in serie tra loro. Siano dati i tassi di guasto di ogni componente e si voglia calcolare l'affidabilità totale del sistema.

Dati	$\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ guasti/h}$ $\lambda_2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ guasti/h}$ $\lambda_3 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ guasti/h}$ $\lambda_4 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ guasti/h}$	si ricava $R_{1(1 \text{ anno})} = e^{-\lambda_1 t} = 0.983$ $R_{2(1 \text{ anno})} = e^{-\lambda_2 t} = 0.957$ $R_{3(1 \text{ anno})} = e^{-\lambda_3 t} = 0.839$ $R_{4(1 \text{ anno})} = e^{-\lambda_4 t} = 0.916$
------	--	---

dove si è tenuto conto che $t = 8760 \text{ ore/anno}$. Dopo aver calcolato le affidabilità di ogni componente, si può calcolare l'affidabilità totale del sistema come:

$$R_{s(1 \text{ anno})} = \prod_{i=1}^4 R_{i(1 \text{ anno})} = 0.723$$

Dai precedenti calcoli si può comprendere che l'affidabilità totale del sistema è sempre minore delle affidabilità dei singoli componenti. L'affidabilità del sistema SERIE è sempre minore dell'affidabilità del peggiore dei componenti.

Se si volesse migliorare l'affidabilità del sistema, bisognerebbe intervenire sull'affidabilità dei singoli componenti, ma sicuramente si avrebbe un effetto maggiore intervenendo sul componente peggiore (meno affidabile).

Sistema in parallelo: è sufficiente che uno dei componenti sia funzionante perchè tutto il sistema sia funzionante. Si supponga di considerare solo due componenti: per semplificare il ragionamento, si può affermare che il sistema si guasta quando entrambi i componenti sono guasti. In questo modo si opera con le probabilità di guasto (inaffidabilità) per poi calcolare l'affidabilità. Quindi l'inaffidabilità totale del sistema sarà il prodotto delle inaffidabilità dei due componenti:

$$F_s(t) = F_1(t) \cdot F_2(t)$$

Poichè l'affidabilità è il complemento all'unità rispetto all'inaffidabilità, si può scrivere:

$$1 - R_s(t) = [1 - R_1(t)] \cdot [1 - R_2(t)]$$

da cui si ricava

$$R_s(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t)$$

Per n componenti in parallelo la relazione si generalizza:

$$1 - R_s(t) = \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)]$$

Si consideri ora l'esempio seguente:

si supponga di avere due componenti collegati in parallelo tra loro. Siano date le affidabilità di ogni componente e si voglia calcolare l'affidabilità totale del sistema.

Dati $R_{1(1 \text{ anno})} = R_{2(1 \text{ anno})} = 0.723$ si ricava l'inaffidabilità di ogni componente:

$$F_1(t) = F_2(t) = 1 - 0.723 = 0.277$$

L'inaffidabilità totale del sistema risulta:

$$F_s(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) = (0.277)^2 = 0.076$$

da cui l'affidabilità totale:

$$R_s(t) = 1 - F_s(t) = 1 - 0.076 = 0.924$$

Dai precedenti calcoli si può comprendere che l'affidabilità totale del sistema è sempre maggiore delle affidabilità dei singoli componenti. L'affidabilità del sistema PARALLELO è sempre maggiore dell'affidabilità del migliore dei componenti.

Se si volesse migliorare l'affidabilità del sistema, bisognerebbe intervenire sull'affidabilità dei singoli componenti, ma sicuramente si avrebbe un effetto maggiore intervenendo sul componente migliore (più affidabile).

Tutti i ragionamenti svolti finora hanno riguardato sistemi cosiddetti “non riparabili”, cioè sistemi che, una volta guasti, possono solo essere sostituiti. Un sistema “riparabile”, invece, è un sistema che funziona a cicli, nel senso che esistono periodi di tempo in cui questo è funzionante, altri in cui è fermo per riparazione o manutenzione, per poi ricominciare a funzionare. In questa situazione non è più corretto parlare di affidabilità di un componente, in quanto nell'arco di un periodo di tempo tale componente può essersi fermato più volte per manutenzione. Allora è necessario introdurre una nuova grandezza che si chiamerà disponibilità (A), che indica la probabilità che in un dato istante di tempo il componente sia sano. La differenza sostanziale tra affidabilità e disponibilità è che la prima si riferisce ad un periodo di funzionamento del componente, la seconda si riferisce ad un istante di funzionamento. Utilizzare quindi l'affidabilità per un sistema riparabile, significa non avere informazioni sugli istanti in cui il componente è stato fermato per manutenzione. Al contrario utilizzare la disponibilità significa solo sapere se in un determinato istante il componente è in funzione oppure no. Analogamente all'inaffidabilità, si può introdurre la variabile indisponibilità (Q), come complemento all'unità rispetto alla disponibilità, che indica la probabilità che in un dato istante di tempo il componente sia guasto.

Un componente riparabile è caratterizzato da due aspetti: il primo è la sua affidabilità, cioè il fatto che si guasti più o meno di frequente, il secondo è la manutenibilità, cioè la possibilità di ripararlo in tempi brevi dopo il guasto. In analogia con i sistemi non riparabili, qui si introduce la grandezza μ , chiamata **tasso di riparazione**, cioè la probabilità che il sistema si ripari in un certo tempo t. Si definisce:

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad \text{MTTR (Mean Time To Repair)}$$

Generalizzando il discorso sul comportamento dei componenti, si può notare quanto segue: partendo dall'inizio della vita di un componente, questo, col passare del tempo, si “dirige” verso una situazione di guasto, valutabile mediante il parametro λ (tasso di guasto). Se il componente in esame è “non riparabile”, il tutto finisce. Se invece è “riparabile”, da una situazione di guasto ci si riporta verso una situazione di buon funzionamento mediante il parametro μ (tasso di riparazione). Si può dimostrare che la disponibilità e l'indisponibilità per un sistema riparabile valgono rispettivamente:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}$$

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}$$

Se nelle due relazioni precedenti si considera $\mu = 0$ (sistemi non riparabili), si ottengono nuovamente le relazioni:

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

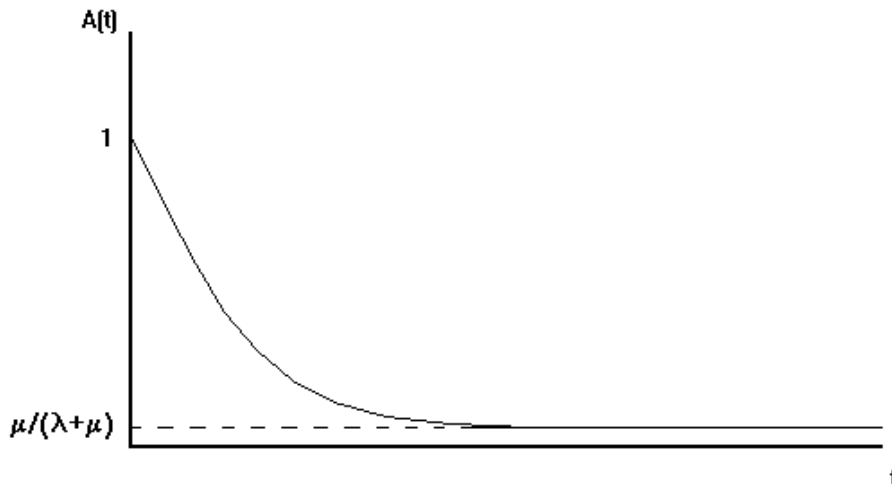
$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$$

in cui $A(t)$ e $Q(t)$ sono stati sostituiti rispettivamente da $R(t)$ e $F(t)$, poichè si tratta di sistemi non riparabili. Quindi le relazioni precedenti sono da considerarsi del tutto generali.

Per verificare quale sia l'andamento della disponibilità A in funzione del tempo t è sufficiente sostituire nella formula di $A(t)$ i valori $t = 0$ e $t = \infty$, per ottenere rispettivamente:

$$A(0) = 1 \text{ e } A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

L'andamento è perciò il seguente:



In alternativa, nell'espressione della disponibilità asintotica $A(\infty)$ si possono sostituire i valori di λ

e μ ($\lambda = \frac{1}{MTTR}$ e $\mu = \frac{1}{MTTF}$), ottenendo:

$$A(\infty) = \frac{MTTF}{MTTR + MTTF}$$

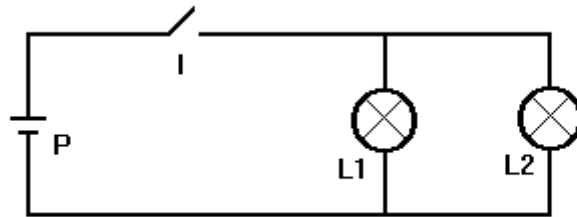
I sistemi riparabili si dividono, a loro volta, in due categorie: quelli i cui guasti si autoevidenziano e quelli in cui non si autoevidenziano. Il guasto che si autoevidenzia è proprio di quei sistemi che sono in continuo funzionamento e che quindi, fermandosi, interrompono il ciclo operativo. Per tali sistemi valgono le leggi finora descritte. Il guasto che non si autoevidenzia, invece, è proprio di sistemi quali quelli di emergenza, cioè sistemi che in generale non sono funzionanti, ma che lo devono essere in particolari condizioni. In tal caso, se il sistema non è funzionante, non ci si accorge se questo sia guasto o no. La soluzione è quella di effettuare periodicamente dei test di funzionamento, per provarne l'efficienza. Per questo tipo di sistema, si potrebbe dimostrare che l'inaffidabilità è calcolabile con la relazione approssimata

$$Q = \lambda \cdot \frac{d}{2}$$

in cui "d" rappresenta l'intervallo di tempo fra due test successivi.

4.8 Probabilità e albero dei guasti

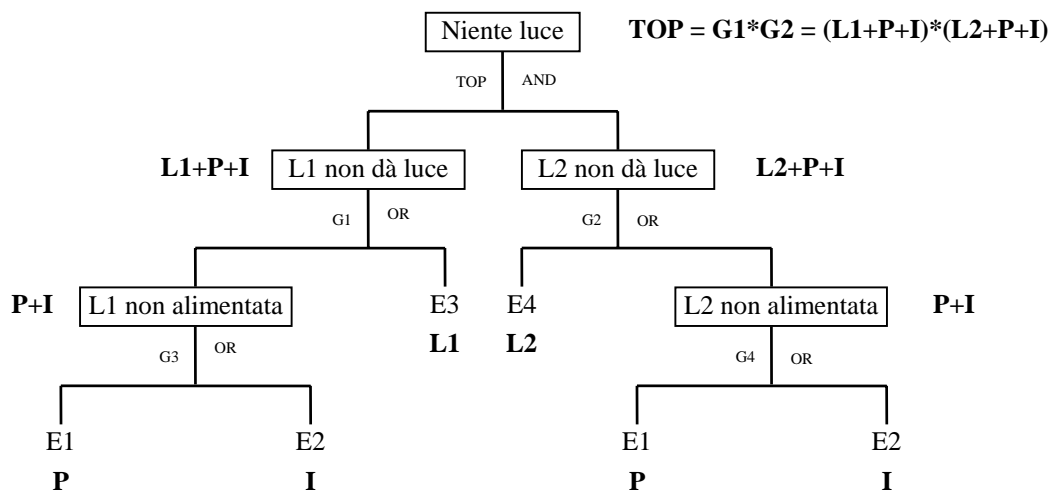
In questo paragrafo si vuole mettere in evidenza il legame che esiste tra leggi della probabilità e costruzione di un albero dei guasti. Si consideri il seguente esempio:



Esso non è altro che un piccolo circuito costituito da una batteria (P), un interruttore (I) e due lampade (L1 e L2), collegate in parallelo. Normalmente, con l'interruttore chiuso, le lampade funzionano entrambe. L'evento che si vuole studiare è la mancanza totale di luce (Top Event). A parole, si può studiare il fenomeno come segue:

- Si ha mancanza totale di luce quando entrambe le lampadine sono spente (AND).
- Ciascuna delle due lampadine può essere spenta perchè fulminata o perchè non alimentata (OR).
- Ciascuna delle due lampadine può non essere alimentata perchè la batteria è scarica o perchè l'interruttore del circuito è aperto (OR).

Si veda ora l'albero costruito sulla base delle affermazioni precedenti:



In grassetto sono indicate le probabilità associate ai vari elementi:

- **P** è la probabilità associata alla batteria scarica
- **I** è la probabilità associata all'interruttore aperto
- **L1** è la probabilità associata alla lampadina 1 fulminata
- **L2** è la probabilità associata alla lampadina 2 fulminata

Quando due eventi sono in OR tra loro, la probabilità dell'evento risultante è dato dalla somma delle probabilità dei due singoli eventi; quando due eventi sono in AND tra loro, la probabilità dell'evento risultante è il prodotto delle probabilità dei due singoli eventi.

Partendo dagli elementi in possesso si può calcolare la probabilità di accadimento del Top Event, cioè l'assenza totale di luce:

$$(L1 + P + I) \cdot (L2 + P + I)$$

Eseguendo i calcoli algebrici, l'espressione precedente diventa:

$$L1 \cdot L2 + L1 \cdot P + L1 \cdot I + P \cdot L2 + P \cdot P + P \cdot I + I \cdot L2 + I \cdot P + I \cdot I$$

Utilizzando le proprietà di idempotenza ($A \cdot A = A$ e $A + A = A$) e di assorbimento ($A + A \cdot B = A$), appartenenti all'algebra di Boole, si possono scrivere le seguenti:

$$P \cdot P = P$$

$$I \cdot I = I$$

$$P + I \cdot P = P$$

$$P + P \cdot L2 = P$$

$$I + I \cdot L1 = I$$

$$I + I \cdot L2 = I$$

Quindi l'espressione precedente si semplifica in:

$$\boxed{P + I + L1 \cdot L2}$$

che viene definita **Minimal Cut Sets** (MCS), (in italiano, *Taglio Minimo di Valori*), che rappresenta le combinazioni minime di eventi che portano al Top Event. Il MCS trovato è composto da 3 termini: due sono del primo ordine (P e I) e uno è del secondo ordine ($L1 \cdot L2$).

Si supponga, ora, di avere la seguente tabella che, per la batteria (P), per l'interruttore (I) e per le due lampadine (L1 e L2), riporta il tasso di guasto (λ), il tasso di riparazione (μ) e l'indisponibilità (q) dei componenti calcolata a $T=10000$ ore, con la formula approssimata $q(t) = \frac{\lambda}{\mu}$:

Componente	λ	μ	q
P	1.e-5	0.1	1.e-4
I	1.e-7	0.1	1.e-6
L1	5.e-4	0.5	1.e-3
L2	5.e-4	0.5	1.e-3

Noto il MCS, si vogliono calcolare l'indisponibilità del Top Event, $Q(TOP)$, e il numero atteso di guasti, $W(TOP)$, nel tempo di missione di 10000 ore. L'indisponibilità del Top Event è pari a:

$$Q(TOP) = q(P) + q(I) + q(L1 \cdot L2) - q(P) \cdot q(I) - q(P) \cdot q(L1 \cdot L2) + q(P) \cdot q(I) \cdot q(L1 \cdot L2)$$

dove

$$q(L1 \cdot L2) = q(L1) \cdot q(L2) = 1.e-6$$

Sostituendo i valori in tabella ed eseguendo i calcoli, si ottiene:

$$Q(TOP) = 1.02e-4$$

Il numero atteso di guasti è pari a:

$$W(TOP) = W(P) + W(I) + W(L1 \cdot L2)$$

dove

$$W(P) = \lambda_p \cdot T = 0.1$$

$$W(I) = \lambda_I \cdot T = 0.001$$

$$W(L1 \cdot L2) = \int_0^T (\lambda_{L1} \cdot q_{L2} + \lambda_{L2} \cdot q_{L1}) dt = 0.01$$

Eseguendo i calcoli, si ottiene:

$$W(TOP) = 0.111$$

Il metodo precedente per la costruzione dell'albero dei guasti, non è l'unico; è possibile, infatti, costruirne altri seguendo altre logiche ma, alla fine, si devono ottenere gli stessi Minimal Cut Sets.
Due alberi dei guasti sono equivalenti quando hanno gli stessi Minimal Cut Sets.

All'occorrenza, possono essere usate altre proprietà dell'algebra di Boole, che sono:

<u>commutativa</u>	$A \cdot B = B \cdot A$ e $A + B = B + A$
<u>associativa</u>	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$ e $A + (B + C) = (A + B) + C$
<u>distributiva</u>	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$

Come riassunto delle fasi precedenti, è possibile vedere il seguente Schema logico di analisi con albero dei guasti:

a. Costruzione dell'albero

Definizione del Top Event

Definizione del sistema (limiti, condizioni al contorno)

Costruzione dell'albero mediante metodi formali (*Operability Analysis*) o mediante esame degli schemi di processo (nei casi più semplici)

b. Esame dello schema logico

Soluzione dell'albero mediante l'applicazione delle proprietà dell'algebra di Boole

c. Ottenimento dei "Minimal Cut Sets" (C_1, \dots, C_n)

Esame dei MCS per individuare la presenza di modi di guasto non protetti (cut sets di ordine 1)

d. Analisi quantitativa

Espressione della indisponibilità del Top Event come:

$$Q(TOP) = q(C_1) + q(C_2) + \dots + q(C_n)$$

o del numero atteso di eventi nel tempo di missione:

$$W(TOP) = W(C_1) + W(C_2) + \dots + W(C_n)$$

Per calcolare Q o W del TOP è necessario quindi calcolare Q o W dei singoli MCS. Per fare ciò occorre essere in grado di valutare la indisponibilità Q di ogni evento di base dell'albero. Si utilizzano relazioni diverse a seconda che il componente sia riparabile o non riparabile (in quest'ultimo caso il componente, in caso di guasto, rimane nello stato di guasto per l'intera durata del tempo di missione). Per componenti non riparabili, si utilizzano relazioni diverse a seconda che il guasto sia o no del tipo "autoevidenzianti".

Note le indisponibilità dei singoli componenti, si calcolano le Q o le W dei singoli MCS e quindi quelle del TOP.

4.9 Analisi del rischio: valutazione dei danni

Una volta calcolata la probabilità con cui un determinato fenomeno può accadere, è necessario porsi un altro problema fondamentale: come si possono valutare i danni fisici causati dal fenomeno stesso? Se, per esempio, si tratta di un'esplosione, che pressione può questa sviluppare nelle immediate vicinanze della sorgente? Quali danni materiali può comportare l'onda d'urto?

Fondamentalmente il danno finale dipende dall'effetto del fenomeno, dal tempo di esposizione allo stesso fenomeno e, infine, dal ricettore, cioè dal tipo di individuo (umano, animale, vegetale o oggetto) investito dal fenomeno. In generale, i tipi di danno comunemente considerati sono:

Effetto	Ricettore	
	Uomo	Struttura
Irraggiamento termico	Ustioni Morte	Collasso Incendio
Sovrapressione	Rottura timpani Morte	Danneggiamento Collasso
Tossicità	Morte	-

Il modo più semplice per passare dal valore di un parametro fisico (irraggiamento termico, sovrapressione, concentrazione, ecc.) alla probabilità di danno (o alla percentuale di popolazione colpita) è la cosiddetta **funzione a soglia**, cioè vengono stabiliti dei valori limite a seconda del fenomeno, tali limiti definiscono la soglia e si confronta il valore corrente con la soglia per determinare se ci si trova in condizione pericolosa o no.

Come esempio si vedano le due seguenti tabelle:

Flusso incidente (KW/m ²)	Tipo di danno
37.5	Sufficiente per provocare danni ad apparecchiature di processo. 100% di fatalità.
25	Energia minima necessaria per l'ignizione di legno esposto per un tempo molto lungo. 100% di fatalità.
12.5	Minima energia richiesta per l'ignizione pilotata del legno o per la fusione di materie plastiche. 100% di fatalità.
4.73	Sufficiente per provocare dolore se non si è in grado di schermarsi entro 20 secondi. Bruciature di 1° grado. 0% di letalità.
1.6	Limite per esposizioni prolungate senza nessun scompenso.

Sovrapressione (bar)	Tipo di danno
0.02	Valore di sovrapressione corrispondente alla cosiddetta "distanza di sicurezza" oltre il quale si ha una probabilità del 95% di non avere un danno serio.
0.07	Valore di sovrapressione per cui si ha una probabilità del 90% di avere la rottura dei vetri domestici.
0.1	Valore di sovrapressione intorno a cui si hanno danni di entità definiti come riparabili.
0.15	Limite inferiore di pressione per avere seri danni strutturali (distruzione parziale di muratura in mattoni, ecc.).
0.3	Valore di sovrapressione per cui si ha una probabilità del 90% di avere un serio danno strutturale. Tipo di danno definito "pesante".
1	Soglia di fatalità (1% di probabilità).

Esistono poi funzioni di tipo continuo che, all'aumentare della probabilità di accadimento del fenomeno, indicano un maggior tenore di danno: un esempio di tali funzioni è la **funzione di PROBIT** (PROBability unIT). La grandezza chiamata "probit" (Pr) è pari a:

$$Pr = K_1 + K_2 \cdot \ln D$$

dove D è chiamata “dose” ed è pari, per esempio, a $C^n \cdot t$, dove C è la concentrazione e t è il tempo (la dose potrebbe anche rappresentare un irraggiamento).

Dalla formula precedente si può evidenziare come il tempo entri in questo tipo di fenomeno.

E' possibile passare dalla grandezza probit alla probabilità tramite opportune tabelle o tramite la funzione:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\text{Pr}} \left[\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \right] du$$

Alcuni esempi di coefficienti sono:

	K₁	K₂	n
Incendio - morte	-14.9	2.56	4/3
Incendio - ustione 1°	-39.83	3.02	4/3
Ammoniaca	-15.8	1	2
Cloro	-11.4	0.82	2.75

CAPITOLO V

VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE DEGLI EVENTI INCIDENTALI

5.1 Generalità

Nell'ambito di questo capitolo verranno trattati i seguenti argomenti:

- L'analisi delle conseguenze all'interno dell'analisi di rischio
- Fenomeni e scenari di interesse
- Modelli e programmi di calcolo
- Stima delle conseguenze
 - * Termine di sorgente
 - * Incendio
 - * Dispersione
 - * Esplosione

5.2 Analisi delle conseguenze

L'analisi delle conseguenze è quella parte dell'analisi di rischio che valuta gli effetti causati da un rilascio (di sostanza o di energia termica o barica) successivo ad un evento incidentale.

Tipicamente le conseguenze includono i fenomeni di irraggiamento, sovrappressione e concentrazione. E' necessario quantificare, in qualche modo, questi eventi per valutare le conseguenze degli stessi su persone, ambiente e strutture. I punti di partenza sono:

- le caratteristiche chimiche e le condizioni fisiche delle sostanze coinvolte
- le ipotesi in cui viene effettuato il rilascio

Il risultato finale consiste nell'eseguire la stima di:

- quantità di sostanza tossica/infiammabile rilasciata
- propagazione dell'energia (termica o barica) rilasciata
- dispersione in atmosfera della sostanza rilasciata

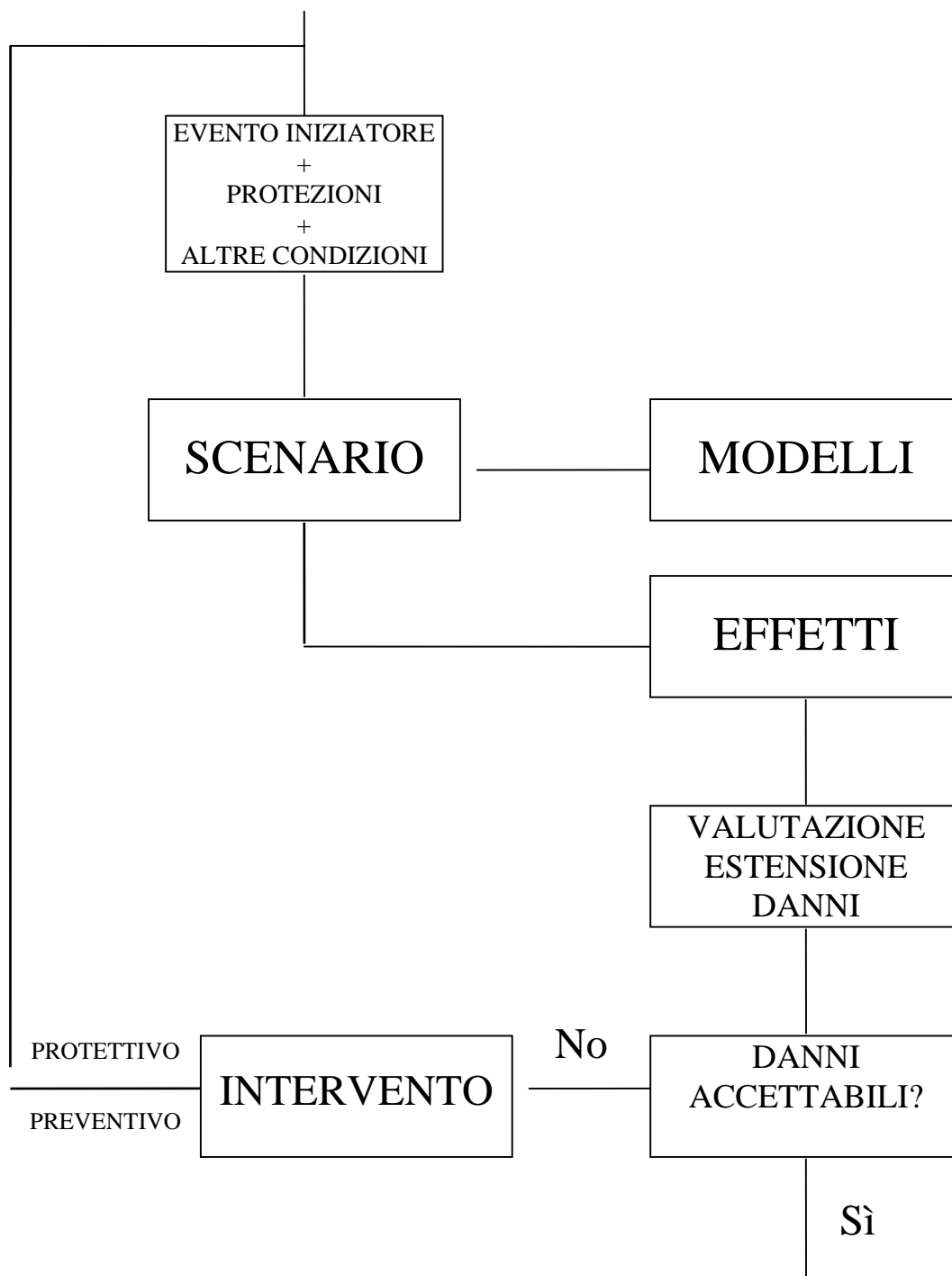
Questi risultati vengono raggiunti con l'ausilio di modelli di simulazione. Tali modelli sono atti a:

- valutare i meccanismi di rilascio di sostanze pericolose (infiammabili, esplosive, tossiche) in atmosfera;
- valutare le modalità di dispersione nell'ambiente di tali sostanze (configurazione spazio-tempo della nube);
- valutare gli effetti degli incendi (irraggiamento termico su persone o cose);
- valutare gli effetti delle esplosioni (onde di pressione su persone o cose).

In pratica, il processo di analisi delle conseguenze prevede i seguenti stadi:

- definizione di uno scenario di riferimento (rilascio di energia termica, barica o di sostanza inquinante);
- calcolo degli effetti (carico termico, onde di pressione o concentrazione di inquinante) mediante l'utilizzo di modelli;
- valutazione dei danni mediante l'utilizzo di modelli di vulnerabilità.

Di seguito viene riportato un diagramma di flusso che rappresenta la sequenza degli stadi.

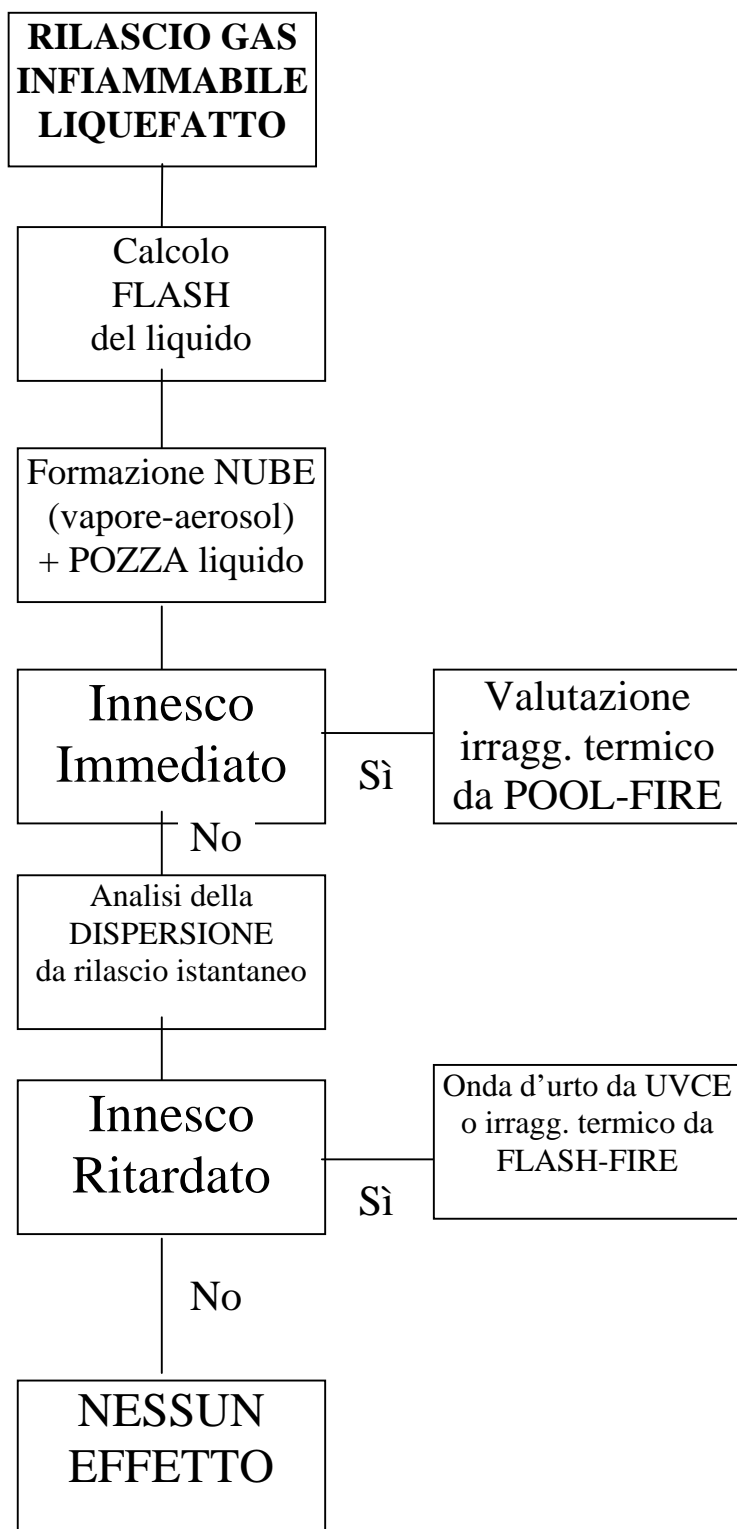


I requisiti necessari per lo sviluppo degli scenari sono:

- procedure standard di analisi (linee guida);
- certezza che tutti gli aspetti del problema siano stati considerati;
- scelta del modello e dei parametri critici per l'analisi, che meglio simulino lo scenario considerato;
- identificazione dei passi intermedi dell'analisi da sviluppare per ogni ramo dell'albero degli eventi.

Come esempio, si può considerare una situazione di rilascio di gas infiammabile liquefatto (GPL).

E' necessario, a seconda degli stadi, determinare i parametri che conducano ad un valutazione quantitativa del fenomeno.



Calcolo FLASH del liquido: il gas infiammabile, alle condizioni ambiente, è un vapore, quindi sarà necessario valutare le variabili di un flash. Queste sono: la portata di liquido che vaporizza, la portata di liquido che rimane tale e dove si

depositano sia il liquido che il vapore. A seguito di questo fenomeno, ci sarà la formazione di una nube, composta da vapore ed aerosol, e di una pozza di liquido non evaporato.

Innesco: in queste condizioni si potrebbe avere o meno un innesco immediato della miscela gas-liquido. Se non si ha innesco immediato, è necessario effettuare un'analisi di dispersione per verificare se i vapori liberati dalla sostanza potrebbero produrre una nube infiammabile. Se invece si ha innesco immediato, bisogna valutare l'irraggiamento termico prodotto dall'incendio della pozza (pool-fire). Nel caso non si abbia innesco immediato, ma i vapori possano produrre una nube infiammabile, si avrebbe un incendio della nube stessa ed un incendio della pozza di liquido.

La stima dei danni su persone, ambiente, apparecchiature e costruzioni viene effettuata dopo un'attenta valutazione degli effetti. L'intensità di un effetto, il suo valore massimo, la sua durata, ecc., sono tutti parametri che concorrono a modificare il danno. In seguito, con l'ausilio di modelli di vulnerabilità, viene effettuata la stima dei danni. Esiste una classificazione dei modelli:

- **(Semi-)Empirici:** basati su correlazioni sperimentali e quindi di applicabilità ristretta;
- **Fenomenologici/Analitici:** si basano sul processo fisico in esame, introducendo delle semplificazioni. Essi generalmente sono più accurati degli empirici e possono applicarsi a più scenari;
- **Numerici:** risolvono le equazioni fondamentali del fenomeno (fluidodinamica, turbolenza, combustione). Essi potenzialmente si applicano ad ogni scenario ma richiedono taratura e notevoli risorse di calcolo.

5.3 Determinazione del termine di sorgente

Questa fase prevede le seguenti operazioni:

- determinazione delle caratteristiche (solitamente portata e durata) del rilascio liquido, gassoso o bifase.
- determinazione della portata evaporante e delle caratteristiche (temperatura, densità, concentrazione iniziale) dei vapori da pozza.

Per determinare la portata di rilascio, è necessario osservare alcune caratteristiche del termine di sorgente. In primis, il tipo di sostanza, le cui specifiche possono essere recuperate da banche dati chimico fisiche; in seguito lo stato e le condizioni di stoccaggio/trasporto, che possono essere in fase liquida o in fase vapore; inoltre il sistema di stoccaggio/trasporto, che può essere in un serbatoio o in una condotta; infine il tipo di efflusso nel tempo, che può essere stazionario o variabile.

La stima della portata di rilascio viene valutata ricorrendo a relazioni più o meno semplici, derivanti dal bilancio energetico, se la situazione è stazionaria o si è interessati al valore iniziale (massimo):

- liquidi: Bernoulli
- liquidi bollenti: Fauske
- vapori: espansione isoentropica gas ideale ($p \cdot v = cost$) + Bernoulli

Di seguito vengono riportate alcune formule per il calcolo delle portate di rilascio specifiche alla sezione $\left(\frac{Kg}{m^2 \cdot s}\right)$:

Efflussi liquidi

$$G^* = \sqrt{2 \cdot (\Delta P + g \cdot H \cdot \rho)}$$

con:

$$\rho = \text{densità del liquido} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\Delta P = \text{differenza tra pressione interna ed esterna} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$g = \text{accelerazione gravitazionale} \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$H = \text{battente di liquido} [m]$$

Efflussi bifase (da condizioni di saturazione):

$$G^* \cong \frac{h_{fg}}{v_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{1}{T \cdot c}}$$

con:

$$h_{fg} = \text{entalpia di vaporizzazione} \left[\frac{J}{Kg} \right]$$

$$v_{fg} = \text{differenza tra volume specifico liquido e vapore} \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$$

$$T = \text{temperatura di saturazione} [^{\circ}C]$$

$$c = \text{calore specifico del liquido} \left[\frac{J}{Kg \cdot ^{\circ}C} \right]$$

Efflussi gassosi (da condizioni critiche $P_0 > 2P_{atm}$):

$$G_{\max}^* = \sqrt{P_0 \cdot \rho_0 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$$

con:

$$P_0 = \text{pressione interna} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$\rho_0 = \text{densità del gas alle condizioni (P,T) interne} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

γ = coefficiente della trasformazione isoentropica (rapporto tra calore specifico a P costante (c_p) e calore specifico a V costante (c_v))

Nel caso si abbia un contenitore in pressione, contenente un gas liquefatto (es. GPL), per calcolare la dispersione di questo gas nel caso di rottura del recipiente, bisogna adottare delle semplificazioni. Il primo fenomeno da prendere in considerazione è il fatto che all'apertura del recipiente si ha un'evaporazione del gas liquefatto, poichè esternamente al recipiente esiste una pressione inferiore a quella interna. All'apertura del recipiente il modo di dispersione sarà ovviamente casuale, ma per poterlo determinare con l'ausilio di appositi modelli, è necessario effettuare delle semplificazioni. La più comune è quella di considerare la dispersione come se fosse cilindrica. In un fenomeno come questo i parametri da determinare sono i seguenti:

Frazione di flash (es. GPL mantenuto in pressione, $T_s > T_{eb}$):

$$x_v = 1 - \exp\left(-\frac{c_{pl}}{\Delta H_{ev}} \cdot (T_s - T_{eb})\right)$$

con:

$$c_{pl} = \text{calore specifico del liquido} \left[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C} \right]$$

$$\Delta H_{ev} = \text{entalpia di vaporizzazione del liquido} \left[\frac{J}{Kg} \right]$$

$$T_s = \text{temperatura di stoccaggio} [^\circ C]$$

$$T_{eb} = \text{temperatura di ebollizione} [^\circ C]$$

Frazione di vuoto:

$$\alpha = \frac{x \cdot v_g}{(1-x) \cdot v_l + x \cdot v_g}$$

con:

$$v_l = \text{volume specifico della fase liquida} \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$$

$$v_g = \text{volume specifico della fase vapore} \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$$

Densità (media) della miscela omogenea:

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{x_v}{\rho_v} + \frac{1-x_v}{\rho_l}}$$

con:

$$\rho_v = \text{densità della fase vapore} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_l = \text{densità della fase liquida} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Frazione di Rain-out¹⁰ e Aerosol (spray):

$$x_{R.O.} = 1 - x_v - x_{aer}$$

$$x_{aer} \cong x_v$$

N.B.: per elevate frazioni di flash ($x_v > 30\%$) risulta, sperimentalmente, che $x_{R.O.} = 0$.

Il bilancio energetico per una pozza di liquido con $T_{eb} > T_{amb}$ in condizioni ambientali si può scrivere nella forma seguente:

$$Q_{sol} + Q_{atm} + Q_{sur} + Q_{ev} + Q_{sen} + Q_{grd} = Q_t$$

dove:

$$Q_{sol} = \text{radiazione ad onda corta proveniente direttamente dal sole} \left[\frac{KJ}{m^2 \cdot h} \right]$$

$$Q_{atm} = \text{radiazione ad onda lunga proveniente dall'atmosfera, assorbita dalla pozza} \left[\frac{KJ}{m^2 \cdot h} \right]$$

¹⁰ La frazione di Rain-out è quella parte di gas liquefatto che cade al di fuori del recipiente senza vaporizzare, e che quindi, cadendo al suolo, forma la pozza di liquido.

Q_{sur} = radiazione ad onda lunga emessa dalla pozza $\left[\frac{KJ}{m^2} \cdot h \right]$

Q_{ev} = energia di evaporazione $\left[\frac{KJ}{m^2} \cdot h \right]$

Q_{sen} = calore sensibile condotto nella pozza dall'atmosfera $\left[\frac{KJ}{m^2} \cdot h \right]$

Q_{grd} = calore condotto dal terreno $\left[\frac{KJ}{m^2} \cdot h \right]$

Q_t = incremento di energia immagazzinata nella pozza $\left[\frac{KJ}{m^2} \cdot h \right]$

Di seguito vengono esaminati questi termini singolarmente.

Q_{sol}

La radiazione ad onda corta (lunghezza d'onda compresa tra 0.2e-6 e 3.0e-6) proviene dal sole, ma l'energia presente al limite superiore dell'atmosfera diminuisce a causa dell'assorbimento da parte di O_2 , dello scattering con aria asciutta e scattering con assorbimento da parte di particelle e vapore acqueo. La quantità di radiazione solare incidente su una superficie orizzontale varia in base alla dislocazione geografica, l'altitudine, la stagione e le condizioni meteorologiche. Il valore di tale radiazione potrebbe essere ottenuto da formule in cui intervengono dati astronomici, ma conviene ricavarlo da osservazioni sperimentali.

Q_{atm}, Q_{sur}

I termini di scambio di energia ad onde lunghe sono calcolati dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$Q_{atm} = \beta \cdot \sigma \cdot T_a^4$$

$$Q_{sur} = e \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

dove:

σ = costante di Stefan-Boltzmann (2.04e-7)

β = fattore di copertura nuvolosa [0-10]

e = emissività

T_a = temperatura assoluta dell'aria [K]

T_s = temperatura assoluta della pozza [K]

Q_{atm} dipende tramite β , dalla temperatura e dall'umidità dell'aria, e dalla nuvolosità.

Infatti:

$$\beta = a + b \cdot p_a$$

$$p_a = 0.0295 \cdot \exp \left[21.66 - \left(\frac{5431.3}{T} \right) \right] \cdot 25.4 \cdot H_R$$

dove:

p_a = tensione di vapore dell'acqua [mmHg]

a, b = costanti per ogni valore di copertura nuvolosa (0 per giorno sereno e 10 per copertura completa)

H_R = umidità relativa [0-1]

L'emissività è stata posta pari a 0.97 (emissività dell'acqua) in quanto valori di emissività per altre sostanze poco si discostano da quest'ultimo.

Q_{ev}

L'energia richiesta per l'evaporazione è il prodotto del rateo di evaporazione (E) e del calore di vaporizzazione (H_v). Il rateo di evaporazione per unità di area è dato da:

$$E = k \frac{M \cdot P(T_s)}{R \cdot T_s}$$

dove:

k = coefficiente di trasferimento di massa $\left[\frac{m}{h} \right]$

M = peso molecolare $\left[\frac{g}{mol} \right]$

$P(T_s)$ = pressione di vapore della sostanza valutata alla superficie della pozza $[Pa]$

R = costante universale dei gas $\left[8.314 \frac{J}{K \cdot mol} \right]$

T_s = temperatura assoluta $[K]$

E = rateo di evaporazione $\left[\frac{g}{m^2 \cdot h} \right]$

Il coefficiente di trasferimento di massa fu correlato da Mackay e Matsugu:

$$k = 0.029 \cdot U^{0.78} \cdot X^{-0.11} \cdot Sc^{-0.67}$$

dove:

U = velocità del vento a 10 m di quota $\left[\frac{m}{h} \right]$

X = diametro della pozza o la dimensione sottovento della pozza $[m]$

Sc = numero di Schmidt della sostanza nella fase aria; è una grandezza adimensionale data dal rapporto della quantità di moto e diffusività di massa. E' valutato dividendo la viscosità cinematica dell'aria per la diffusività della sostanza. Assume valori da 1 a 2.5.

Pertanto l'energia di vaporizzazione è:

$$Q_{ev} = E \frac{H_v}{M}$$

dove H_v è il calore di vaporizzazione $\left[\frac{KJ}{mol} \right]$.

Q_{sen}

Il trasferimento di calore sensibile tra l'aria e la pozza avviene come conseguenza di una differenza di temperatura tra le due fasi:

$$Q_{sen} = U_{liq} (T_a - T_s)$$

dove:

U_{liq} = coefficiente di trasferimento del calore $\left[\frac{KJ}{m^2 \cdot h \cdot K} \right]$, che può essere stimato attraverso l'analogia esistente tra trasferimento di massa e di calore:

$$U_{liq} = k \cdot \rho_a \cdot c_{pa} \left(\frac{Sc}{Pr} \right)$$

dove:

ρ_a = densità molare dell'aria $\left[\frac{mol}{m^3} \right]$

c_{pa} = calore specifico dell'aria $\left[\frac{KJ}{mol \cdot K} \right]$

Pr = numero di Prandtl

Q_{grd}

La conduzione del calore dal terreno può essere valutata assumendo che il terreno sia una lastra semi-infinita a temperatura iniziale uniforme T_i . Il flusso termico medio all'interfaccia sostanza-terreno dopo un certo periodo di tempo è:

$$Q_{grd} = \left(\frac{2k_{grd}}{\Theta} \right) \cdot \left(\frac{\Theta}{\pi \cdot \alpha} \right)^{0.5} (T_i - T_{gs})$$

dove:

θ = tempo dopo lo spillamento $[h]$

k_{grd} = conduttività termica del terreno $\left[\frac{KJ}{m \cdot h \cdot K} \right]$

α = diffusività termica del terreno $\left[\frac{m^2}{h} \right]$

T_{gs} = temperatura superficiale del terreno $[K]$

dove α è data da:

$$\alpha = \frac{k_{grd}}{c_{pg} \cdot \rho_g}$$

con:

c_{pg} = calore specifico del terreno $\left[\frac{KJ}{Kg \cdot K} \right]$

ρ_g = densità del terreno $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

L'effetto di conduzione del terreno sarà molto significativo per sostanze volatili a causa della grande forza motrice tra pozza e suolo, generata dal raffreddamento evaporativo della sostanza. Il calore trasferito dal terreno sarà anche decrescente col tempo via via che la temperatura del terreno

si avvicina alla temperatura della pozza. Dall'equazione $Q_{grd} = \left(\frac{2k_{grd}}{\Theta} \right) \cdot \left(\frac{\Theta}{\pi \cdot \alpha} \right)^{0.5} (T_i - T_{gs})$ si può

definire un coefficiente di transizione del calore (h_{grd}) dipendente dal tempo:

$$h_{grd} = 2k_{grd} \frac{\left(\frac{\Theta}{\pi \cdot \alpha} \right)^{0.5}}{\Theta}$$

E' desiderabile scrivere l'equazione di Q_{grd} in termini delle stesse temperature che compaiono nell'equazione di Q_{sen} . Poichè la temperatura iniziale del terreno T_i non è generalmente nota, è accettabile uguagliarla alla temperatura dell'aria T_a , mentre la temperatura superficiale della pozza T_s è introdotta al posto della temperatura superficiale del terreno T_{gs} , identificando un coefficiente medio di calore U_{grd} :

$$U_{grd} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_{grd}} \right) + \left(\frac{1}{h_{liq}} \right) \right]}$$

dove:

h_{liq} = coefficiente di trasferimento del calore; tiene conto della resistenza termica tra la superficie del terreno e la superficie della pozza di sostanza. Si può stimare questo coefficiente di trasferimento con la relazione:

$$h_{liq} = \frac{k_{liq}}{\Phi \cdot \bar{d}}$$

dove:

k_{liq} = conduttività termica della sostanza $\left[\frac{KJ}{m \cdot h \cdot K} \right]$

\bar{d} = spessore medio della pozza sull'intero decorso dell'evaporazione (p.e. metà dello spessore iniziale)

Φ = fattore di resistenza liquida; tiene conto del ruolo del trasferimento del calore per conduzione e turbolenza. Se avviene solo conduzione vale 1. Se avviene trasferimento vorticoso è minore di 1. Una correlazione per Φ è derivata dai dati sperimentali:

$$\Phi = \frac{1}{1 + \exp[-0.06(t_{bp} - 70)]}$$

dove t_{bp} è la temperatura normale di ebollizione della sostanza [$^{\circ}C$]

Quindi il contributo termico del terreno si può scrivere come:

$$Q_{grd} = U_{grd}(T_a - T_s)$$

Nel caso particolare di sostanza evaporante contenuta in un recipiente isolato termicamente dal terreno si deve trascurare il termine $\left(\frac{1}{h_{grd}} \right)$, coefficiente di transizione di calore per l'interfaccia sostanza liquida-terreno. Rimane allora:

$$U_{grd} = h_{liq}$$

Infatti, anche se non esiste più il contributo termico del terreno, si deve notare che la massa del liquido rimane alla temperatura iniziale (quella atmosferica) e solo la parte superficiale del liquido si raffredda per l'evaporazione. Si considera quindi un flusso termico dagli strati inferiori a quelli superiori del liquido e il contributo calorico è dato dal prodotto della conducibilità termica del liquido per la differenza tra la temperatura dello strato superficiale e quella del resto della massa liquida (pari alla temperatura atmosferica). Per il calcolo di h_{liq} si utilizza ancora l'equazione

$h_{liq} = \frac{k_{liq}}{\Phi \cdot \bar{d}}$ dove però al posto di \bar{d} si pone d (spessore del liquido evaporante). Nel caso di

rilascio sul terreno si utilizza infatti lo spessore medio sull'intero decorso dell'evaporazione e si suppone la completa evaporazione del liquido; invece il caso di evaporazione da recipiente isolato termicamente dal terreno contempla, ad esempio, liquido contenuto in serbatoi in cui è avvenuto l'affondamento del tetto, o casi analoghi, di conseguenza nel calcolo del rateo di evaporazione si suppone che la variazione dello spessore sia trascurabile ai fini del calcolo di h_{liq} .

Il contributo termico proveniente dagli strati inferiori dell'intera massa liquida è dato da:

$$Q_{grd} = h_{liq}(T_a - T_s)$$

Il modello utilizzato determina la temperatura superficiale della pozza basandosi sul bilancio stazionario di energia (prima equazione di bilancio con $Q_t = 0$). Questa temperatura viene poi

utilizzata per calcolare il rateo di evaporazione attraverso l'equazione $E = k \frac{M \cdot P(T_s)}{R \cdot T_s}$. Il bilancio iniziale può essere riscritto in questo modo:

$$Q_{sol} + Q_{atm} + T_a(U_{liq} + U_{grd}) = T_s(U_{liq} + U_{grd}) + k \cdot \frac{H_v \cdot P(T_s)}{R \cdot T_s} + e \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

I termini a sinistra del segno di uguale possono essere calcolati, mentre quelli a destra contengono termini dipendenti dalla temperatura superficiale, che è l'incognita finale. Questa equazione può essere risolta rispetto alla temperatura superficiale con il metodo di Newton.

5.4 Il fenomeno dell'evaporazione

Nel paragrafo precedente si è visto come, in seguito ad una esplosione di un contenitore in pressione, si possa avere precipitazione di liquido, valutabile con la formula $x_{R.O.} = 1 - x_v - x_{aer}$. Tale porzione di liquido potrebbe a sua volta evaporare. Il fenomeno dipende da:

- condizioni del liquido rilasciato (se la temperatura di stoccaggio è minore o maggiore di quella ambiente, se il liquido è bollente o volatile con temperatura di ebollizione minore o maggiore di quella ambiente);
- caratteristiche del mezzo dove il liquido viene rilasciato (superficie di contatto, confinamento, conducibilità);
- caratteristiche ambientali (temperatura, irraggiamento, velocità del vento).

La stima della portata di evaporazione viene effettuata nel seguente modo:

Liquidi volatili ($P_s < P_{atm}$):

è predominante il meccanismo di trasferimento dei vapori dalla superficie della pozza sotto l'azione del vento e la portata specifica di evaporazione vale:

$$E = k \cdot M \cdot \frac{P(T_s)}{R \cdot T_s}$$

dove:

k = coefficiente di trasferimento di massa ($k = 0.029 \cdot U_w^{0.78} \cdot X^{-0.11} \cdot Sc^{-0.67}$)

U_w = velocità del vento a 10 metri di quota

X = diametro o dimensione trasversale della pozza

$P(T_s)$ = tensione di vapore

T_s = temperatura della pozza di liquido

R = costante universale dei gas

M = peso molecolare

Liquidi bollenti (temperatura di rilascio minore di quella ambiente):

è predominante il trasferimento di calore (per conduzione) dal substrato alla pozza. Dall'espressione del flusso di calore:

$$q = k \cdot \frac{\Delta T}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot t}}$$

dove:

k = conducibilità termica del substrato

α = diffusività termica ($\alpha = k/c$)

c = capacità termica

ΔT = differenza di temperatura tra liquido (bollente) e quella iniziale del substrato (T_s)

si ricava la portata specifica di evaporazione:

$$E = \frac{q}{\Delta H_{ev}}$$

con ΔH_{ev} = entalpia di vaporizzazione.

5.5 Il fenomeno dell'incendio

Tale fenomeno può riguardare una pozza, un getto o una nube. In ogni caso esso determina un irraggiamento (costante o variabile, a seconda delle caratteristiche del fenomeno) che può essere stimato con la seguente equazione:

$$q = d \cdot F \cdot E$$

dove:

q = irraggiamento $\left[\frac{KW}{m^2} \right]$

E = intensità di radiazione della fiamma $\left[\frac{KW}{m^2} \right]$

d = trasmissività atmosferica

F = fattore di vista

Per ben definire un incendio da pozza (pool-fire) occorre caratterizzare:

- la geometria della fiamma (forma, dimensione);
- le proprietà termico/emissive (temperatura, emissività, ecc.).

Queste ultime proprietà sono fortemente dipendenti dal tipo di combustibile, natura dell'incendio e dalle sue dimensioni. Quindi spesso non è possibile determinare in modo esaustivo le reali caratteristiche dell'incendio stesso. In mancanza di alcune informazioni, allora, è necessario ricorrere a metodi semplificati (fiamma solida, emettitore puntiforme).

Le linee guida per stimare un incendio sono le seguenti:

- Si assume una forma di fiamma a seconda del fenomeno;
- Si calcola la potenza irraggiata (dal centro della fiamma o dalla sua superficie) come frazione della potenza sviluppata (pari al prodotto tra il consumo di combustibile e il potere calorifico);
- Si calcola il fattore di vista e la trasmissività in funzione della distanza del bersaglio.

Le forme di fiamma più comunemente assunte sono:

Cilindrica/rettangolare (inclinata)	Pool/trench-fire
Troncoconica	Jet-fire (Torce)
Sferica	Fireball (Palla di fuoco)
Piana	Flash-fire

Per quanto riguarda l'incendio di getti (jet-fire), fino ad alcuni anni fa, si utilizzava il modello di emettitore puntiforme, che portava ad una sovrastima dell'irraggiamento, a distanze vicine alla sorgente, con la seguente formula:

$$I = \frac{Q}{F}$$

dove:

Q = potenza irraggiata ($Q = \alpha \cdot W \cdot P_c$)

α = frazione di calore irraggiato (0.1 ± 0.4)

W = portata di combustibile

P_c = potere calorifico

F = fattore di vista $\left(F = \frac{1}{4\pi r^2} \right)$

Negli ultimi anni, ulteriori studi su dimensioni ed emissività dei jet-fires hanno portato alla conclusione che la forma che meglio approssima quella reale è la schematizzazione troncoconica. Ciò che distingue i jet-fires dai pool-fires è l'elevata quantità di moto iniziale, quindi la direzionalità, e l'assenza del meccanismo di *feedback* (ritorno) dalla fiamma alla sorgente.

Nel caso di incendi al chiuso, non ci sono grandi differenze rispetto al pool-fire per quanto riguarda lo spargimento del liquido sul pavimento, mentre esistono grandi differenze nel moto verticale dei gas di combustione, essendoci la presenza del soffitto. In questo caso esiste un'interazione mutua tra il **processo fluidodinamico** (ingresso di aria e fuoriuscita di gas caldi) e il **trasferimento di calore** (radiativo e convettivo tra i gas e le pareti, conduttivo tra le pareti e il liquido combustibile). Essendo complesso descrivere compiutamente il fenomeno da un punto di vista analitico, data la presenza di molti fattori che concorrono a crearlo ed essendo piccolo l'ambiente di interesse del fenomeno stesso, si ricorre a modelli di simulazione matematici, come il CFD o il modello a zone.

5.6 Il fenomeno della dispersione

Le principali situazioni di interesse sono le seguenti:

- emissioni di gas e vapori
- emissioni di fasi miste (vapore + liquido; gas + solido)

In entrambi i casi la dispersione della sostanza tossica e/o infiammabile dipende, oltre che dalle condizioni meteorologiche (individuate solitamente tramite la velocità del vento e la classe di stabilità atmosferica) da:

durata del rilascio	istantaneo/continuo
velocità di emissione	alta/bassa
densità dell'inquinante (rispetto all'aria)	leggero/pesante o neutro
dimensione della sorgente	puntiforme/estesa
posizione/orientazione del rilascio	quota o suolo, alto/basso/orizzontale
ambiente di dispersione	aperto/confinato/con ostacoli

Dato il numero di condizioni/parametri da considerare segue che non può esistere un unico modello per trattare questo fenomeno. A maggior ragione se si aggiunge che in alcuni casi (rilasci infiammabili) si è interessati alle elevate concentrazioni raggiunte in prossimità dell'emissione mentre, in altri casi (rilasci tossici) si è interessati a concentrazioni basse raggiunte a distanze elevate.

Per tenere in considerazione tutti gli aspetti visti poc'anzi, esistono degli approcci semplificati:

Gas neutri

Applicare le equazioni di diffusione in atmosfera che, opportunamente semplificate e "calibrate", statisticamente conducono ai cosiddetti Modelli

Gas pesanti emessi in quota/al suolo	Gaussiani. Applicare dei modelli Gaussiani modificati, Modelli “Box” (scatola).
Le emissioni ad alta velocità	Applicare relazioni che tengano conto dell’ingresso di aria per trasferimento della quantità di moto.
Emissioni di particolato e/o goccioline (dimensioni apprezzabili) Esistono poi <u>approcci complessi</u> :	Applicare modelli balistici.
Gas leggeri e non	Applicare modelli sperimentali (basati su prove in galleria del vento, analogie idrodinamiche e prove in scala reale).
Fasi gassose e/o miste (anche “reattive”)	Applicare modelli INTEGRALI basati sulla risoluzione delle equazioni di conservazione con opportune semplificazioni (profili di concentrazione, coefficienti di diluizione, ecc.).
Qualsiasi tipo di rilascio	Metodi numerici basati sulla risoluzione rigorosa delle equazioni fondamentali (e di diffusione) mediante il ricorso a modelli di turbolenza (“ <i>k-ε models</i> ”).

Nel caso si abbia a che fare con **gas pesanti**, la densità iniziale dei gas (anche molto maggiore di quella dell’aria) inibisce la diluizione ad opera della turbolenza atmosferica ed i meccanismi che governano il “risucchio” di aria nella nube, alla superficie di interfaccia con l’ambiente circostante, dipendono dal livello di turbolenza locale (indotto dal movimento della nube stessa) e dalla notevole differenza di densità. In questi casi l’analisi della dispersione viene eseguita ricorrendo a modelli “Box” più o meno sofisticati che distinguono le seguenti fasi:

Accelerazione e diluizione iniziale	Per tener conto della quantità di moto e simulare l’effetto del collasso catastrofico.
“Schiacciamento” (slumping) al suolo per effetto della gravità	Nella fase pesante la nube si allarga orizzontalmente.
STRATIFICAZIONE durante la graduale diluizione	Identifica la transizione dalla fase pesante a quella dominata dalla turbolenza atmosferica.
PASSIVA	In cui la densità della nube è prossima a quella dell’aria e la normale dispersione ad opera della turbolenza atmosferica è governante.

Se si ha a che fare con **gas neutri**, con densità uguale a quella dell’aria, esiste un modello, di Pasquill-Gifford, che propone due formulazioni per il calcolo del valore di concentrazione in un punto di coordinate x, y, z, rispetto al punto di emissione.

Rilascio Istantaneo (di un volume V al suolo, coordinate $x = y = z = 0$)

$$C = \frac{2V}{(2\pi)^{3/2}} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Rilascio Continuo (di una portata Q a quota H, tenendo conto della riflessione)

$$C = \frac{Q}{2\pi \cdot U_w \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

dove:

U_w = velocità del vento (la cui direzione coincide con l'asse x)

σ_y, σ_z (m) = deviazione standard (coefficiente di diffusione) della distribuzione (gaussiana) orizzontale e verticale della concentrazione. Funzioni della distanza x e della classe di stabilità atmosferica.

Le precedenti espressioni si semplificano ulteriormente qualora interessi la concentrazione al suolo e lungo l'asse del pennacchio ($x = y = 0$), nel caso continuo, o al centro del "puff" ($x = y = z = 0$), nel caso istantaneo. Esse consentono di ricavare la massima concentrazione al suolo in funzione dell'altezza della sorgente (H) e, se integrate, la quantità all'interno delle isoconcentrazioni di interesse (p.e. involucri di infiammabilità).

Di seguito vengono riportate due tabelle che rappresentano rispettivamente le categorie di stabilità proposte da Pasquill, basate sulla velocità del vento e sul grado di insolazione nelle ore diurne e di nuvolosità nelle ore notturne, e la corrispondenza approssimata tra categorie di Pasquill, gradiente termico e condizioni di stabilità.

Velocità del vento (m/s) a 10 metri di quota	Giorno			Notte	
	Insolazione			Nuvolosità	
	Forte	Moderata	Debole	Coperto con velo di nubi o $\geq 4/8$ di nubi basse	$\leq 3/8$ di nuvolosità
< 2	A	A - B	B	F	G
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Categorie di Pasquill	Gradiente termico ($^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$)	Categorie di stabilità
A	< -1.9	alta instabilità
B	-1.9/-1.5	moderata instabilità
C		leggera instabilità
D	-1.5/+1.5	condizioni neutre
E		leggera stabilità
F	+1.5/+4.0	moderata stabilità
G	> +4.0	elevata stabilità

5.7 Il fenomeno dell'esplosione

L'esplosione è un evento in cui, a seguito del rilascio di energia in un tempo sufficientemente piccolo e in una regione dello spazio, si genera un'onda di pressione (perturbazione) di ampiezza finita che si propaga a distanza.

Esistono numerosissimi tipi di esplosioni accidentali che possono essere classificati, a seconda della loro natura chimica o fisica, nel seguente modo:

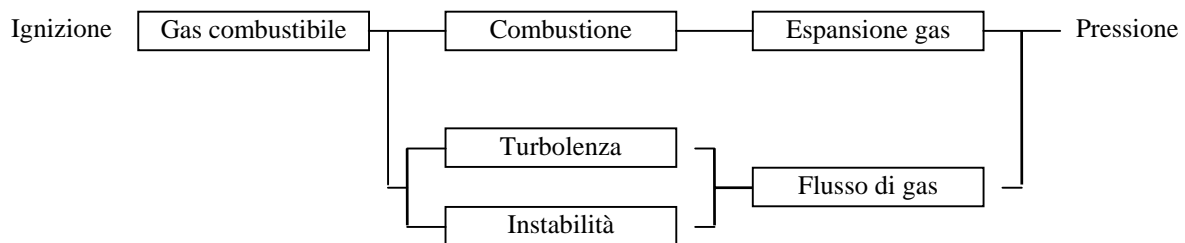
- esplosioni allo stato condensato (p.e. TNT)
- scoppio di recipienti/tubazioni contenenti gas in pressione
- esplosioni del tipo “Run-Away” (fenomeno connesso alla perdita di controllo di una reazione con conseguente aumento di pressione nel recipiente, se il sistema di rilascio non è in grado di sfogare i vapori generati).
- esplosioni del tipo BLEVE (*Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion*)
- esplosioni (chimiche) di vapori e di polveri in ambienti chiusi/ventati
- esplosioni di nubi di vapore in ambienti aperti

In questi ultimi due casi, a seconda della velocità di propagazione del fronte di fiamma, si distingue la:

- DEFLAGRAZIONE, se questa è subsonica¹¹
- DETONAZIONE, se questa è supersonica

Ciò implica, oltre ad una differente intensità/forma dell’onda di pressione generata, dei meccanismi diversi di propagazione del fenomeno di combustione e di accoppiamento con l’onda d’urto.

Di particolare interesse nell’analisi dei rischi, visti i numerosi incidenti occorsi, è la stima delle sovrappressioni generate da deflagrazioni di nubi di vapori rilasciati accidentalmente in ambienti congestionati/confinati. Quest’ultima condizione, infatti, è quella determinante, oltre alla necessità di una miscela infiammabile e la presenza dell’innesco, affinché si abbia la generazione di apprezzabili onde d’urto. La ragione di ciò sta nel fatto che il processo di combustione ed espansione dei gas combusti è notevolmente incrementato dalla turbolenza generata dalla presenza di ostacoli, che fa aumentare la velocità di fiamma e quindi l’entità della sovrappressione, secondo il meccanismo illustrato nella seguente figura:



La complessità del fenomeno richiederebbe l’ausilio di codici di simulazione fluidodinamica, ma gli scopi ed i tempi connessi all’analisi dei rischi implicano il ricorso a metodi/modelli semplificati in grado di fornire una stima del picco di pressione e della sua durata in funzione della distanza.

I metodi che verranno presentati in seguito sono:

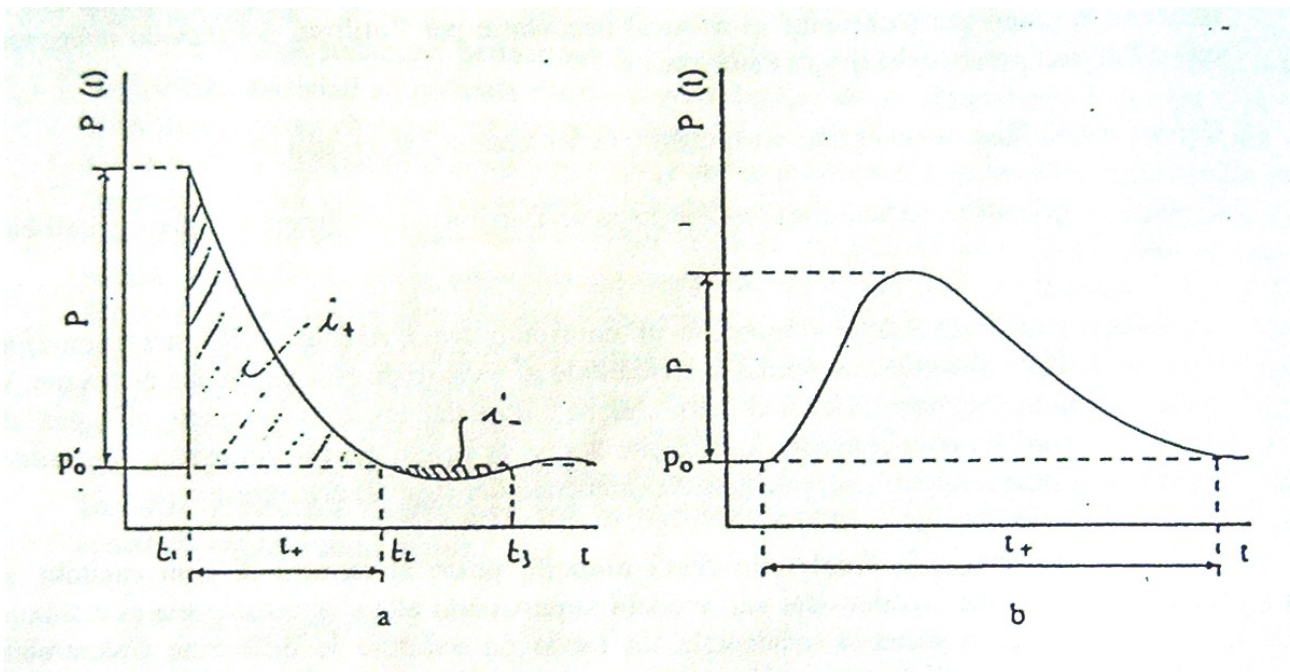
- TNT equivalente
- Wiekema
- Multi-Energy Method

Metodo TNT equivalente

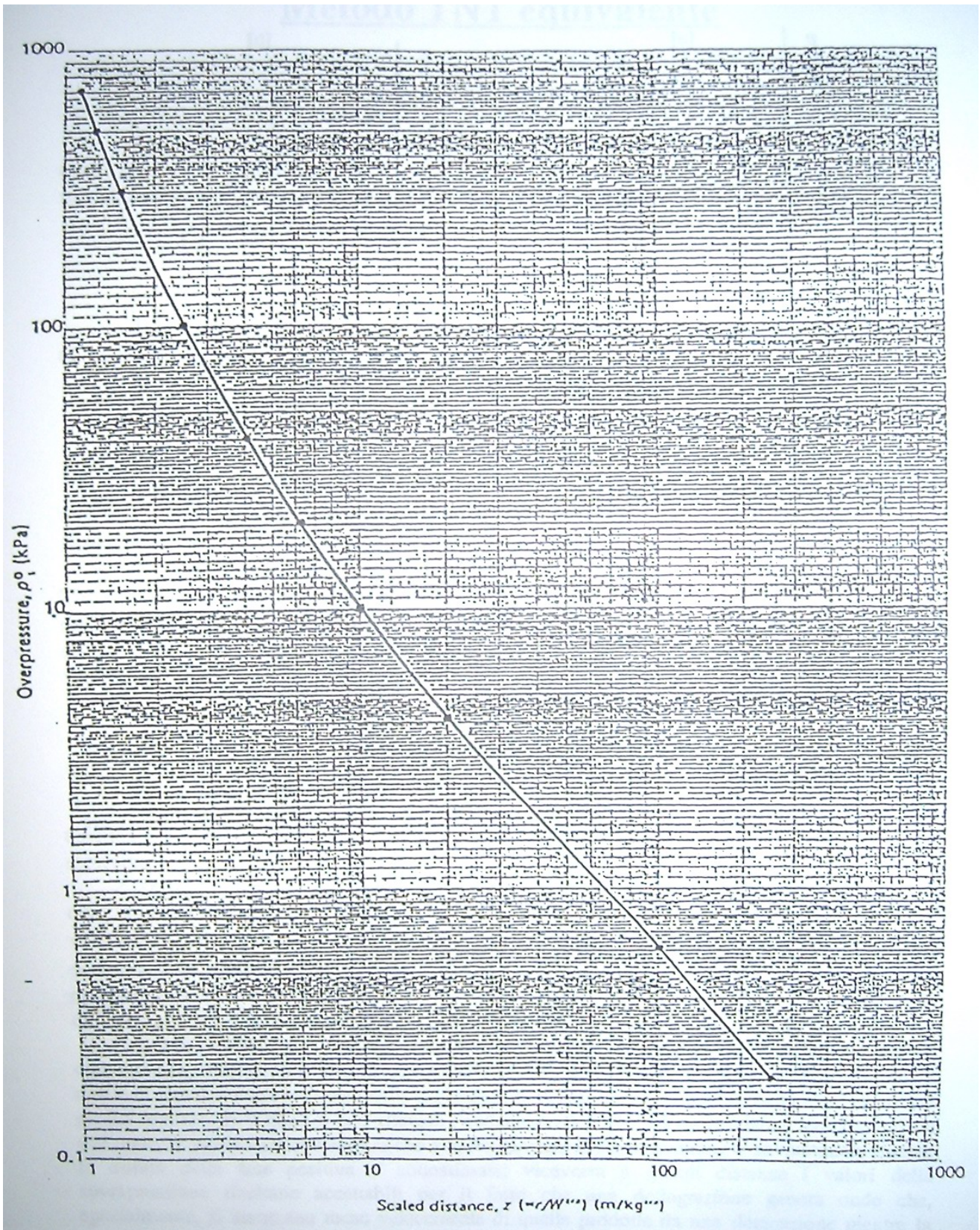
¹¹ La velocità del suono è pari a circa 340 m/s, cioè circa 1224 Km/h.

La base del metodo del TNT equivalente risiede nella correlazione tra attenuazione dell'onda d'urto prodotta ed energia rilasciata nel caso di esplosioni di tipo detonativo, come quelle di esplosivi solidi (quali il TNT). Dato l'elevato valore della densità di energia (KJ/m^3) contenuto negli esplosivi solidi, vengono rilasciate notevoli quantità di energia in tempi estremamente brevi. Questo fa sì che la variazione di sovrappressione nel tempo sia pressochè ideale. E' stato possibile ricavare l'attenuazione della sovrappressione massima in funzione della distanza, utilizzando le numerose sperimentazioni condotte soprattutto in campo militare. Sulla base dei danni prodotti da esplosioni di TNT, la sovrappressione di picco (ΔP_{max}) ed altri parametri dell'onda d'urto sono stati correlati (si vedano le figure seguenti) ad una distanza parametrizzata λ (o distanza ridotta Z) direttamente proporzionale alla distanza r ed inversamente proporzionale alla radice cubica della massa (M) di TNT coinvolta nell'esplosione:

$$Z = \lambda = \frac{r}{M^{1/3}}$$



Andamento tipico della sovrappressione nelle detonazioni (a) e nelle deflagrazioni (b). t_+ è la durata della Fase Positiva, P è il picco di sovrappressione, i_+ è l'impulso positivo e i_- l'impulso negativo.



Picco di sovrappressione generata da una carica di TNT in funzione della distanza ridotta Z

Il primo approccio per la valutazione delle sovrappressioni da esplosioni di nubi di vapore è stato quello di utilizzare le stesse curve ottenute per il TNT, determinando una quantità di TNT equivalente (M_{TNTeq}), da valutarsi caso per caso, da introdurre nell'espressione della distanza parametrizzata λ . Questa quantità equivalente è data da:

$$M_{TNTeq} = \eta \frac{\Delta H_{comb}}{\Delta H_{TNT}} M_{comb}$$

dove:

ΔH_{comb} = potere calorifico del combustibile $\left[\frac{KJ}{Kg} \right]$

ΔH_{TNT} = energia rilasciata da 1 Kg di TNT

Il rapporto tra i due è, per quasi tutti gli idrocarburi, pari a circa 10.

M_{comb} = massa di combustibile rilasciata

η = fattore di efficienza, che tiene conto delle diversità tra l'esplosione di TNT e quelle di nubi di idrocarburi (che sono generalmente delle deflagrazioni).

Infatti:

- ⇒ termodinamicamente solo una frazione dell'energia termica a seguito della combustione è convertita in energia meccanica;
- ⇒ non tutta la massa rilasciata è all'interno dei limiti di infiammabilità;
- ⇒ non tutto il combustibile all'interno dei limiti di infiammabilità è in composizione stechiometrica con l'aria, per cui l'energia liberata per Kg di combustibile è inferiore al ΔH_{comb} .

Sulla base di una analisi statistica basata su un elevato numero di incidenti rilevanti e distanze differenti di stima dei danni, si ha che nel 90% dei casi l'equivalenza, definita come rapporto

$\frac{M_{TNT}}{M_{comb}}$, è inferiore a 1, con un valore medio di 0.4 che copre il 60% dei casi incidentali.

Il metodo del TNT equivalente, pur fornendo discreti risultati nella zona lontana dai bordi della nube, sovrastima notevolmente la sovrappressione nelle zone vicine e all'interno della nube stessa, essendo la curva base del TNT relativa ad una detonazione ideale. Soprattutto per ovviare a quest'ultimo inconveniente si sono proposte numerose varianti del metodo, tra cui quella di limitare la sovrappressione massima all'interno della nube ad 1 bar. In ogni caso questo metodo soffre della grossa arbitrarietà della scelta del parametro η che non può essere predetto a priori in modo affidabile.

Metodo di Wiekema

Il metodo di Wiekema è una procedura sviluppata nei laboratori del TNO per determinare la massima sovrappressione prodotta dall'esplosione di una nube emisferica non confinata di vapori, in funzione della distanza dal centro della nube. Tale metodo è basato su un modello fluidodinamico a sua volta basato sostanzialmente sul modello a pistone. Il principale problema di tale modellazione è trovare una correlazione tra velocità di fiamma ed i fenomeni di accelerazione di quest'ultima, in particolar modo per quanto riguarda l'influenza della turbolenza. Per aggirare questo ostacolo Wiekema ha classificato un certo numero di composti in tre classi di reattività (*Low*, *Medium*, *High*), che fanno riferimento alla tendenza intrinseca di ciascun composto a subire accelerazioni di fiamma. Ad esempio il metano è stato classificato come *low*, il propano come *medium* e l'etilene come *high*. A queste tre classi di reattività sono stati associati dei valori medi di velocità di fiamma,

definita come il rapporto tra il raggio della nube emisferica dopo l'espansione ed il tempo che il fronte di fiamma impiega a percorrerlo. I valori di queste velocità sono (in m/s):

$40 < S_f < 80$	per la reattività Low
$80 < S_f < 160$	per la reattività Medium
$S_f > 160$	per la reattività High

Con queste velocità di fiamma il modello a pistone è stato risolto numericamente ed i risultati sono riassunti nel diagramma seguente, che fornisce i valori della sovrappressione e della durata della fase positiva adimensionalizzate in funzione della distanza, anch'essa adimensionalizzata, per ciascuna delle tre classi di reattività.

Le grandezze adimensionali utilizzate sono:

$$L_0 = \left(\frac{2}{3} \pi \cdot r_0^3 \cdot \frac{E_c}{P_0} \right)^{1/3} \quad \text{distanza adimensionalizzata}$$

dove:

r_0 = raggio iniziale della nube

E_c = energia sviluppata dalla combustione per unità di volume della miscela. Per le miscele aria-idrocarburi di interesse in concentrazioni stechiometriche, questo valore risulta essere pressochè il medesimo e pari a circa $3.5e6 \frac{J}{m^3}$.

$$PS = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} \quad \text{pressione adimensionalizzata}$$

$$TS = \frac{c_0 t^+}{L_0} \quad \text{durata fase positiva adimensionalizzata}$$

dove:

c_0 = velocità del suono in aria in condizioni standard $\left[\frac{m}{s} \right]$

t^+ = durata della fase positiva di sovrappressione $[s]$

Modello Multi-Energy Method (MEM)

Tale metodo è stato sviluppato da Van Der Berg e Van Wingerden, dei laboratori del TNO, a partire dal 1980 ed è corredato da un sostanzioso numero di esperimenti i quali hanno confermato che solo le zone di una nube maggiormente confinate da ostacoli prendono effettivamente parte ad una eventuale combustione deflagrativa, generando apprezzabili onde d'urto.

Il MEM viene proposto in alternativa al TNT equivalente in quanto l'analisi su un notevole numero di incidenti ha mostrato un'ampia variazione del fattore di efficienza da caso a caso. Per consentire di valutare la sovrappressione generata dall'esplosione di una nube di dimensioni particolari, il TNO ha sviluppato una serie di curve parametriche che mostrano la distribuzione delle proprietà dell'onda d'urto (tipo e valore massimo della sovrappressione statica, valore massimo della sovrappressione dinamica, durata della fase positiva di sovrappressione) in funzione della distanza scalata. Tali curve sono state ottenute con un codice numerico applicato a nubi emisferiche di miscele aria-combustibile in concentrazione stechiometrica, e ad ognuna di esse è stato assegnato un numero (P^*) che corrisponde ad una pressione iniziale (*source strength*), legata implicitamente alla velocità di fiamma.

Rispetto all'approccio convenzionale (che si basa sull'analisi di dispersione e sull'applicazione di modelli di esplosione all'intera massa in zona infiammabile, tenendo conto della reattività dei gas) con il MEM si focalizza l'attenzione su quelle caratteristiche dell'impianto che determinano il congestionamento della nube e l'accelerazione di fiamma (condizioni al contorno), e solo nelle parti maggiormente confinate si applica tale modello.

Il MEM ha i suoi limiti nel fatto che:

- la valutazione delle caratteristiche dell'esplosione (ΔP , t^+ , P_d) è affidata a semplici curve;
- si basa sulle seguenti assunzioni:
 - ◊ simmetria sferica;
 - ◊ propagazione indisturbata dell'onda d'urto;
 - ◊ miscela omogenea con concentrazione stechiometrica;

mentre in realtà esistono:

- effetti altamente direzionali nelle vicinanze dell'esplosione;
- ostacoli che interferiscono con la propagazione dell'onda di sovrappressione;
- la miscela non è omogenea.

Da tutto ciò risulta evidentemente che tale metodo è adatto solo a valutazioni di massima e non pretende di sostituirsi a codici più raffinati. Il suo vantaggio sta nel fatto di essere relativamente semplice. E' evidente che vi sono alcune indeterminazioni per l'applicazione di tale metodo a situazioni reali e per questo sono in corso numerose analisi al fine di:

- identificare le possibili aree di impianto ove è possibile avere esplosione;
- determinare la potenza dell'esplosione principalmente in relazione alle condizioni al contorno;
- discriminare tra sorgente singola e sorgente multipla.

5.8 BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)

Per BLEVE si intende un'esplosione a seguito di una rapida depressurizzazione (solitamente per cedimento catastrofico) di un recipiente in pressione contenente un liquido ad una temperatura sufficientemente superiore a quella di ebollizione, a pressione atmosferica.

Lo scenario tipico di un BLEVE è un serbatoio esposto a delle fiamme libere che, facendo aumentare la temperatura della parete esterna del serbatoio stesso, producono un flash della sostanza contenuta ed un indebolimento della parete del recipiente: il risultato finale potrebbe essere il cedimento della struttura e la liberazione di grossi quantitativi di energia verso l'esterno.

I danni derivanti da un BLEVE sono dovuti (in ordine di importanza):

- emissione di intensa radiazione termica (se il prodotto rilasciato è infiammabile e c'è l'innesco), a cui può seguire il **fireball**;
- proiezione di frammenti, a seguito della rottura del recipiente in più pezzi per la violenta ebollizione del liquido contenuto all'interno;
- onde di pressione, associate alla rapida ebollizione/espansione.

La valutazione dell'energia rilasciata sotto forma di onda d'urto e conferita ai frammenti viene calcolata nel seguente modo:

essa è pari al lavoro di espansione del fluido dalla pressione di rottura alla pressione atmosferica, quindi:

$$E = M(u_r - u_a) = M \int_r^a P \cdot dv = M[(h_r - P_r v_r) - (h_a - P_a v_a)]$$

Dalle condizioni alla rottura si determina:

- l'energia E nota la frazione di evaporato (flash) a pressione atmosferica.

Dalle condizioni al momento del collasso si stabilisce la ripartizione di E tra:

- energia rilasciata sotto forma di onde d'urto (max 30-40%)
- energia conferita (come energia cinetica) ai frammenti

Successivamente la propagazione dell'onda d'urto viene simulata ricavando la quantità di TNT che

rilascia la stessa energia $\left(W_{TNT} = \frac{E}{E_{1KgTNT}} \right)$ e la propagazione dei frammenti in aria viene studiata servendosi della teoria balistica.

5.9 Fireball

Per Fireball si intende una combustione turbolenta a seguito di innesco durante la fase di espansione della nube (vapore + goccioline) prodotta dalla evaporazione a flash.

Per poter stimare il calore irraggiato esternamente da un fireball, occorre determinare:

- dimensioni del fireball (diametro Φ e altezza H);
- durata del fenomeno (T);
- calore sviluppato.

Per risolvere questo tipo di problema esistono due approcci: il primo, più semplice, che consiste nel "congelare" il fenomeno al suo valore massimo, il secondo, decisamente più complesso, consiste nel seguire il fenomeno durante l'evolversi. Mentre per il secondo metodo è necessario l'ausilio di complicati metodi numerici, per il primo è possibile seguire una via di questo tipo:

non si considera il fenomeno come transitorio e ci si riferisce alle massime dimensioni della "palla di fuoco" pensata tangente al suolo

$$F_{\max}; T_{\max} = C_{1,2} \cdot M_f^{c_{1,2}}$$

L'irraggiamento dalla sorgente puntiforme (centro del fireball) vale:

$$I = \cos t \cdot F \cdot H_c \cdot \frac{M_f^{c_3}}{d^2}$$

dove:

C, c = costanti sperimentali

M_f = massa di prodotto che partecipa al fenomeno

F = frazione di calore irraggiata (0.2 - 0.3)

H_c = potere calorifico del prodotto

d = distanza dal centro