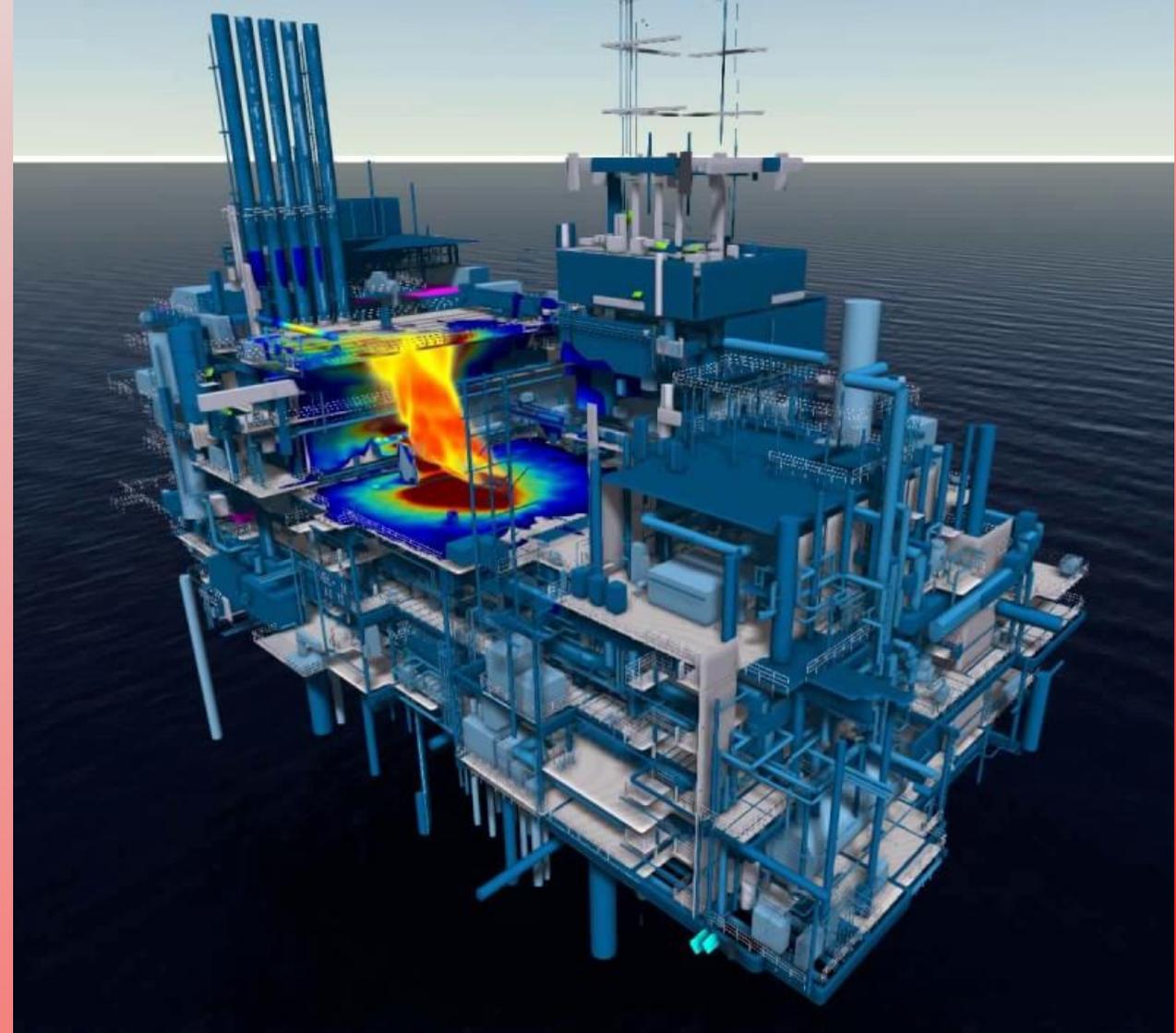




FENOMENI INCIDENTALI DA INCENDIO





Negli impianti industriali — in particolare quelli chimici, petrolchimici, nelle raffinerie e in altri complessi ad alto rischio — gli incendi possono manifestarsi in forme molto diverse, ciascuna con caratteristiche, modalità di propagazione e potenziali conseguenze specifiche. La natura dell'incendio dipende da numerosi fattori, tra cui:

- **Lo stato fisico della sostanza combustibile:** un combustibile può trovarsi allo stato solido, liquido o gassoso, e ciascuna forma comporta differenti modalità di innesco e propagazione. I gas infiammabili, ad esempio, tendono a formare miscele esplosive con l'aria, mentre i liquidi infiammabili possono generare vapori che si accendono con estrema facilità.
- **La dinamica di rilascio del combustibile:** la velocità, la pressione e la direzione del rilascio influenzano fortemente la configurazione dell'incendio. Un rilascio sotto pressione può portare alla formazione di incendi di tipo "jet fire", con fiamme strette e molto energetiche, mentre una fuoriuscita lenta e diffusa può dar luogo a incendi a pozza o a nuvola infiammabile.
- **Le condizioni ambientali:** temperatura, umidità, presenza di vento e altri parametri atmosferici influenzano l'evaporazione del combustibile, la dispersione del gas e la propagazione dell'incendio. In ambienti chiusi, inoltre, l'accumulo di vapori può facilitare l'innesco e incrementare la gravità dell'evento.
- **L'efficienza dei sistemi di contenimento:** la presenza o meno di barriere fisiche, sistemi di drenaggio, bacini di raccolta o dispositivi di emergenza (come valvole di blocco e sistemi antincendio) può determinare in modo decisivo l'evoluzione dell'incidente. Un rilascio non contenuto può facilmente diffondersi e coinvolgere aree più vaste dell'impianto, innescando effetti domino.

In sintesi, la tipologia e la pericolosità di un incendio industriale dipendono da un complesso equilibrio di fattori chimico-fisici, dinamici e ambientali. Una corretta analisi del rischio deve pertanto considerare tutte le possibili forme di incendio, come i **pool fire**, i **jet fire**, i **fireball**, e fenomeni esplosivi correlati, come il **BLEVE** (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) o le **VCE** (Vapor Cloud Explosion), al fine di progettare misure di prevenzione, protezione e risposta realmente efficaci.

Le principali categorie di eventi incidentali sono:

- **Incendio localizzato (fuoco confinato):** limitato a una zona (es. pool fire).
- **Incendio diffuso (fuoco non confinato):** interessa aree più ampie (es. flash fire).
- **Esplosioni:** rilascio violento di energia (BLEVE, VCE).

Fenomeni incidentali legati agli incendi in ambito industriale, con particolare riferimento a:

1. **Jet fire**
2. **BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)**
3. **Flash fire**
4. **Fireball**
5. **Pool fire**
6. **Vapor cloud explosion (VCE)**
7. **Deflagrazione e detonazione**

Il jet fire è il risultato della **combustione continua** di un gas infiammabile (o di un liquido che vaporizza rapidamente) rilasciato in modo pressurizzato, tipicamente attraverso una perdita da una tubazione, una flangia, una valvola o una fessura nel recipiente in pressione. Il fenomeno è assimilabile a un **flusso turbolento reattivo supersonico o subsonico**, con rilascio di calore per radiazione.

Meccanismo fisico-matematico

Regime di rilascio: compressibile, spesso supersonico.

Il getto evolve in **flusso turbolento**: legge del “jet axis decay” con decrescita della velocità e della concentrazione lungo l’asse.

Reazione chimica: ossidazione omogenea in fase gassosa.

Bilancio energetico: 20-30% dell’energia totale viene rilasciata per **irraggiamento termico**.

Equazioni semplificate

• Lunghezza della fiamma:

$$L_f = C \cdot D \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^n$$

dove

- L_f : lunghezza della fiamma
- D : diametro dell’orifizio
- P : pressione interna
- $n \approx 0.5$
- C : coefficiente dipendente dal combustibile



I fenomeni incidentali da incendio ed esplosione nei contesti industriali richiedono una **valutazione preventiva dei rischi**, una **corretta progettazione degli impianti**, l’adozione di **barriere tecniche** e **misure gestionali**. I **modelli di simulazione** (CFD, Phast, ALOHA) e i **criteri normativi** (ATEX, D.Lgs. 105/2015 – Seveso III) sono strumenti essenziali per prevenire e mitigare questi eventi.

Densità di flusso termico irradiato (q):

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot F_{view}$$

dove:

- ε : emissività
- σ : costante di Stefan-Boltzmann
- T : temperatura fiamma ($\approx 1300\text{--}1500\text{ K}$)
- F_{view} : fattore di vista

Effetti

- Gravi danni da **irraggiamento continuo**: perdita di resistenza meccanica degli acciai a $T > 600^\circ\text{C}$.
- Rottura strutture, collasso tubazioni, perdita integrità contenitori.
- Trigger per BLEVE o domino effects.

Prevenzione

- Barriere fisiche (schermi, paratie).
- Isolamento termico passivo e attivo.
- Sistemi di rilevazione e spegnimento automatico.

Mitigazione ingegneristica

- Rivestimenti refrattari (fireproofing) passivi (es. vermiculite, cementizi).
- Sistemi di raffreddamento a sprinkler o nebulizzazione.
- Progettazione delle distanze di sicurezza secondo API 521, EN 1473.

Il **Jet fire** è un **getto di fiamma ad alta velocità**, prodotto dalla combustione di un gas o di un liquido pressurizzato fuoriuscito da un orifizio (per esempio da una tubazione rotta o una flangia difettosa).

Caso studio

- **Piper Alpha (1988)**: perdita da condensato causò jet fire di metano, che compromise strutture portanti e innescò esplosione secondaria.

Caratteristiche

- Tipico di **idrocarburi leggeri** (metano, propano, butano) e **gas combustibili** sotto pressione.
- Ha **forma conica**, simile alla fiamma di un bruciatore.
- Temperatura: fino a **1300-1400°C**.
- **Elevato impatto termico** su strutture metalliche (fenomeni di *thermal weakening*, *buckling* e *collapse*).

Effetti

- Danneggiamento strutturale di serbatoi, tubazioni, supporti.
- Possibile innesco di eventi secondari (BLEVE, collasso strutturale, pool fire).



BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)



Un **BLEVE** si verifica quando un contenitore a pressione che contiene un **liquido sotto il suo punto di ebollizione** si **rompe improvvisamente**, liberando il contenuto che evapora istantaneamente, creando una **esplosione fisica** e, se il contenuto è infiammabile, anche **termica (fireball)**.

Cause

- Riscaldamento del recipiente da parte di un incendio esterno (*external fire*).
- Guasti meccanici o corrosione del serbatoio.
- Sovrappressione non gestita.

Effetti

- **Onda d'urto** (shockwave) meccanica (blast).
- **Fireball** istantanea se il fluido è infiammabile.
- Onda d'urto Fireball con proiezione di frammenti metallici (missili); frammentazione del recipiente (proiettili metallici).
- Danni da radiazione (lethality envelope: $37.5 \text{ kW/m}^2 \rightarrow$ mortalità istantanea).
- Possibili incendi secondari.

Sostanze tipiche

- GPL (butano, propano), ammoniaca anidra, cloro liquido.

Prevenzione - Mitigazione ingegneristica

- Sistemi di raffreddamento (sprinkler o cooling water).
- Sistemi di raffreddamento spray sul vessel.
- Valvole di sicurezza - sovrappressione (PSV).
- Progettazione del serbatoio secondo normative (ASME, PED).
- Barriere di protezione e distanze di sicurezza.
- Progettazione con materiali refrattari.
- Barriere passive e sicurezza a distanza (layouting).



Fondamenti termodinamici

Un BLEVE si verifica quando un contenitore pressurizzato contenente liquido in equilibrio termodinamico con la sua fase vapore si rompe improvvisamente, provocando l'espansione istantanea

Condizioni necessarie

- Contenuto: liquido sotto pressione a $T > T_{\text{ebollizione}}$ atmosferica.
- Riscaldamento esterno ($>200 \text{ }^\circ\text{C}$) \rightarrow indebolimento parete.
- Cedimento meccanico improvviso.

Calcolo della frazione di massa vaporizzata istantaneamente:

- h_{liq} : entalpia del liquido alla T iniziale $x = \frac{h_{liq} - h_{sat}}{h_{vap}}$
- h_{sat} : entalpia a saturazione
- h_{vap} : calore latente di vaporizzazione

Energia liberata:

$$E = m \cdot h_{vap} \cdot \eta$$

- Dove η : efficienza di conversione in lavoro meccanico (tipicamente 2–10%)

Normativa tecnica

- API 521 (pressure-relieving systems).
- EN 13445 (recipiente a pressione).
- Linee guida Seveso III (D.Lgs. 105/2015).

È una **fiammata istantanea** che si sviluppa all'interno di una **nuvola di vapori infiammabili** che ha raggiunto i **limiti di infiammabilità** e trova una sorgente di innesco. - ccensione istantanea di una **nube infiammabile** che ha raggiunto una concentrazione tra i LEL/UEL (Lower/Upper Explosive Limits). È un fenomeno **non confinato**, senza onda d'urto, ma ad alto impatto termico.

Caratteristiche

- Dura da frazioni di secondo a pochi secondi.
- Non produce onda d'urto.
- Può essere **invisibile** (es. metano).
- È **altamente letale** per chi si trova all'interno del volume infiammato.

Parametri critici

- Combustibile: gas leggeri, VOC, vapori da serbatoi.
- Condizioni atmosferiche stabili → dispersione ridotta.
- Ritardo tra rilascio e accensione.

Effetti e Conseguenze

- Ustioni gravi a persone all'interno della nube.
- Danni secondari da innesco di altre sostanze.
- Nessuna onda d'urto, ma effetti termici estesi.

Prevenzione

- Monitoraggio dei gas (rilevatori LEL).
- Contenimento delle perdite.
- Ventilazione forzata.

Modellazione

- Modelli Gaussiani per la dispersione (es. ALOHA, PHAST).
- Analisi delle concentrazioni in funzione della distanza.



Una **palla di fuoco** (fireball) si genera quando una nube di vapori infiammabili si incendia **istantaneamente** formando una sfera di fuoco che si solleva rapidamente. Fenomeno transitorio in cui un vapore infiammabile rilasciato si accende **istante per istante** formando una sfera di fiamma, che si espande e solleva.

Caratteristiche

- Durata breve (1–10 s).
- Temperatura: 800–1200°C.
- Tipica nei BLEVE ma anche in esplosioni di gas rilasciati istantaneamente.

Effetti

- Radiazione termica intensa (ustioni anche a distanza).
- Distruzione di strutture vicine.





Il **modello TNO** per il **fireball** è un modello sviluppato dal **Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO)** per stimare gli effetti termici di una **palla di fuoco** (fireball) che si genera in seguito a eventi incidentali, come:

- Rottura di serbatoi contenenti gas o liquidi infiammabili,
- BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion),
- Rottura di pipeline ad alta pressione

Il modello TNO: caratteristiche principali

Il modello TNO è **semi-empirico** e si basa su dati sperimentali raccolti da incidenti reali e test controllati. Fornisce **stime conservative** per:

1. **Diametro massimo del fireball**
2. **Altezza della palla di fuoco**
3. **Durata dell'incendio**
4. **Flusso termico radiante ricevuto a una certa distanza**
5. **Frazione della massa bruciata che contribuisce alla radiazione**

Equazioni chiave del modello TNO

Sono utilizzate formule del tipo:

Diametro del fireball:

$$D = k_1 \cdot m^{1/3}$$

dove:

- DDD: diametro massimo del fireball (m)
- mmm: massa bruciata (kg)
- k_1 : coefficiente empirico (tipicamente tra 5 e 7)

Durata del fireball:

$$t = k_2 \cdot m^{1/3}$$

dove t è il tempo in secondi e k_2 è un altro coefficiente empirico.

Flusso termico radiante:

$$q = \chi \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot F_v$$

dove:

- χ : frazione della massa che partecipa alla combustione radiante
- ϵ : emissività
- σ : costante di Stefan-Boltzmann
- T: temperatura del fireball (tipicamente 1200–1800 K)
- F_v : fattore geometrico di visibilità del fireball dal punto considerato



Il **modello CCPS** (Center for Chemical Process Safety) è un **modello empirico** alternativo al TNO per la **valutazione degli effetti termici da fireball**, sviluppato negli Stati Uniti nell'ambito delle **Linee Guida per l'analisi quantitativa del rischio (Quantitative Risk Assessment - QRA)**.



Modello CCPS per il fireball

Il modello CCPS fornisce stime **più semplici e conservative**, pensate per applicazioni rapide nell'ambito del **risk assessment industriale**.

Utilizza relazioni empiriche per stimare:

1. **Diametro della palla di fuoco**
2. **Durata del fenomeno**
3. **Altezza della palla di fuoco**
4. **Flusso termico in funzione della distanza**



Formule principali

◆ **Diametro del fireball:** $D = 5.8 \cdot m^{1/3}$

dove:

- DDD: diametro massimo del fireball in metri
- mmm: massa del combustibile bruciata (kg)



Quando usare il CCPS

- Quando serve una **valutazione rapida** dei rischi (es. studio di fattibilità, pre-FEED).
- In **QRA** per confrontare diversi scenari con pochi dati.
- Per ottenere una **stima conservativa** degli effetti termici.

◆ **Durata della palla di fuoco:**

$$t = 0.45 \cdot m^{1/3}$$

dove:

- t: durata in secondi

◆ **Altezza del fireball dal suolo:**

$$H = 1.9 \cdot D$$

◆ **Flusso termico radiante:**

$$q = \chi \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot F_v$$

Dove i parametri sono simili al modello TNO:

- χ : frazione di energia rilasciata come radiazione (tipicamente 0.2–0.35)
- ϵ : emissività (tipicamente 0.5–0.9)
- T: temperatura (circa 1300–1500 K)
- F_v : fattore geometrico di visibilità



Confronto TNO vs CCPS

Aspetto	Modello TNO	Modello CCPS
Origine	Olanda (Netherlands TNO)	USA (AIChE/CCPS)
Finalità	Studi dettagliati, Seveso	Analisi QRA, ingegneria rapida
Complessità	Maggiore, più parametri	Più semplice
Accuratezza	Più preciso su scala reale	Più conservativo
Applicazione	Rapporto sicurezza, impatti	QRA, screening preliminari

Dati tipici usati nel modello

Parametro	Valore tipico
Temperatura del fireball	1200–1800 K
Emissività	0.2–0.9
Frazione radiante χ \chi	0.15–0.35 (tipico: 0.25)
Durata fireball	5–30 s
Altezza dal suolo	$\sim 1.5 \times$ diametro fireball

Esempio pratico

Un serbatoio da **10 tonnellate** di GPL esplose generando un fireball:

- Massa bruciata: 10.000 kg
- Diametro: circa $D = 6.3 \cdot (10,000)^{1/3} \approx 136 \text{ m}$
- Durata: $t \approx 2.6 \cdot (10,000)^{1/3} \approx 56 \text{ s}$
- Flusso termico: calcolato in funzione della distanza e dei parametri termici

Applicazioni

Il modello TNO è usato in:

- **Valutazioni del rischio industriale**
- **Studi di impatto ambientale**
- **Progettazione della sicurezza antincendio**
- **Normative Seveso e rapporti di sicurezza**

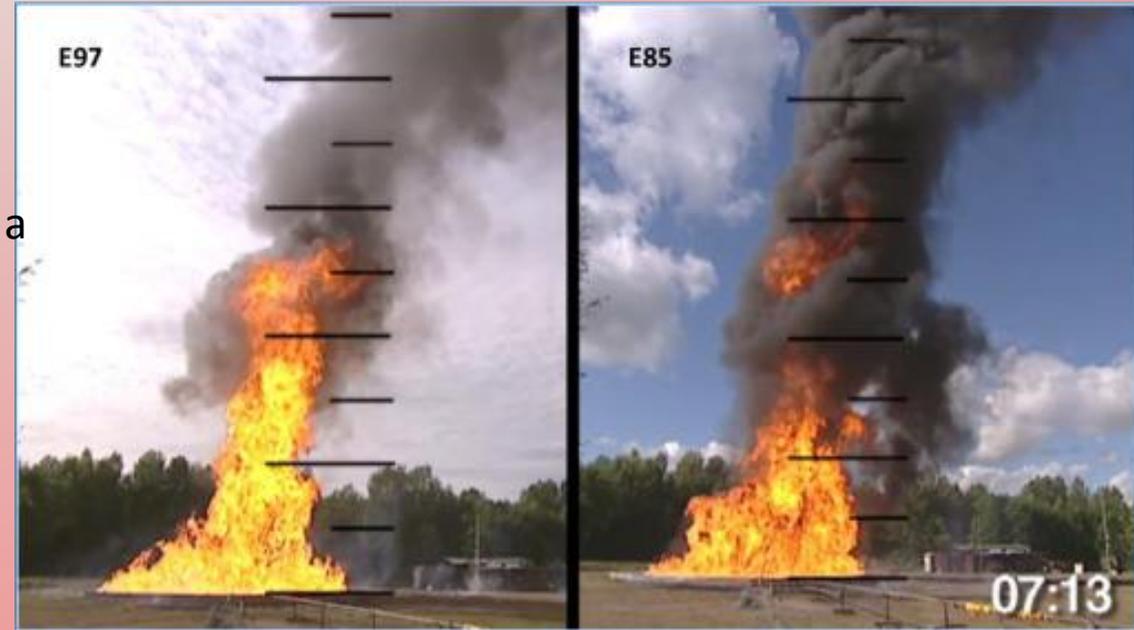


Meccanismo

Incendio superficiale su una pozza di liquido infiammabile. La combustione avviene alla **interfaccia liquido-aria**, con propagazione. È l'incendio di un **liquido infiammabile** che si è raccolto in una **pozza** a seguito di una perdita, su una superficie contenitiva.

Caratteristiche

- Durata lunga.
- Temperatura media: 800–1100°C.
- Superficie di fiamma ampia e radiante.



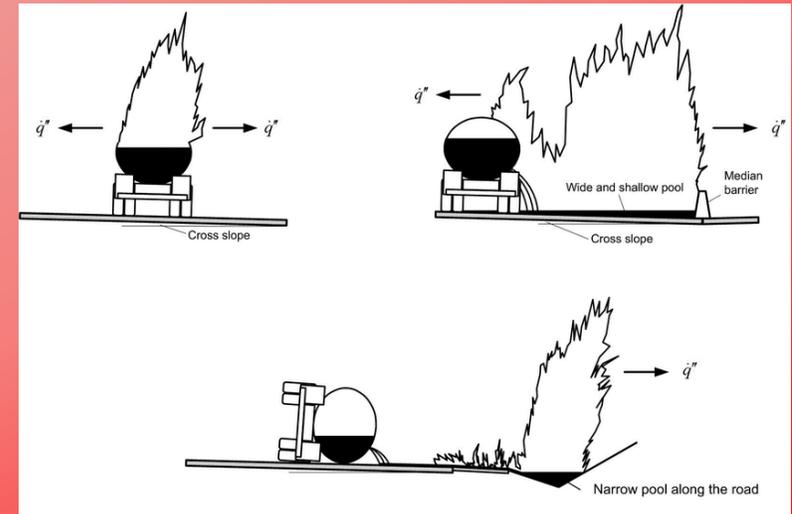
Thermal exposure from large scale ethanol fuel pool fires

Effetti

- Danni per **irraggiamento termico**.
- Possibile compromissione di strutture portanti o serbatoi adiacenti.

Prevenzione

- Bacini di contenimento e canaline.
- Sistemi di raccolta e drenaggio.
- Sistemi fissi di estinzione (schiuma, acqua nebulizzata).



1. Tasso di rilascio di calore (Heat Release Rate, HRR)

Una delle grandezze fondamentali è la HRR, stimabile con:

Dove:
$$\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot \Delta H_c$$

- \dot{Q} : tasso di rilascio di calore [W]
- \dot{m}_f : velocità di evaporazione del combustibile [kg/s]
- ΔH_c : potere calorifico del combustibile [J/kg]

Le equazioni tipiche
che descrivono un
pool fire riguardano:

2. Velocità di evaporazione del combustibile

Per un liquido in combustione su una superficie, la velocità di evaporazione può essere stimata da:

$$\dot{m}_f'' = \frac{\rho_v \cdot D_{AB}}{\delta} \cdot \ln(1 + B)$$

oppure in forma semplificata:

$$\dot{m}_f'' \approx \frac{k_g}{c_p} \cdot \ln(1 + B)$$

- Dove:
- \dot{m}_f'' : flusso di massa evaporato per unità di area [kg/m² · s]
 - D_{AB} : coefficiente di diffusione del vapore del combustibile nell'aria [m²/s]
 - B : numero di Spalding per la massa $B = \frac{Y_{v,s} - Y_{v,\infty}}{1 - Y_{v,s}}$
 - k_g : conducibilità termica del gas [W/m · K]
 - c_p : calore specifico del gas a pressione costante

3. Diametro equivalente della pozza

$$D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{dove } A \text{ è l'area della pozza.}$$

4. Altezza della fiamma

Un'espressione empirica comune per stimare l'altezza della fiamma L_f :

$$L_f = C \cdot D \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_a c_p T_a \sqrt{g D^5}} \right)^{2/5}$$

Oppure, forma semplificata (Heskestad):

$$L_f = 0.235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 \cdot D$$

Dove:

- L_f : altezza della fiamma [m]
- \dot{Q} : tasso di rilascio di calore [kW]
- D : diametro della pozza [m]

5. Irraggiamento termico a distanza

Per stimare l'irraggiamento termico a una certa distanza r dalla fiamma:

$$q'' = \chi_r \cdot \frac{\dot{Q}}{4\pi r^2}$$

Dove:

- q'' : flusso termico incidente [kW/m²]
- χ_r : frazione del calore totale rilasciato che viene irradiato (tipicamente 0.15 – 0.4)
- r : distanza dalla fiamma [m]
- D : diametro della pozza [m]

6. Tempo di combustione della pozza

Dove:

$$t_b = \frac{M}{\dot{m}_f} = \frac{\rho \cdot V}{\dot{m}_f}$$

- t_b : durata del pool fire [s]
- M : massa totale del liquido [kg]
- V : volume della pozza [m³]
- ρ : densità del liquido [kg/m³]

POOL FIRE

🔥 ESEMPIO PRATICO:

Rilascio di 2 m³ di benzina su un piazzale asfaltato pianeggiante, con pozza non confinata.

📄 Dati di partenza:

- Volume del liquido:**

$$V = 2 \text{ m}^3$$

- Spessore medio della pozza:**

$h = 0.015 \text{ m}$ (valore tipico per liquidi su superfici piane)

- Formula:**

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h}}$$

📊 CALCOLO DETTAGLIATO

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 2}{\pi \cdot 0.015}} = \sqrt{\frac{8}{0.04712}} = \sqrt{169.77}$$

$$D \approx 13.03 \text{ m}$$

✅ RISULTATO FINALE

Il diametro della pozza generata da 2 m³ di benzina sarà di circa **13 metri**.

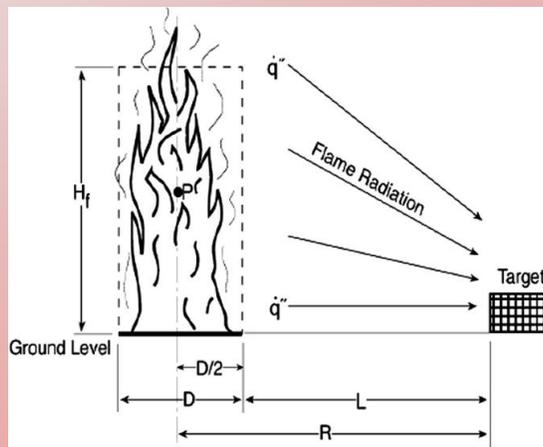
📌 ALTRI VALORI UTILI

- Area della pozza:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{13.03}{2}\right)^2 \approx 133.4 \text{ m}^2$$

- Durata stimata del pool fire (approssimazione, dipende dal tasso di evaporazione e dalla combustione):

- Per benzina: circa 2–4 minuti, variabile con vento, temperatura, e umidità



🔥 2. FLUSSO TERMICO IRRADIATO

Il flusso termico ricevuto a distanza R è: $q = \chi \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot F_v$

Ma per pool fire si usa una semplificazione empirica:

$$q = \frac{\chi \cdot \dot{Q}}{4\pi R^2}$$

dove:

- $\chi = 0.15 \div 0.35$ (frazione radiante, per benzina ≈ 0.2)
- \dot{Q} : potenza termica totale $\dot{Q} = m \cdot \Delta H_c / t$

Assumiamo:

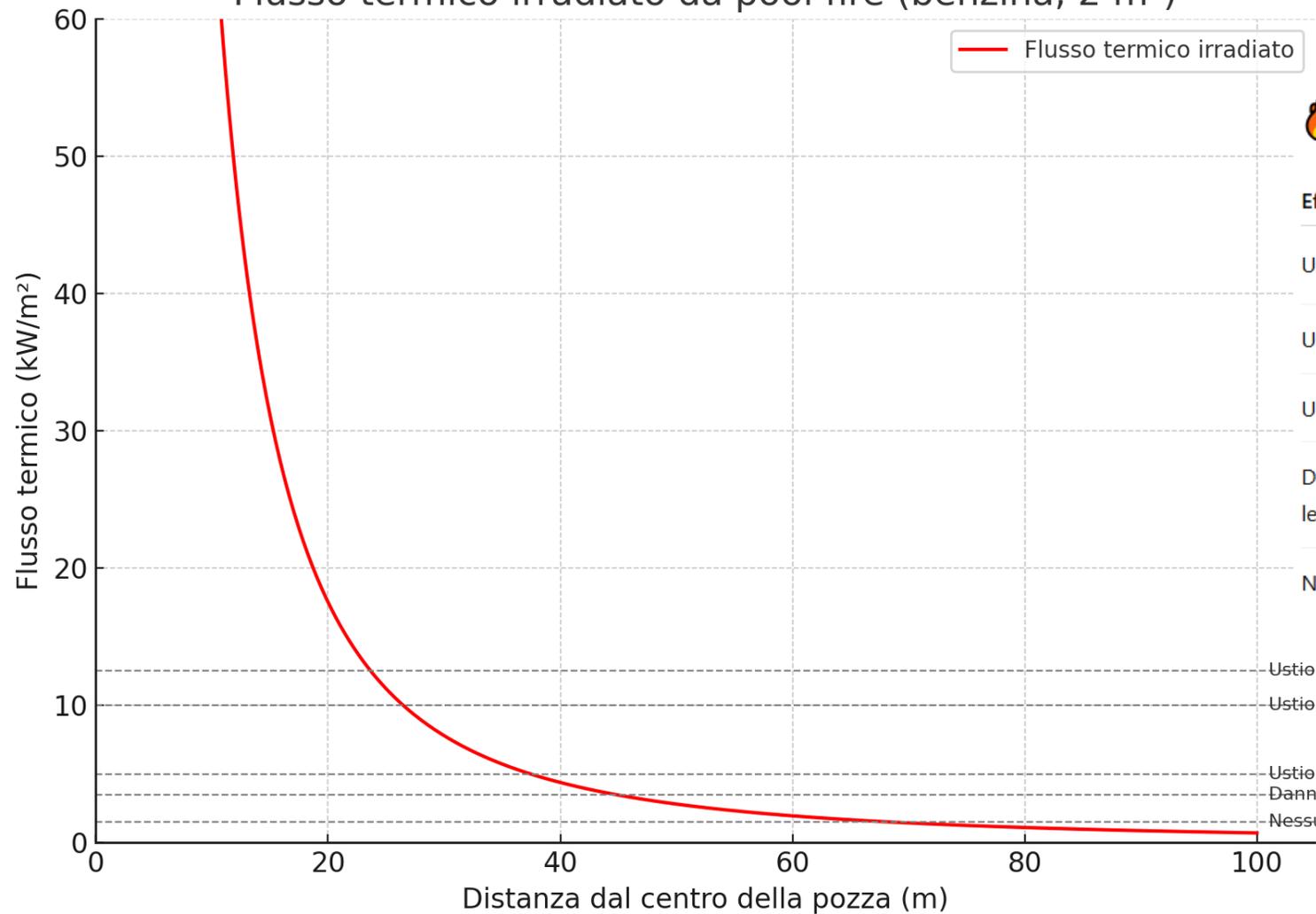
- Massa $m = 2 \text{ m}^3 \cdot 750 \text{ kg/m}^3 = 1500 \text{ kg}$
- Potere calorifico benzina $\Delta H_c = 44 \text{ MJ/kg}$
- Durata combustione stimata: 150 s

$$\dot{Q} = \frac{1500 \cdot 44 \cdot 10^6}{150} = 440 \cdot 10^6 \text{ W} = 440 \text{ MW}$$

$$q(R) = \frac{0.2 \cdot 440 \cdot 10^6}{4\pi R^2} = \frac{88 \cdot 10^6}{12.566 \cdot R^2}$$

$$q(R) \approx \frac{7 \cdot 10^6}{R^2} \quad (\text{W/m}^2)$$

Flusso termico irradiato da pool fire (benzina, 2 m³)



🔥 3. DISTANZE DI DANNO TERMICO

Effetto	Flusso q (kW/m ²)	Distanza stimata
Ustioni fatali (>60 s)	12.5	$R = \sqrt{\frac{7 \cdot 10^6}{12,500}} \approx 23.7$ m
Ustioni gravi (30 s)	10	$R \approx 26.5$ m
Ustioni leggere (20 s)	5	$R \approx 37.4$ m
Danno strutture leggere (PVC, legno)	3.5	$R \approx 44.7$ m
Nessun effetto	<1.5	$R > 68$ m

Ustioni fatali (>60 s) (12.5 kW/m²)
 Ustioni gravi (30 s) (10 kW/m²)
 Ustioni leggere (20 s) (5 kW/m²)
 Danni a strutture leggere (3.5 kW/m²)
 Nessun effetto (1.5 kW/m²)

✅ RIEPILOGO

- **🔵 Diametro pozza:** 13 m
- **🔥 Altezza fiamma:** 65 m
- **💣 Potenza termica:** 440 MW
- **🌡️ Flusso termico > 10 kW/m²** fino a $\approx 25\text{--}27$ m
- **🏠 Danni a strutture leggere** fino a ≈ 45 m



Una **VCE (Vapor Cloud Explosion)** è un'esplosione che si verifica quando una **nube di gas o vapore infiammabile** si miscela con l'aria, si disperde, si accende e **deflagra o detona**, generando:

- Onda d'urto (sovrapressione),
- Fiamme rapide e radiazione termica,
- Potenziale distruttivo molto elevato (più di un incendio localizzato).

Meccanismo

Esplosione deflagrante in una nube di vapori infiammabili, confinata parzialmente o disturbata da ostacoli (effetto "turbulent combustion"). Si sviluppa onda d'urto e distruzione massiccia.

Caratteristiche

- Richiede **confinamento parziale** (ostacoli, strutture).
- Può causare **danni catastrofici** anche a centinaia di metri.
- Produce **onda d'urto** e **fronte di fiamma** ad alta velocità.

Differenza da BLEVE

- BLEVE = esplosione fisica di recipiente.
- VCE = esplosione chimica in atmosfera.

Modelli e parametri numerici utilizzati nella progettazione

- **TNT equivalency**: confronta l'energia liberata dalla nube con una quantità equivalente di tritolo.
- **Multi-Energy Method (MEM) o Baker-Strehlow-Tang model**: stimano la pressione di picco e il danno atteso in funzione del grado di congestione e confinamento.
- **Overpressure thresholds**:
 - 0,03 bar → rottura vetri
 - 0,1 bar → danni strutturali lievi
 - 0,3 bar → collasso strutture leggere
 - 1 bar → danni gravi a impianti industriali



I principali parametri progettuali da considerare nell'analisi e nella prevenzione di una VCE sono:

1. Tipo e quantità di sostanza rilasciata

- **Composizione chimica:** idrocarburi leggeri (come propano, butano, etilene, ecc.) sono molto più suscettibili a VCE.
- **Massa totale rilasciata:** influenza le dimensioni della nuvola e l'energia potenziale dell'esplosione.
- **Volatilità:** più è volatile una sostanza, più facilmente forma una nuvola esplosiva.

2. Condizioni del rilascio

- **Pressione e temperatura del rilascio:** un rilascio ad alta pressione genera una nube più estesa e turbolenta.
- **Velocità del rilascio:** influisce sul grado di dispersione e di miscelazione con l'aria.
- **Orientamento del rilascio:** orizzontale, verticale, direzionale (influenza la geometria della nube).

3. Dispersione della nuvola

- **Stabilità atmosferica:** condizioni meteorologiche (vento, turbolenza, temperatura) influenzano la forma, l'estensione e la concentrazione della nube.
- **Topografia e ostacoli:** strutture, tubazioni e muri possono ostacolare la dispersione, aumentando la turbolenza e il potenziale esplosivo.

4. Estensione della miscela infiammabile

- La porzione della nuvola che si trova tra il **Lower Flammable Limit (LFL)** e l'**Upper Flammable Limit (UFL)** è quella potenzialmente esplosiva.
- La "**mass fraction within flammable range**" è un parametro chiave per calcolare l'energia potenziale della VCE.

5. Energia e posizione dell'innesco

- Una sorgente di ignizione può essere una scintilla, una superficie calda, un arco elettrico, o una fiamma.
- Più l'innesco è **centrale** rispetto alla nuvola, maggiore è la probabilità di un'esplosione devastante.

6. Grado di confinamento e congestione

- È il parametro più critico. Più una nube è **congestionata** (es. presenza di serbatoi, tubazioni, strutture metalliche), maggiore è la turbolenza, e quindi la **velocità di combustione**.
- Il confinamento può anche **limitare la dispersione**, aumentando la concentrazione e quindi il rischio di esplosione.

7. Indice di reattività chimica

- Alcune sostanze hanno una **reattività elevata** che accelera la transizione da deflagrazione a detonazione (DDT).
- Parametri come la **velocità di fiamma**, **pressione di picco** e **energia di attivazione** sono fondamentali nella modellazione.



VCE (Vapor Cloud Explosion)

Una **VCE (Vapor Cloud Explosion)** è un'esplosione che si verifica quando una **nube di gas o vapore infiammabile** si miscela con l'aria, si disperde, si accende e **deflagra o detona**, generando:

- Onda d'urto (sovrapressione),
- Fiamme rapide e radiazione termica,
- Potenziale distruttivo molto elevato (più di un incendio localizzato).

Meccanismo

Esplosione deflagrante in una nube di vapori infiammabili, confinata parzialmente o disturbata da ostacoli (effetto "turbulent combustion"). Si sviluppa onda d'urto e distruzione massiccia.

Caratteristiche

- Richiede **confinamento parziale** (ostacoli, strutture).
- Può causare **danni catastrofici** anche a centinaia di metri.
- Produce **onda d'urto** e **fronte di fiamma** ad alta velocità.

Differenza da BLEVE

- BLEVE = esplosione fisica di recipiente.
- VCE = esplosione chimica in atmosfera.



COS'È IL TNT EQUIVALENTE?

Il **TNT equivalente** serve per confrontare l'energia rilasciata da una VCE con quella di un'esplosione convenzionale di **TNT (trinitrotoluene)**.

Questo consente di:

- Usare tabelle standard di **sovrapressione vs distanza** (curve di Sachs),
- Stimare i danni a edifici, persone, impianti.



FORMULA GENERALE

$$\text{Massa equivalente di TNT} = \eta \cdot m \cdot \Delta H_c / \Delta H_{TNT}$$

dove:

- m : massa del gas disperso (kg)
- ΔH_c : potere calorifico inferiore del gas (kJ/kg)
- ΔH_{TNT} : energia specifica del TNT ≈ 4500 kJ/kg
- η : efficienza dell'esplosione (tipicamente **0.01–0.10**, massimo 0.1)



ESEMPIO PRATICO

Rilascio di 1000 kg di propano (C_3H_8) in atmosfera, formazione nube esplosiva.

- Dati:
- $m = 1000$ kg
 - $\Delta H_c = 46.4 \cdot 10^3$ kJ/kg
 - $\Delta H_{TNT} = 4500$ kJ/kg
 - $\eta = 0.05$ (efficienza media per VCE)



Calcolo:

$$\text{TNT eq.} = \frac{0.05 \cdot 1000 \cdot 46400}{4500} = \frac{2.32 \cdot 10^6}{4500} \approx \mathbf{515 \text{ kg TNT}}$$



VCE (Vapor Cloud Explosion)

EFFETTI IN FUNZIONE DELLA DISTANZA

Con **515 kg TNT equivalenti**, si può usare la **legge di scala cubica** per stimare la **sovrapressione**:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (\text{scala di Sachs})$$

dove:

- Z : distanza scalata ($m/kg^{1/3}$)
- R : distanza reale (m)
- W : massa TNT equivalente (kg)

RIEPILOGO

- VCE da 1000 kg propano → **~515 kg TNT**
- Onda d'urto letale fino a **20–30 m**
- Danni significativi fino a **60–100 m**

Distanza RR (m)	Z ($m/kg^{1/3}$)	Sovrapressione $\Delta P \backslash \Delta P$ (bar)	Effetti
20	1.56	~0.3	Danni gravi a strutture
40	3.1	~0.1	Danni moderati, finestre rotte
60	4.6	~0.05	Lievi danni
100	7.8	~0.01	Nessun danno significativo

La **scala di Sachs** (o **legge di scala cubica**) è una legge empirica che consente di **scalare gli effetti di un'esplosione** (come sovrapressione, durata dell'onda, ecc.) in funzione della **massa di esplosivo** usato. È molto utilizzata per confrontare gli effetti di esplosioni diverse usando un'esplosione standard: **quella del TNT**.

DEFINIZIONE

La distanza scalata Z (in $m/kg^{1/3}$) è data da:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

dove:

- R : distanza reale dal punto dell'esplosione (m)
- W : massa equivalente di esplosivo (in **kg di TNT**)
- Z : distanza ridotta (o distanza scalata di Sachs)

Perché è utile?

- Permette di **confrontare esplosioni di diversa potenza** su base comune.
- Utilizzando tabelle o curve sperimentali (es. sovrapressione vs Z), puoi stimare:
 - Sovrapressione di picco
 - Durata dell'impulso
 - Danni previsti a persone e strutture



VCE (Vapor Cloud Explosion)

◆ Esempio 1:

Esplosione da 1000 kg TNT, distanza reale: 50 m

$$Z = \frac{50}{(1000)^{1/3}} = \frac{50}{10} = 5 \text{ m/kg}^{1/3}$$

Poi si consulta una **tabella di sovrappressione vs Z**. Per $Z = 5$:

- Sovrapressione ≈ 0.07 bar
- → **danni leggeri a strutture, rischio per vetri**

◆ Esempio 2:

Hai un'esplosione da 125 kg TNT e vuoi sapere a **che distanza** si produce una sovrappressione di 0.3 bar (sufficiente a causare danni gravi).

Dalla tabella sai che:

- $\Delta P = 0.3$ bar $\rightarrow Z = 1.8 \text{ m/kg}^{1/3}$

$$R = Z \cdot W^{1/3} = 1.8 \cdot (125)^{1/3} = 1.8 \cdot 5 = \mathbf{9 \text{ m}}$$

→ A **9 metri** da 125 kg TNT ottieni 0.3 bar di sovrappressione.



EFFETTI TIPICI (valori indicativi)

Z (m/kg ^{1/3})	Sovrapressione ΔP \Delta P	Effetti
1	0.5–1.0 bar	Collasso strutture pesanti
2	0.3 bar	Crollo muri, lesioni gravi
3–4	0.1 bar	Rottura vetri, danni lievi
6–7	0.02–0.05 bar	Danni minimi
>10	<0.01 bar	Nessun danno



RIEPILOGO

- La **scala di Sachs** è una tecnica di **normalizzazione delle distanze** per esplosioni.
- È usata per stimare **danni da VCE** tramite il confronto con **esplosioni di TNT**.
- Funziona solo per **esplosioni in aria e ambiente aperto**, non per esplosioni in contenitori chiusi.



Deflagrazione

- Reazione di combustione **subsonica**.
- Fronte di fiamma < 340 m/s.
- Tipica nei **VCE** e **flash fire**.

Detonazione

- Reazione **supersonica** con **onda d'urto accoppiata** al fronte di fiamma.
- Velocità: 1500–2000 m/s.
- Altamente distruttiva, ma rara in impianti civili.

Parametro	Deflagrazione	Detonazione
Velocità fronte	Subsonica (< 340 m/s)	Supersonica (> 1500 m/s)
Energia liberata	Media	Elevata
Tipicità	VCE, Flash Fire	Esplosivi solidi, mix critici
Pressione	bassa (1.2–1.5 bar)	elevata (fino a 20–30 bar)

In sintesi, i principali **parametri progettuali** da considerare per una VCE sono:

Categoria	Parametri specifici
Sostanza	Composizione, massa, volatilità
Rilascio	Pressione, temperatura, velocità, geometria
Dispersione	Stabilità atmosferica, vento, topografia
Nuvola infiammabile	Estensione (tra LFL e UFL), concentrazione media
Innesco	Energia, posizione rispetto alla nuvola
Congestione e confinamento	Ostacoli, layout impianto, grado di turbolenza
Reattività chimica	Velocità di fiamma, pressione di picco, sensibilità
Danni attesi	Sovrapressione, raggio d'impatto, TNT equivalente

GRANDI INCIDENTI STORICI

Texas City (2005)

- Esplosione VCE causata da rilascio isopentano. 15 morti, oltre 170 feriti.
- Cause: valvole bypassate, sistema raffreddamento non attivo.

Buncefield (UK, 2005)

- Overflow di benzina → nuvola vapori → VCE.
- Onda d'urto misurata oltre 500 m.
- Lezione: sensori LEL guasti e assenza di allarme visivo.

Feyzin (1966)

- BLEVE serbatoio GPL.
- Onda d'urto distruttiva + fireball.
- Trigger: jet fire da tubazione.

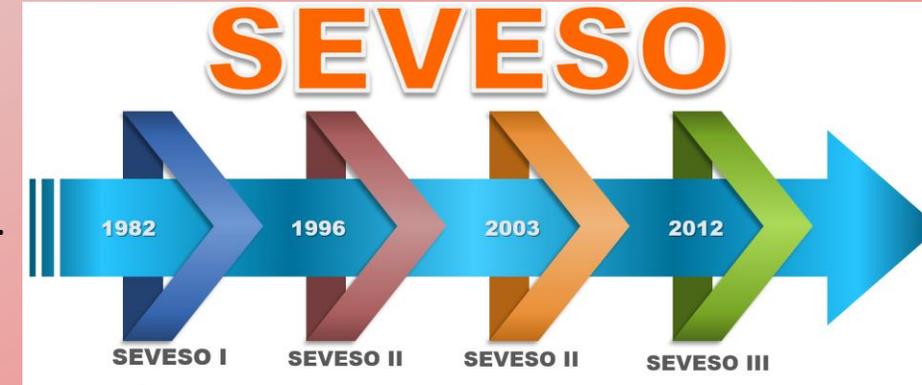
L'ingegneria della sicurezza antincendio industriale si fonda su un vasto corpo normativo, integrato da codici tecnici e raccomandazioni di enti internazionali.

Normativa europea e italiana

- **Direttiva Seveso III** (Dir. 2012/18/UE) – recepita in Italia con **D.Lgs. 105/2015**:
 - Obbliga impianti a rischio di incidente rilevante a implementare un **SGS-PIR**.
 - Prevede l'identificazione di scenari incidentali (jet fire, BLEVE, VCE).
- **D.M. 3 agosto 2015 (Codice di Prevenzione Incendi)**:
 - Metodo prestazionale con scenari tipo (*scenari di progetto*).
- **UNI EN 1127-1**: atmosfere esplosive – prevenzione di esplosioni.
- **UNI EN 14491**: mitigazione dell'esplosione per polveri combustibili.

Codici internazionali

- **NFPA (USA)**:
 - NFPA 30 (Liquidi infiammabili e combustibili)
 - NFPA 59A (Impianti GNL)
 - NFPA 68/69 (mitigazione dell'esplosione)
- **API (American Petroleum Institute)**:
 - API 521: sistemi di scarico e prevenzione sovrappressioni
 - API 650/620: progettazione serbatoi
- **ISO 23251 (ex API 521)**: per pressure relief systems
- **CCPS Guidelines (AIChE)**: best practice ingegneristiche per la gestione dei rischi.





Mitigazione passiva

- **Barriere di contenimento:** bacini, vasche, canaline per liquidi infiammabili.
- **Fireproofing:** materiali intumescenti o cementizi per ritardare il collasso strutturale.
- **Layouting e separazioni:** distanze di sicurezza, compartimentazioni.
- **Blowout panels:** pannelli di sfogo per ambienti chiusi.

Mitigazione attiva

- **Sistemi di rilevamento:** IR/UV per fiamme, catalitici per gas (LEL).
- **Sistemi di soppressione:**
 - Schiuma ad alta espansione per pool fire.
 - Inertizzazione con azoto o CO₂ per atmosfere esplosive.
 - Acqua nebulizzata ad alta pressione.
- **ESD Systems:** Emergency Shutdown automatici per valvole e pompe.
- **Vent & flare systems:** bruciatori di emergenza, torchio.

Sistemi di raffreddamento

- **Deluge systems:** pioggia ad alta portata su serbatoi e pipe rack.
- **Sprinkler a zone:** per protezione selettiva.
- **Film d'acqua su pareti:** prevenzione BLEVE.



L'ingegneria moderna della sicurezza industriale fa largo uso di **modellazione predittiva**:

CFD – Computational Fluid Dynamics

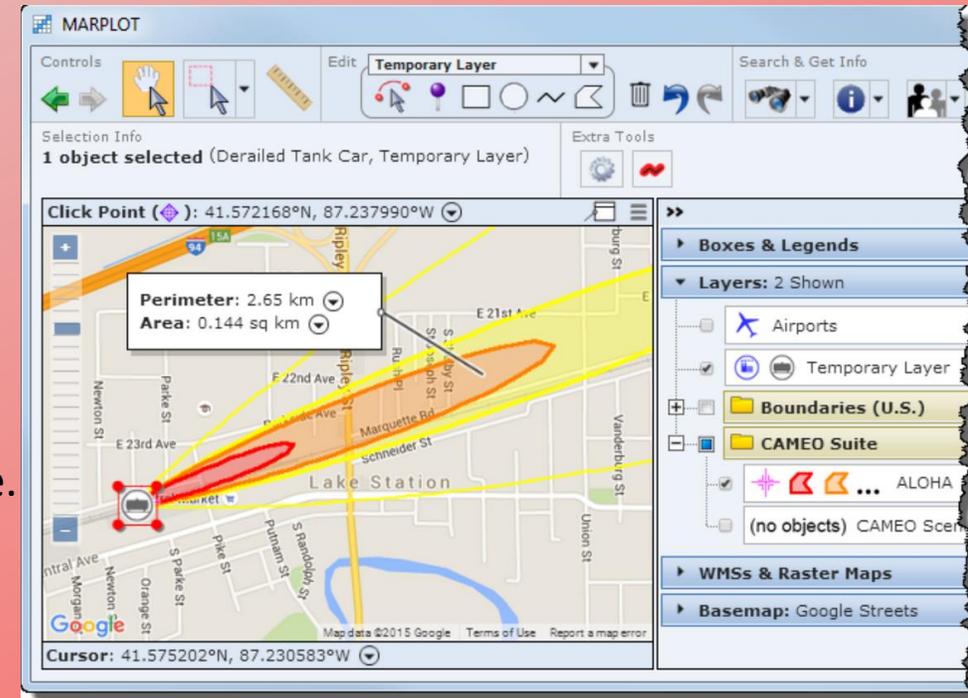
- Codici: **ANSYS Fluent, OpenFOAM, Fire Dynamics Simulator (FDS)**.
- Utilizzo per:
 - Evoluzione di nubi infiammabili.
 - Profilo termico e dinamica delle fiamme (es. jet fire).
 - Studio dell'irraggiamento termico su superfici critiche.

Modelli specialistici

- **PHAST (DNV)**: dispersione, incendio, esplosione.
- **ALOHA (EPA)**: rilascio chimici, incendio, BLEVE.
- **FLACS**: simulazione esplosioni (VCE), validato per esplosioni urbane.

Strumenti di supporto alla progettazione

- **TNO Multi-Energy Model**: per VCE
- **TNT equivalent models**: analisi semplificata dell'onda d'urto.
- **Probit Models**: per la stima delle probabilità di letalità (correlate a sovrappressione o radiazione termica).



DOMINO EFFECT

Definizione

Un **domino effect** si verifica quando un evento iniziale (es. pool fire, jet fire) innesca eventi secondari a cascata (esplosioni, BLEVE, ulteriori incendi) in una configurazione impiantistica interconnessa.

Analisi sistemica

- **Approccio bow-tie o event tree analysis (ETA).**
- Modellazione probabilistica (Fault Tree Analysis) + simulazione degli effetti.
- Norme: allegato 3 del D.Lgs. 105/2015 → obbligo di analisi dei rischi domino.

Misure preventive

- Segmentazione fisica.
- Sistemi ESD ridondanti.
- Layout studiato per isolare unità critiche.

CRITERI ALARP E ACCETTABILITÀ DEL RISCHIO

Approccio ALARP

Il rischio deve essere ridotto "As Low As Reasonably Practicable":

- Basato su un equilibrio tra costi, benefici e rischio residuo.
- Utilizza curve FN (frequenza vs numero di fatalità).
- Criteri accettabilità: $<10^{-5}$ /anno per singolo individuo; $<10^{-3}$ per rischio collettivo.

Strumenti di valutazione

- **QRA (Quantitative Risk Assessment):** integra frequenze e conseguenze.
- **Indice di rischio individuale (IR)** e rischio sociale.
- Strumenti: @RISK, RiskSpectrum, BowTieXP.

Cos'è l'ESD?

L'**ElectroStatic Discharge** è una **scarica improvvisa di elettricità** tra due oggetti con potenziale elettrico differente, causata da un contatto diretto o da un campo elettrostatico. Può verificarsi, ad esempio, quando una persona accumula carica camminando su un tappeto e poi tocca un componente elettronico.

Anche se **l'energia può sembrare minima** (e spesso l'utente non avverte nulla), può essere **sufficiente a danneggiare irreversibilmente** circuiti elettronici sensibili.

A cosa servono i sistemi ESD?

I **sistemi ESD** servono a:

- **Prevenire** la generazione e l'accumulo di cariche elettrostatiche.
- **Scaricare in sicurezza** le cariche accumulate verso terra.
- **Proteggere** dispositivi elettronici, ambienti e operatori dai danni da ESD.

Normative di riferimento

- **IEC 61340-5-1**: Protezione di dispositivi elettronici contro fenomeni ESD.
- **ANSI/ESD S20.20**: Standard per la gestione del controllo ESD nei luoghi di lavoro.

Componenti di un sistema ESD

1. **Braccialetti antistatici**
Collegati a terra, scaricano la carica dell'operatore.
2. **Tappetini antistatici (ESD mats)**
Utilizzati su banchi di lavoro e pavimenti per prevenire l'accumulo di cariche.
3. **Calzature e abbigliamento ESD**
Scarpe conduttive, camici e guanti per dissipare cariche.
4. **Ionizzatori d'aria**
Riducono la carica elettrostatica in ambienti dove materiali non conduttivi (es. plastica) non possono essere messi a terra.
5. **Packaging ESD-safe**
Contenitori, buste schermate o conduttive per il trasporto e la conservazione di componenti elettronici sensibili.
6. **Pavimentazioni ESD**
Rivestimenti conduttivi o dissipativi collegati a un sistema di messa a terra.

Dove si usano i sistemi ESD?

- **Industria elettronica e microelettronica**
- **Produzione di semiconduttori**
- **Laboratori e camere bianche**
- **Manutenzione e riparazione di dispositivi elettronici**
- **Industrie aerospaziali, automobilistiche, medicali**

LINEE GUIDA AVANZATE PER LA PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA

Layout impiantistico a sicurezza intrinseca

La disposizione fisica di apparecchiature, serbatoi e pipe rack è **il primo livello di protezione**:

- Distanze minime secondo API 2510 e NFPA 30.
- Separazione funzionale tra aree di processo, stoccaggio, utility, controllo.
- Orientamento prevalente dei vent flare per limitare jet fire su elementi sensibili.
- Sistemi di drenaggio antincendio (gravity slope, trincee ignifughe, separatori).

Sistemi di isolamento

- Valvole ESD (Emergency Shut Down): pneumatiche, elettriche, failsafe.
- Sistemi blowdown: depressurizzazione rapida per prevenire BLEVE.

Ridondanza funzionale

- Strumentazione SIL-rated (Safety Integrity Level): secondo IEC 61511.
- Doppia alimentazione elettrica per pompe antincendio.
- Doppia rete idrica in aree ATEX.

2TECNICHE DI ANALISI DEL RISCHIO

HAZOP – Hazard and Operability Analysis

- Analisi sistematica basata su *guide words* (e.g., “No Flow”, “More Pressure”).
- Per ogni deviazione, si valuta: **causa, conseguenza, salvaguardia, raccomandazione**.
- Efficace nella fase di **disegno di base e dettaglio**.

LOPA – Layers of Protection Analysis

- Analisi semiquantitativa per stimare il rischio residuo.
- Combina frequenza di innesco, probabilità di fallimento delle protezioni, gravità.
- Efficace per validare la **necessità di SIS (Safety Instrumented Systems)**.

Bow-tie analysis

- Visualizzazione di uno scenario incidentale: **evento centrale**, cause, conseguenze, barriere preventive e mitigative.
- Strumento eccellente per **formazione del personale e comunicazione dei rischi**.

Fault Tree Analysis (FTA)

- Approccio deduttivo a logica booleana.
- Identificazione della combinazione minima di eventi che portano a un top-event (es. BLEVE).
- Usato in combinazione con dati di affidabilità (MTBF, failure rates).

INTERAZIONE TRA INCENDI INDUSTRIALI E IMPATTO AMBIENTALE

Emissioni critiche

- **Soot (carbonio elementare)** → effetto clima e inalazione.
- **Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)** → cancerogeni.
- **Diossine/furani** in incendi di clorurati.
- Contaminazione suolo-acqua da liquidi estinguenti.

Normativa di riferimento

- **Direttiva 2010/75/UE (IED)** → emissioni da incidenti.
- **D.Lgs. 152/06 – Parte VI** → incidenti ambientali e misure correttive.
- **Sistema E-PRTR** → tracciabilità emissioni da eventi accidentali.

Misure post-incendio

- Bonifica ambientale: scavo terreno, stripping falde.
- Contenimento acque di spegnimento: vasche di raccolta, neutralizzazione.
- Sorveglianza ambientale post-incidente (monitoraggi IRSA).





Esercizio 1 – Calcolo irraggiamento termico da jet fire

Dati:

- Gas naturale a 50 bar, orifizio da 25 mm.
- Temperatura fiamma: 1400 K
- Emissività: 0.2
- Distanza: 20 m
- Fattore di vista: 0.25

Calcolo:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot F_{view} = 0.2 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (1400)^4 \cdot 0.25 = 12.8 \text{ kW/m}^2$$

Risultato:

- A 12.8 kW/m² → soglia per ustione di secondo grado in 30 s.
- Implica evacuazione immediata o protezione strutturale.

Tempo al collasso per serbatoio in BLEVE

Dati:

- Parete serbatoio: acciaio C, spessore 12 mm
- Flusso termico esterno: 80 kW/m²
- T fusione: 1450°C
- Capacità termica acciaio: 500 J/kg·K

Stima tempo:

$$\Delta T = T_{collasso} - T_{amb} = 1100 \text{ K} \Rightarrow t = \frac{c \cdot \rho \cdot s \cdot \Delta T}{q} \approx 180 \text{ s}$$

Risultato:

→ Intervento raffreddamento entro 3 min obbligatorio.

Una **check-list antincendio tecnica** serve a garantire che ogni aspetto critico sia stato affrontato già in fase di progettazione o revisione impiantistica. Di seguito una versione avanzata e strutturata:

Check-list: protezione da jet fire e BLEVE

Voce	Verifica	Note
Layout con separazione fisica serbatoi/impianto	✓ / ✗	≥30 m tra GPL e processo
Sistemi ESD automatici (fail-safe)	✓ / ✗	Con valvole pneum. a ritorno a molla
Valvole di sicurezza (PSV) dimensionate	✓ / ✗	Secondo API 521
Analisi del rischio BLEVE completata	✓ / ✗	Incl. calcolo tempo al collasso
Sistemi di raffreddamento attivi per serbatoi	✓ / ✗	Deluge testato ogni 6 mesi
Protezioni passive su pipe rack	✓ / ✗	Certificato EN 13381
Monitoraggio continuo LEL/UV-IR	✓ / ✗	Soglie a 10–20% LEL
Simulazione CFD/PHAST per validazione layout	✓ / ✗	Documentazione disponibile

Questa check-list può essere estesa a: **pool fire, fireball, VCE, flash fire**, e aggiornata secondo **hazard register**

2. FIRE SCENARIO CARDS – SCHEDE DI SCENARIO EMERGENZIALE

Le “Fire Scenario Cards” sono strumenti sintetici per il personale operativo e di pronto intervento, per affrontare gli scenari incidentali noti in stabilimento.

Esempio: Fire Scenario Card – BLEVE GPL

Voce	Descrizione
Tipo scenario	BLEVE – serbatoio orizzontale GPL
Segnali premonitori	Fuoco esterno persistente su parte bagnata del serbatoio, deformazioni, rumori anomali
Tempo stimato a BLEVE	90–180 s (da inizio esposizione a 80 kW/m ²)
Azioni immediate	Attivazione del deluge, chiusura ESD upstream
Zona rossa	100–250 m da serbatoio
DPI richiesti	Tuta ignifuga, SCBA, protezione termica avanzata
Comunicazioni	Codice emergenza 770 – BLEVE rischio alto
Contenimento secondario	Vasca di raccolta, isolamento drenaggi

Queste schede possono essere integrate nei **piani di risposta all'emergenza**.

TEMPLATE PER PIANI DI EMERGENZA INDUSTRIALE

Contenuti essenziali di un piano di emergenza antincendio

1. **Anagrafica sito:** posizione, sostanze pericolose, unità produttive
2. **Analisi del rischio scenariale (PIR):** elenco BLEVE, VCE, jet fire, pool fire
3. **Matrice rischio/gravità (F x C)** per ogni scenario
4. **Descrizione barriere preventive e mitigative**
5. **Organizzazione dell'emergenza:**
 - Responsabili antincendio e loro turnazione
 - Squadra di emergenza e backup
6. **Procedure di intervento:**
 - Attivazione, evacuazione, confinamento
 - Comunicazione interna/esterna
7. **Piani topografici:** vie di esodo, risorse antincendio, zone di raccolta
8. **Interfaccia con enti esterni:**
 - Vigili del fuoco, Prefettura, ARPA
9. **Gestione delle comunicazioni e notifica** secondo Seveso III e D.Lgs. 105/2015
10. **Procedure post-incidente:** messa in sicurezza, bonifica, report tecnico.



SISTEMI DI SICUREZZA FUNZIONALE – IEC 61508 / IEC 61511

Safety Instrumented Systems (SIS)

Sono sistemi automatici progettati per **ridurre il rischio a un livello accettabile** in condizioni critiche.

Esempio: chiusura automatica valvola a monte serbatoio GPL a fronte di jet fire.

SIL – Safety Integrity Level

SIL	Probabilità di fallimento su richiesta (PFDavg)	Esempio
SIL 1	$10^{-2} - 10^{-1}$	Arresto pompe in anomalia
SIL 2	$10^{-3} - 10^{-2}$	Interruzione rilascio gas
SIL 3	$10^{-4} - 10^{-3}$	Isolamento automatico gasdotto
SIL 4	$10^{-5} - 10^{-4}$	Solo in ambiti nucleari/aerospaziali

- Per impianti industriali, i sistemi ESD devono rispettare **SIL 2** o superiore.
- Verifica tramite **Fault Tree Analysis** o tool **LOPA**.

CONFRONTO TRA I FENOMENI				
Fenomeno	Energia meccanica	Energia termica	Durata	Esempio tipico
Jet Fire	Bassa	Alta	Lunga	Rottura tubazione gas
BLEVE	Alta	Alta (se infiamm.)	Istantanea	Serbatoio GPL riscaldato
Flash Fire	Nessuna	Alta	Breve	Nuvola di gas infiammabile
Fireball	Nessuna	Molto alta	Breve	BLEVE o rilascio istantaneo
Pool Fire	Bassa	Alta	Lunga	Pozza di benzina
VCE	Alta	Media	Breve	Rilascio di gas tra ostacoli
Deflagrazione	Media	Media	Breve	VCE
Detonazione	Molto alta	Alta	Istantanea	Esplosivo ad alta potenza

Texas City (2005) – Esplosione VCE (Vapor Cloud Explosion)

Data: 23 marzo 2005

Luogo: Raffineria BP, Texas City, Texas, USA

Sostanza coinvolta: Isopentano



Dinamica dell'incidente

- Durante il riavvio di un'unità **ISOM** (isomerizzazione), ci fu un **rilascio massiccio di isopentano**, che formò una **nube di vapore infiammabile (Vapor Cloud)**.
- La nube trovò un innesco (presumibilmente il motore di un veicolo) e **esplose violentemente**, causando un **VCE** (esplosione di nube di vapore).

Conseguenze

- **15 morti**
- **Oltre 170 feriti**
- **Gravi danni** alle strutture circostanti
- L'incidente è uno dei peggiori nella storia industriale degli USA negli ultimi decenni

Cause principali

- **Valvole bypassate**: errata gestione delle valvole ha causato un **eccessivo riempimento della torre** di distillazione.
- **Sistema di raffreddamento non attivo**: mancato raffreddamento ha favorito il surriscaldamento e la sovrappressione.
- **Procedure operative inadeguate** e **scarsa cultura della sicurezza**

Lezioni apprese

- Importanza del **controllo rigoroso delle procedure di riavvio degli impianti**
- Necessità di **protocolli di sicurezza robusti**
- Cruciale implementare **valutazioni del rischio dinamiche** durante operazioni straordinarie



Incidente di Buncefield – Regno Unito, 11 dicembre 2005

 **Luogo:** Deposito di carburanti a Hemel Hempstead, Hertfordshire (Inghilterra)

 **Impianto:** Terminal petrolifero Buncefield Oil Storage Depot

 **Tipo di evento:** Esplosione e incendio di grande entità

Cosa è successo

Alle ore 06:01 del mattino, una **massiccia esplosione** ha colpito il deposito di stoccaggio di carburante, seguita da un vasto incendio che ha coinvolto più di 20 serbatoi contenenti benzina, gasolio e altri carburanti.

Cause principali

- **Guasto strumentale:** un sensore di livello in un serbatoio di benzina non ha rilevato il riempimento completo.
- **Errore umano e procedurale:** mancata sorveglianza manuale del livello del serbatoio.
- **Straripamento:** la benzina ha traboccato dal serbatoio per oltre 40 minuti.
- **Formazione di una nube infiammabile** (vapori di benzina in miscela con l'aria).
- **Innesco sconosciuto:** la nube si è accesa causando una **vasta esplosione di vapore** (VCE, Vapour Cloud Explosion).

Conseguenze

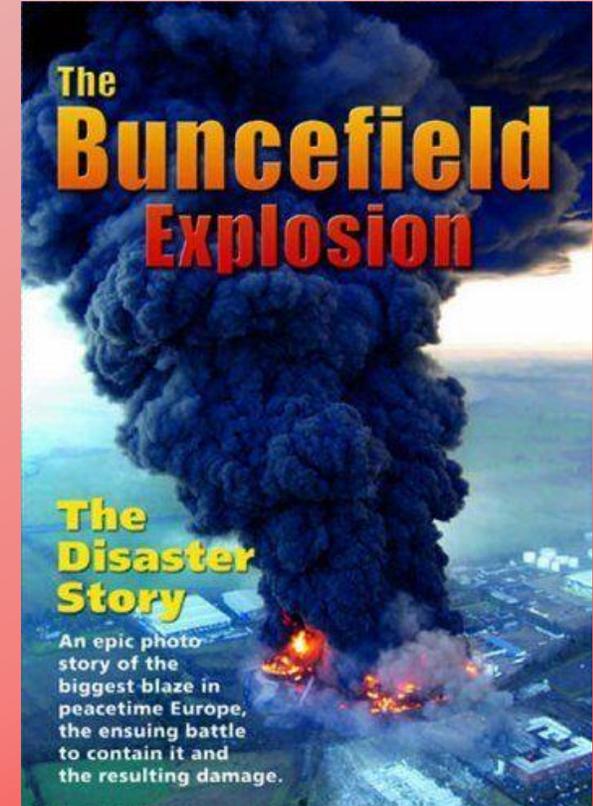
- **Feriti:** oltre 40 persone (nessun morto).
- **Danni materiali enormi:** distrutti o gravemente danneggiati edifici, auto, infrastrutture.
- **Evacuazioni:** centinaia di persone allontanate.
- **Impatto ambientale:** contaminazione di suolo e falde, rilascio di sostanze tossiche nell'aria.
- **Effetto domino evitato per poco:** grazie alla risposta dei Vigili del Fuoco, che impiegarono giorni per domare le fiamme.

Conseguenze legali e gestionali

- **Rapporto ufficiale HSE (Health and Safety Executive):** criticò pesantemente la gestione del rischio e la cultura della sicurezza.
- Le aziende coinvolte (compresi Total UK e Hertfordshire Oil Storage Ltd) furono **multate per milioni di sterline**.
- Fu introdotto un rafforzamento normativo sui **controlli automatici**, la **manutenzione degli strumenti** e la **formazione del personale**.

Lezioni apprese

- L'importanza di **sistemi di allarme ridondanti**.
- Il ruolo fondamentale del **fattore umano** e dei **controlli operativi**.



L'incidente di **Feyzin** (Francia, 1966) è uno dei più noti e tragici incidenti industriali legati al rilascio di gas infiammabili, con importanti conseguenze sulla sicurezza degli impianti chimici e petrolchimici.

📌 Sintesi dell'incidente di Feyzin (1966)

- **Data:** 4 gennaio 1966
- **Luogo:** Raffineria di Feyzin, vicino a Lione, Francia
- **Impianto coinvolto:** Serbatoi di stoccaggio di gas di petrolio liquefatto (GPL), in particolare **propano**

🔥 Dinamica dell'incidente

1. Durante un'**operazione di spurgo** da una valvola di fondo di un serbatoio contenente propano liquido, si verificò una **perdita accidentale**.
2. Il gas fuoriuscì e formò una **nuvola di vapore infiammabile** che si diffuse con il vento.
3. Dopo circa 15 minuti, la nube trovò un **innesco** (probabilmente una scintilla da un veicolo), provocando una **deflagrazione seguita da un incendio**.
4. Il fuoco coinvolse altri serbatoi vicini, causando **BLEVE** (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) e successive esplosioni multiple.

💀 Conseguenze

- **Vittime:** 18 morti (tra cui pompieri e personale tecnico)
- **Feriti:** Oltre 80
- **Danni materiali:** Enormi danni alla raffineria e alle zone circostanti

⚠️ Cause principali

- Errori procedurali e umani durante lo spurgo
- Mancanza di sistemi di contenimento del gas
- Assenza di isolamento sufficiente tra i serbatoi
- Inadeguata valutazione del rischio di BLEVE

📖 Lezioni apprese

- Maggiore attenzione alla **sicurezza nelle operazioni di manutenzione**
- Importanza di distanze di sicurezza tra serbatoi
- Introduzione di sistemi di **intercettazione rapida e barriere**
- Miglioramento nella **formazione del personale** e nei **piani di emergenza**

L'incidente di Feyzin è un caso studio fondamentale per la sicurezza nei depositi di GPL e ha influenzato lo sviluppo di normative tecniche e di progettazione in tutta Europa.



L'incidente ENI di Sannazzaro de' Burgondi (Pavia) si riferisce a un grave evento avvenuto il **1° dicembre 2016** all'interno della raffineria ENI, una delle più grandi e complesse d'Italia. Ecco una sintesi dei fatti principali:

Cosa è successo

- Intorno alle **15:40** si è verificata una **violenta esplosione** seguita da un **grande incendio**.
- L'incendio ha interessato l'impianto **EST (Estrazione Solventi Topping)**, un'unità strategica della raffineria per la distillazione del greggio.
- La colonna di fumo era visibile a decine di chilometri di distanza.

Conseguenze immediate

- **Nessun morto né feriti gravi**, ma **l'intero impianto EST è stato compromesso**.
- Le squadre antincendio interne, con l'aiuto dei Vigili del Fuoco, hanno impiegato diverse ore per domare le fiamme.
- L'Arpa Lombardia ha effettuato rilievi sulla qualità dell'aria: **non sono emerse criticità ambientali immediate**, ma si è comunque raccomandata cautela.

Misure adottate

- Evacuazione o limitazione delle attività in alcune aree vicine.
- Sospensione temporanea di alcune lavorazioni.
- Attivazione del **Piano di Emergenza Interno**.



Analisi e cause

- L'ENI ha avviato un'indagine interna; **l'origine dell'incidente è stata ricondotta a un guasto tecnico all'impianto**.
- La Procura di Pavia ha aperto un'inchiesta per accertare eventuali responsabilità.



Impatto economico e operativo

- L'incidente ha **ridotto temporaneamente la capacità produttiva** della raffineria.
- La riattivazione dell'impianto danneggiato ha richiesto **diversi mesi**.



ANALISI TECNICA DELL'INCIDENTE

Impianto coinvolto

L'incidente ha interessato il **topping EST (Estrazione Solventi Topping)**, un impianto di distillazione atmosferica ad alta efficienza e rendimento, realizzato per sostituire progressivamente le linee più vecchie. Questo impianto trattava **greggio in entrata**, separandolo in frazioni leggere e pesanti per ulteriori lavorazioni.

Dinamica dell'incidente

- Una **forte esplosione**, seguita da un **incendio di grande intensità**, è partita **nella parte alta dell'impianto**, coinvolgendo **torri di distillazione, scambiatori e condutture**.
- L'evento ha generato un **rischio di escalation** verso altre unità adiacenti, ma i sistemi automatici e l'intervento umano hanno circoscritto l'evento.

Possibili cause tecniche

Sebbene la relazione finale non sia stata resa pubblica integralmente, i tecnici hanno ipotizzato:

1. **Rottura improvvisa di una tubazione o flangia in pressione** (causa meccanica o termica).
2. **Formazione di una nube infiammabile (VCE – Vapour Cloud Explosion)** in presenza di un innesco (es. scintilla, surriscaldamento).
3. **Malfunzionamento di valvole di sicurezza o sistemi di contenimento**.
4. **Difetti nella manutenzione o controllo della corrosione sotto coibentazione (CUI)**.

GESTIONE DELL'EMERGENZA

- Attivato **immediatamente il Piano di Emergenza Interno (PEI)**: sirene, evacuazione del personale non essenziale, compartimentazione degli impianti.
- **Squadre aziendali antincendio** in prima linea con supporto di **Vigili del Fuoco** da Pavia, Milano, Lodi e Alessandria.
- L'incendio è stato **domato in circa 4-5 ore**, ma le operazioni di raffreddamento e messa in sicurezza sono proseguite per giorni.

RIFERIMENTI NORMATIVI

L'impianto rientra tra quelli soggetti alla **Direttiva Seveso III** (recepita in Italia con il **D.Lgs. 105/2015**) come **stabilimento a rischio di incidente rilevante**.

Norme tecniche coinvolte:

- **UNI EN ISO 23251** – Sistemi di sicurezza di sovrappressione.
- **API 521** – Pressure-relieving and Depressuring Systems.
- **IEC 61511** – Sicurezza funzionale degli impianti di processo.
- **ISO 31000** – Gestione del rischio.

IMPATTO OPERATIVO ED ECONOMICO

- **Produzione interrotta** nell'unità EST per diversi mesi.
- Ridotta capacità dell'intera raffineria, in particolare per la mancanza di distillati leggeri.
- Costi diretti e indiretti elevati: **danni materiali, fermo impianto, risarcimenti e indagini**.

LEZIONI APPRESE

- **Importanza dei sistemi di sicurezza passiva e attiva**, anche in impianti moderni.
- **Formazione e addestramento periodico** per operatori e squadre di emergenza.
- **Controllo periodico della corrosione**, in particolare sotto isolamento.
- **Simulazioni di scenario** con aggiornamento del PEI e del Piano di Emergenza Esterno (PEE).
- Comunicazione chiara alla popolazione in caso di emergenza (trasparenza e fiducia).