

Prevenzione e gestione del rischio nella produzione e distribuzione di idrogeno

Paolo Mocellin

GdL Sicurezza - CNI

Ricercatore di Impianti Chimici presso l'Università degli Studi di Padova

20 Novembre 2023

Contenuti del webinar (3 ore)

- Introduzione sulla tematica dell'idrogeno
- Infrastrutture, proprietà e comportamento dell'idrogeno
- Cenni di normativa sulla gestione dell'idrogeno
- Scenari di rischio correlati all'idrogeno

Contatti

Paolo Mocellin

paolo.mocellin@unipd.it

paolo.mocellin.ing@gmail.com



<https://www.linkedin.com/in/paolo-mocellin-05b966b3/>

Introduzione

L'idrogeno è considerato uno tra i più promettenti vettori energetici del prossimo futuro:

- *Energy-efficient*
- Poco inquinante (la sua combustione produce teoricamente solo acqua)
- Combustibile rinnovabile

È un composto versatile e pulito e, quando prodotto attraverso fonti rinnovabili (biomassa, energia solare, ecc.), può contribuire sensibilmente alla decarbonizzazione del sistema industriale e dei trasporti.

Tuttavia, l'identificazione e il controllo di potenziali conseguenze avverse nel suo **trasporto, utilizzo e stoccaggio**, pone un problema etico e di accettabilità del rischio.

Ciò si verifica ogniqualvolta una nuova tecnologia viene introdotta nel contesto esistente.

Una molecola piccola ma fondamentale

- L'idrogeno è il componente più leggero e abbondante della materia (90%)
- È il carburante delle stelle, grazie al quale ogni giorno il nostro pianeta riceve l'energia rinnovabile dal Sole
- È disponibile perlopiù in forma di gas. Non è quasi mai disponibile da solo in natura, pertanto va spesa dell'energia per «estrarlo» dagli altri elementi

L'idrogeno è considerato un vettore energetico

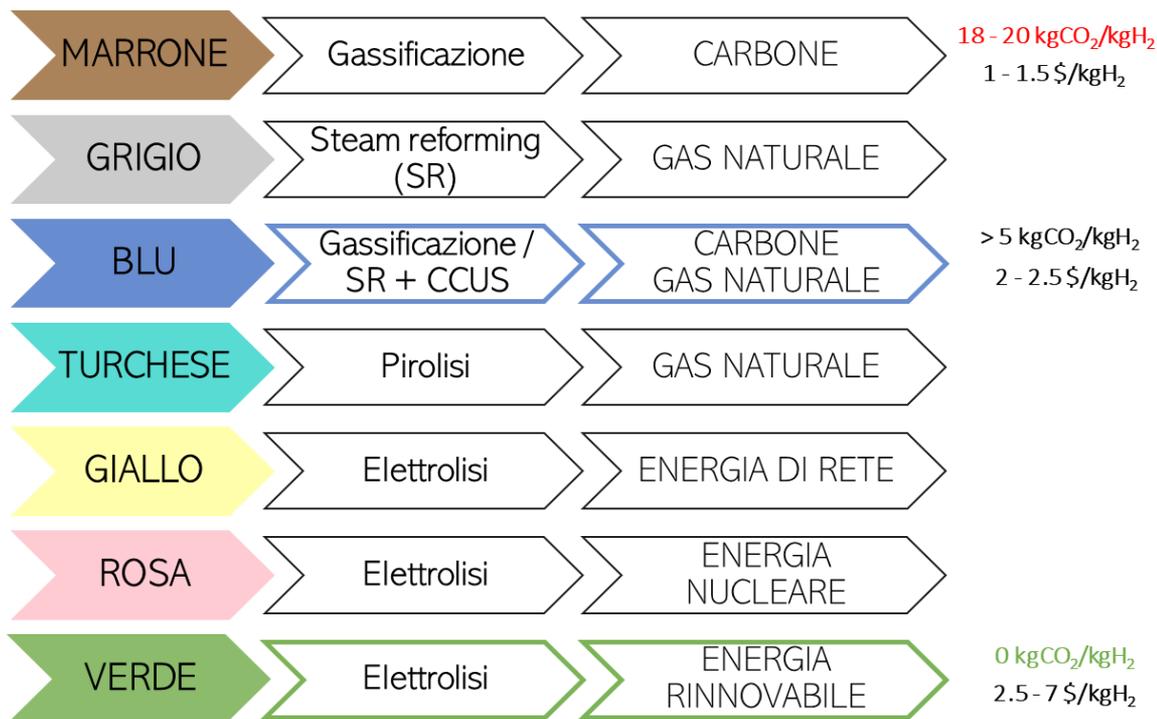


Quando brucia non produce emissioni clima-alteranti

- L'idrogeno è il carburante con la maggiore **densità energetica** (1 kg di idrogeno vs 2.5 kg di metano, 3 kg di benzina verde)
- L'energia elettrica può essere facilmente **convertita** in idrogeno (vettore energetico efficace per bilanciare il nostro mix energetico)
- L'idrogeno può essere convertito con elevata efficienza (20-35 % motori termici, H₂: 60 % energia chimica → motrice)
- L'idrogeno è ampiamente utilizzato nell'industria ed è una sostanza di primaria importanza per molti settori produttivi (es. ammoniaca)
- Comunque lo si usi, **non produce emissioni inquinanti o climalteranti** (idealmente zero emissioni di CO₂)



I colori dell'idrogeno. Il futuro è verde, il percorso è multicolore.



I NUMERI DELL'IDROGENO (IEA, 2021)
 Produzione annuale 70 MtH₂
 Sorgenti 76% gas naturale, 23% carbone
 Emissioni 830 MtCO₂/anno (~ UK + Indonesia) di cui catturate 130 MtCO₂/anno



GLI OBIETTIVI DELL'EU
 Emissioni ridotte della metà entro il 2030 (H₂ BLU)
 Economia «Carbon-neutral» entro il 2050 (H₂ VERDE)



Alcuni ostacoli nel percorso di introduzione dell'idrogeno.

- La produzione di idrogeno da energia *low-carbon* non è ancora competitiva
 - Periodo di «transizione»: da gas naturale (+ cattura CO₂) – H₂ blu e carbone – idrogeno H₂ marrone
- Lo sviluppo e la diffusione di infrastrutture per l'idrogeno sono ancora ridotti
 - Regolamentazione frammentata e standard non armonizzati («non industriali», emergenti)
- Temi legati alla **sicurezza** con ricadute sull'accettabilità, la progressione e la continuità del percorso di transizione (vs. benefici ambientali, convenienza)



Attuali filoni di ricerca sull'idrogeno

Idrogeno pulito «verde»

- Da processi esistenti o attraverso metodologie nuove

Sistemi di stoccaggio in sicurezza dell'idrogeno

- Sistemi tradizionali, sistemi ibridi

Materiali costruttivi

- Per elettrolizzatori, celle a combustibile, tubazioni e sistemi di stoccaggio

Sicurezza e normazione

- Analisi del rischio, standardizzazione

Accettabilità sociale delle nuove tecnologie ad idrogeno

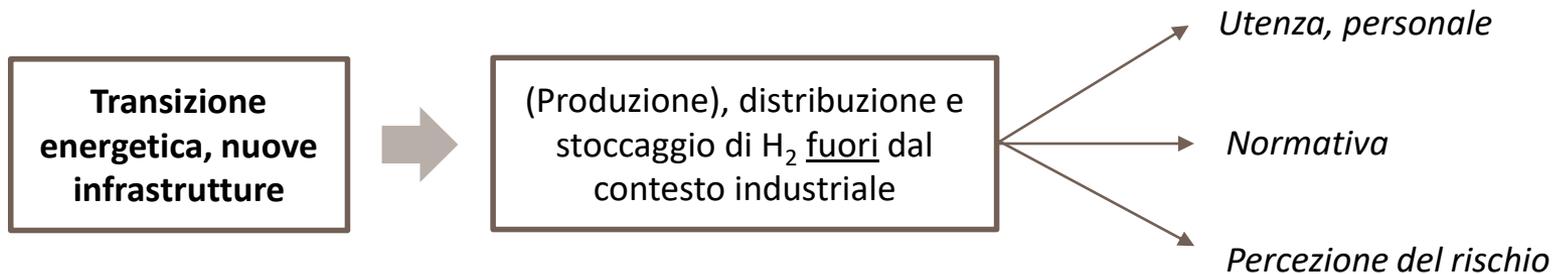
- Percezione del rischio, resilienza del sistema, «*readiness*» verso la transizione energetica

Utilizzo industriale vs non-industriale dell'H₂

L'idrogeno può essere un efficace *carrier* di energia se reso competitivo e connesso con un'infrastruttura sicura ed estesa per rifornire l'utenza finale.

L'industria ha maturato notevole esperienza nella manipolazione di sostanze pericolose, tra cui l'idrogeno, attraverso:

- *Know-how*
- Addestramento ed educazione del personale
- Metodologie di analisi del rischio
- Casistica storica incidentale (l'idrogeno è noto per essere alla base di violenti incidenti)



Problematiche e sfide nell'utilizzo non-industriale dell'H₂

Mentre nell'industria l'utilizzo sicuro dell'idrogeno è pratica consolidata, in contesti «non industriali» esistono problemi fondamentali di valutazione, percezione e gestione della sicurezza.

L'applicazione dell'idrogeno in contesti «non industriali» è molto variegata:

- Combustibile alternativo per auto trazione
- Applicazioni domestiche
- Stoccaggio

Gli scenari incidentali tuttavia sono rimangono i medesimi e legati a:

- Effetti fisiologici
- Effetti fisici
- Effetti chimici

Lo scenario comunque più critico è la **formazione di una miscela infiammabile idrogeno-aria con successivo innesco** che potrebbe dare origine ad un **incendio o esplosione**.

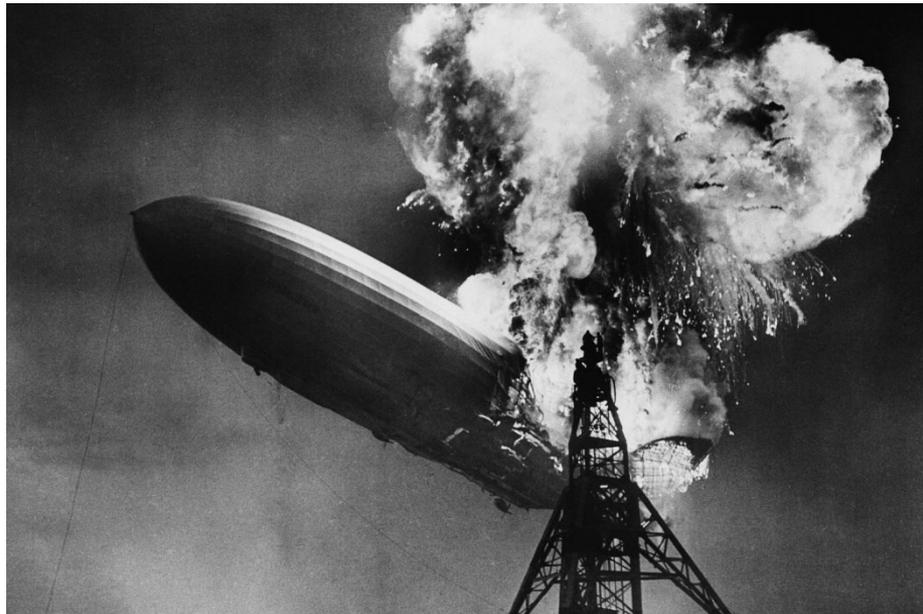
In generale, il rilascio di idrogeno avviene per ragioni accidentali.

Incidenti e scenario di rischio con H₂

Numerose statistiche mostrano che gli scenari di incidente con coinvolgimento di H₂ nel contesto industriale e dei trasporti non è trascurabile, le principali cause includono:

- danneggiamento meccanico/guasto della componentistica
- infragilimento (*hydrogen embrittlement*) del materiale costruttivo
- incompatibilità tra materiali
- sovrappressione con rottura/perdita di contenimento
- attacco chimico a bassa temperatura (stoccaggio)
- esplosioni
- errore umano durante le procedure e la manipolazione di H₂
- percezione alterata del rischio ovvero sottovalutazione del rischio

Il dirigibile Hindenburg



6 Maggio 1937

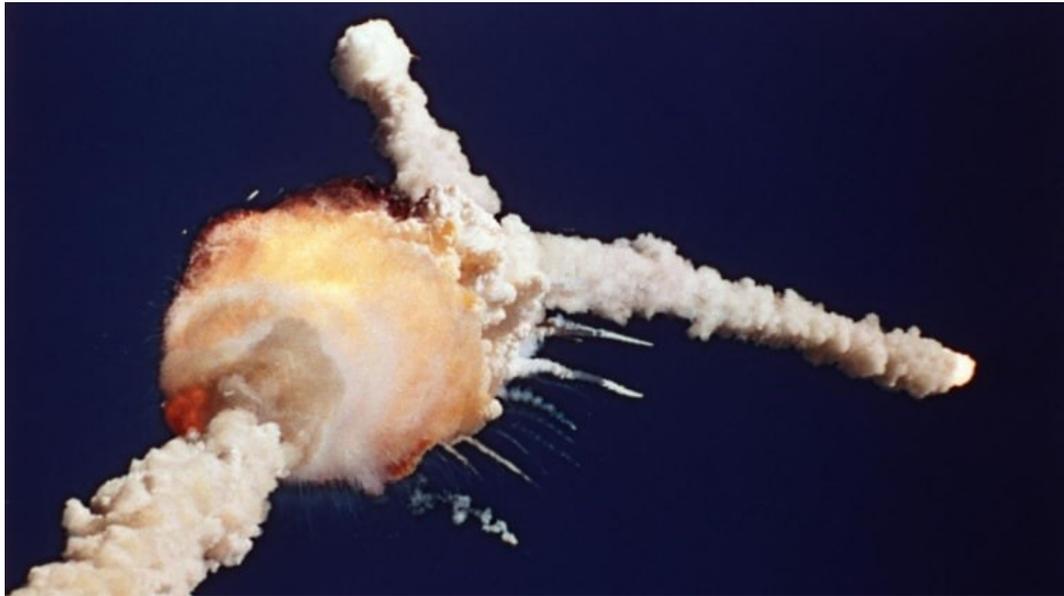
Violento incendio del dirigibile *Hindenburg*, ovvero il più grande aeromobile mai costruito

Elio (non infiammabile) sostituito con idrogeno (di cui erano noti i pericoli e i rischi)

Causa verosimile: scarica elettrostatica

«Sindrome di Hindenburg» (il gas che alimentava le abitazioni divenne «gas d'acqua», contenuto elevato in H_2)

Lo Space Shuttle Challenger



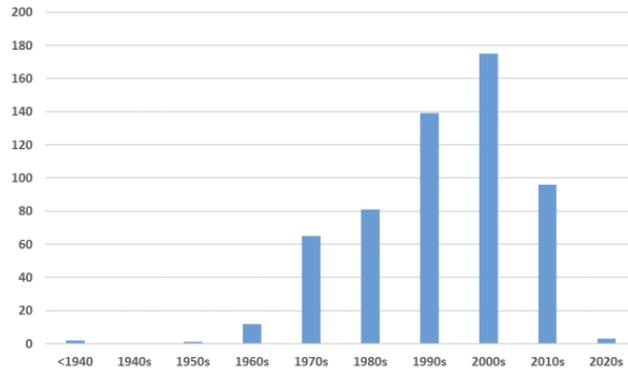
28 Gennaio 1986

78 secondi dopo il decollo, il mezzo esplode, uccidendo l'intero equipaggio

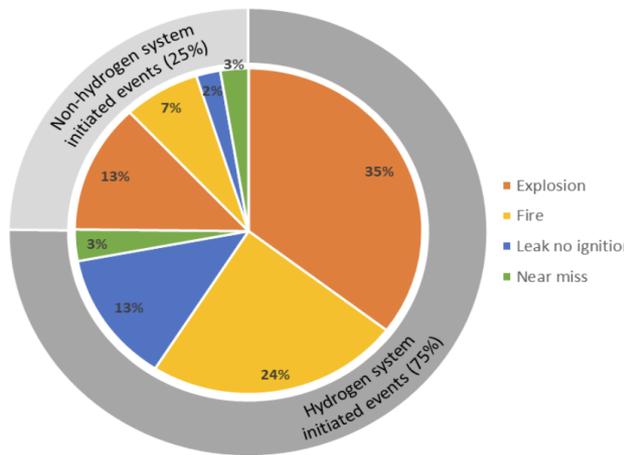
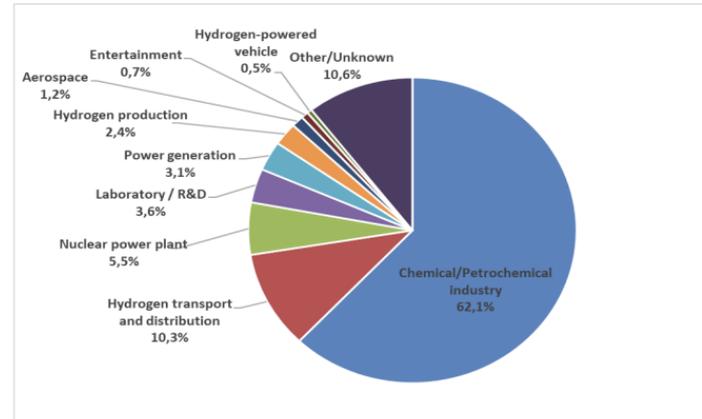
Causa: guasto ad una **guarnizione** del serbatoio interno a propellente solido.
Le fiamme determinarono il cedimento del serbatoio esterno contenente H_2 e O_2 liquidi.
L'**o-ring** non si espanse per via delle basse temperature.

Statistiche incidentali - settori

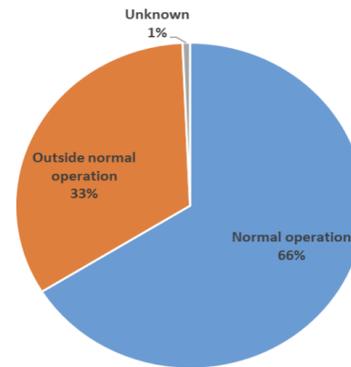
Years



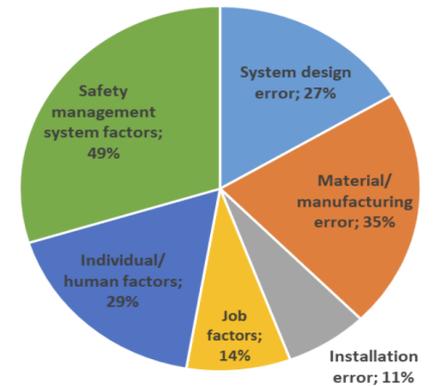
Industrial sectors



Operational mode



Causes (multiple entries per incident possible)



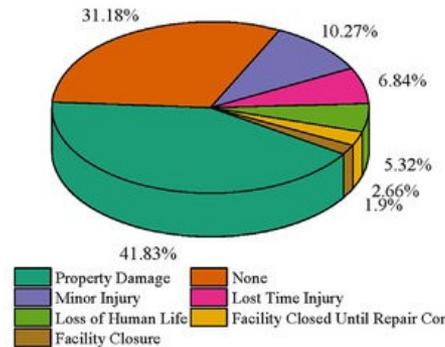
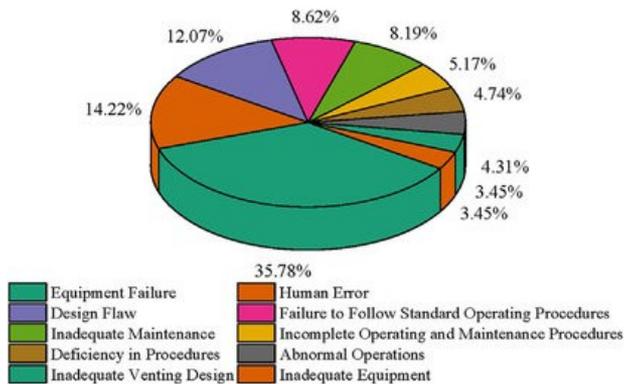
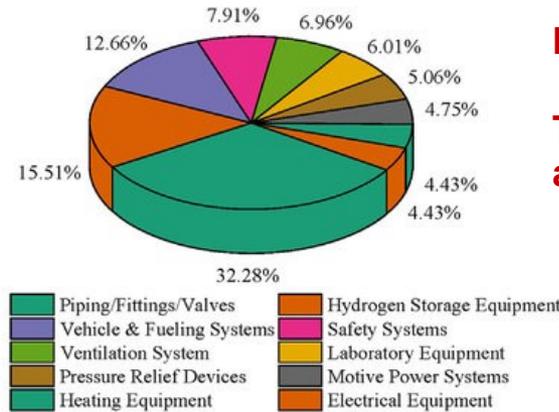
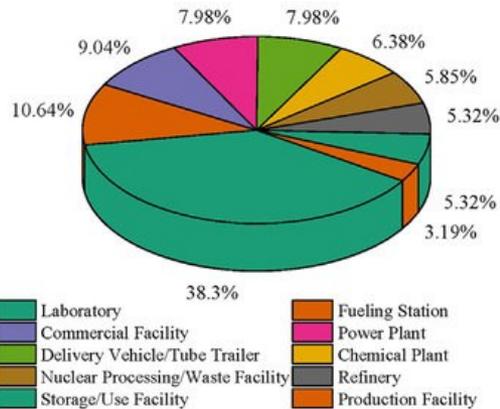
Statistiche incidentali - tipologie di apparecchiatura

Localizzazione incidente

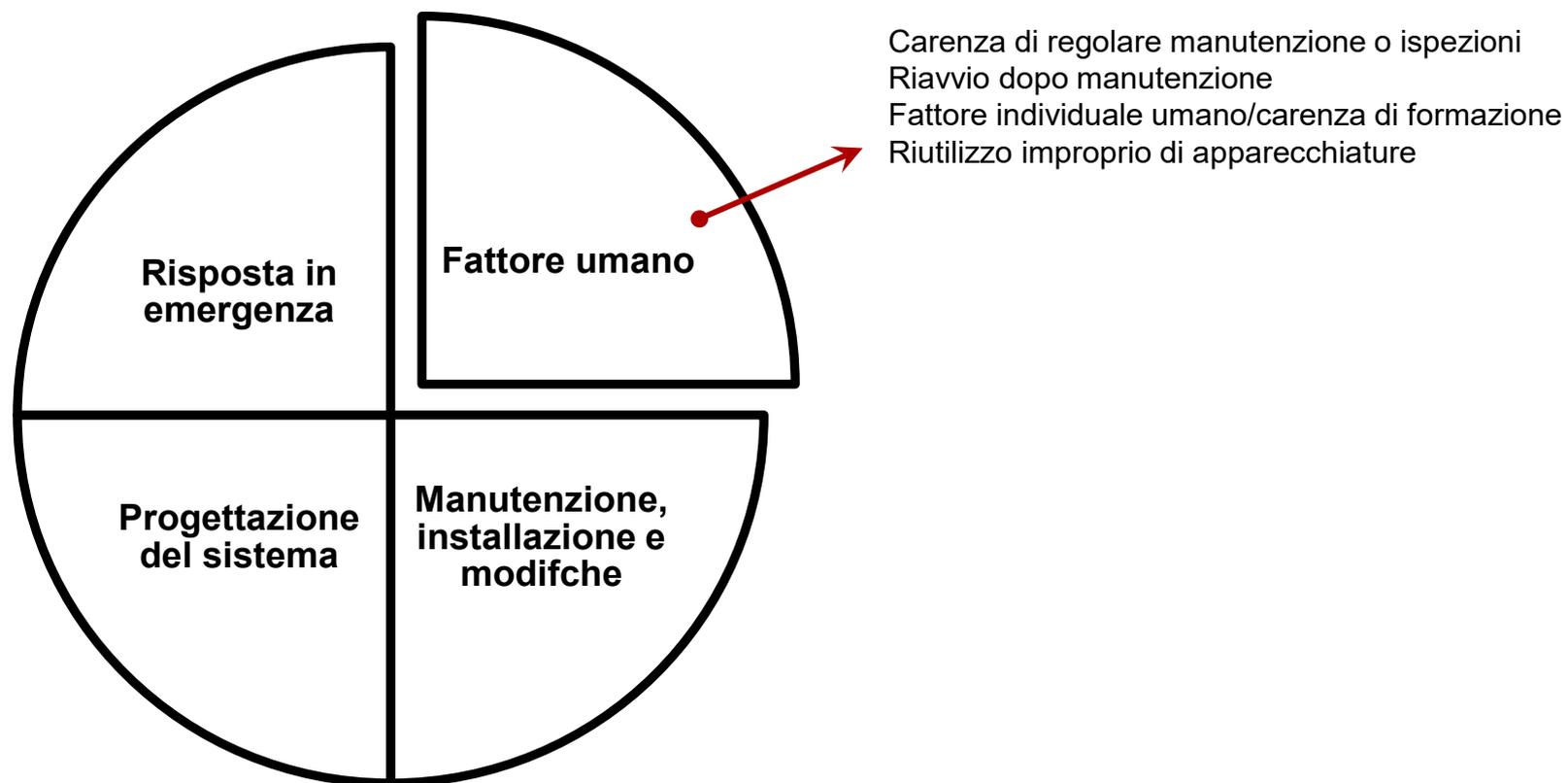
Tipologia di apparecchiatura

Probabili cause

Danno



Statistiche incidentali - aspetti ricorrenti



Statistiche incidentali - principali conseguenze

213 casi di incidente (sostanza primaria: idrogeno) *



84% dei casi con incendio/esplosione
48% di quelli mortali in sede di manutenzione
70% fattore umano

- Morte (12%)
- Ferimento serio (13%)
- Ferimento lieve (33%)
- Danneggiamento interno (86%)
- Danneggiamento esterno (8%)
- Evacuazione della popolazione (4%)
- Perdita di produzione/dell'esperimento (42%)

Alcuni fatti sull'H₂

Simbolo chimico H₂

È un gas (a T e P ambiente) ed è incolore, inodore e insapore.

Non è corrosivo ma ha l'effetto di degradare (infragilire) molti materiali.

E' completamente atossico (ma può dare luogo ad atmosfere sotto-ossigenate in ambienti confinati).

In condizioni normali, è circa 14 più leggero dell'aria (tende a stratificare verso l'alto).

Tra tutti i combustibili e carburanti, l'H₂ possiede la maggiore densità energetica (1 kg H₂: 2.1 kg di gas naturale o 2.8 kg benzina).

Temperatura di ebollizione: -252 °C (per renderlo liquido sono necessarie condizioni criogeniche)

Limiti di infiammabilità in aria: 4.0 - 75 % vol.

Energia minima di innesco: 0.02 mJ

Temperatura di fiamma in aria: 1430 °C

Temperatura di auto-accensione: 570 °C



H220 - Gas altamente infiammabile.

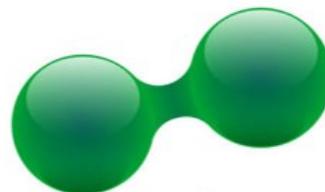
H280 - Contiene gas sotto pressione; può esplodere se riscaldato.

Alcuni fatti sull'H₂

**È incolore, inodore
e non è tossico**

**È altamente
infiammabile**

**È propenso
a dare rilasci**



H₂

**Infragilisce
molti materiali**

**È un gas molto più
leggero dell'aria**

**Fiamma poco visibile e
irraggiamento ridotto**

Alcuni fatti sull'H₂

L'idrogeno non liquefa comprimendolo: è necessario anche raffreddarlo.

La densità dell'idrogeno liquido è più alta di quella del gas (71 kg/m³) tuttavia rimane comunque molto bassa.

L'idrogeno liquido deve essere conservato in un contenitore speciale con isolamento termico. Quello con intercapedine a vuoto rimane la migliore opzione.

Quando l'idrogeno liquido evapora, la pressione nel contenitore sale.

Se il contenitore non è progettato per reggere pressione, deve essere montata una valvola di sfiato.



Alcuni fatti sull'H₂

PD ISO/TR 15916:2015
ISO/TR 15916:2015(E)

A.2 Comparison with other common gases

Table A.2 provides some safety-related thermophysical properties of gaseous hydrogen and other common gases for comparison purposes.

Table A.2 — Thermophysical properties of common gases

Gas	Density at 20 °C and 100 kPa kg/m ³	Viscosity at 20 °C and 100 kPa μPa·s	Diffusion coefficient in air 10 ⁻⁴ ·m ² /s	Lower heating value MJ/kg
Hydrogen (H ₂)	0,082 7	8,814	0,61	119,93
Helium (He)	0,164 0	19,609	0,57	n/a
Methane (CH ₄)	0,659 4	11,023	0,16	50,02
Nitrogen (N ₂)	1,149 6	17,637	0,20	n/a

Idrogeno Gassoso

Densità molto bassa.

Coefficiente di diffusione molto elevato.

A.3 Comparison with other liquefied gases

Table A.3 provides some safety-related cryogenic properties of liquid hydrogen and other liquefied gases at their normal boiling point for comparison purposes.

Table A.3 — Selected properties of some cryogenic fluids at their normal boiling point

Liquefied gas	Boiling temperature K	Liquid density kg/m ³	Gas density kg/m ³	Heat of vaporization J/g
Hydrogen (H ₂)	20,3	70,8	1,34	454,6
Helium (He)	4,2	125,0	16,89	20,6
Methane (CH ₄)	111,6	422,5	1,82	510,4
Nitrogen (N ₂)	77,3	808,6	4,53	198,6

Idrogeno Liquido

Densità bassa.

Temperatura di ebollizione: 20 K (-253 °C).

Alcuni fatti sull'H₂

Fuel	Lower flammability limit % vol. fraction	Stoichiometric mixture % vol. fraction	Upper flammability limit % vol. fraction	Minimum ignition energy mJ	Auto-ignition temperature K	Laminar burning velocity m/s
Hydrogen (H ₂) (see Table B1)	4	29,5	77	0,017	858	2,70
Methanol (CH ₃ OH)	6,0	12,3	36,5	0,174	658	0,48
Methane (CH ₄)	5,3	9,5	17,0	0,274	810	0,37
Propane (C ₃ H ₈)	1,7	4,0	10,9	0,240	723	0,47
Gasoline ^a (C ₈ H ₁₈)	1,0	1,9	6,0	0,240	488	0,30

Alcuni fatti sull'H₂

	Hydrogen	Natural Gas	Gasoline
Color	No	No	Yes
Toxicity	None	Some	High
Odor	Odorless	Mercaptan	Yes
Buoyancy Relative to Air	14X Lighter	2X Lighter	3.75X Heavier
Energy by Weight	2.8X > Gasoline	~1.2X > Gasoline	43 MJ/kg
Energy by Volume	4X < Gasoline	1.5X < Gasoline	120 MJ/Gallon

Source: California Fuel Cell Partnership

	Hydrogen	Natural Gas	Gasoline
Diamante NFPA 704			
Flammability in air (LFL – UFL)	4.1% - 74%	5.3% - 15%	1.4% - 7.6%
Explosive limits in air (LEL – UEL)	18.3% - 59%	5.7% - 14%	1.4% - 3.3%
Most easily ignited mixture in air	29%	9%	2%

Operazioni nelle quali è coinvolto l'idrogeno

In generale, l'idrogeno è coinvolto nelle seguenti operazioni:

- produzione
- stoccaggio e trasporto
- utilizzo

Alcune applicazioni coinvolgono tutte e tre queste categorie.

Nell'industria, l'idrogeno ha trovato notevoli applicazioni tra cui:

- industria della raffinazione
- purificazione dei materiali vetrosi
- manifattura di semiconduttori
- applicazioni aerospaziali
- produzione di fertilizzanti
- trattamento di metalli
- industria farmaceutica
- come refrigerante nella generazione di potenza
- Utilizzo nei processi di idrogenazione

Criteri fondamentali di sicurezza legata all'idrogeno

La sicurezza dei sistemi che utilizzano idrogeno, come per tutte le sostanze infiammabili, risiede nei seguenti aspetti fondamentali:

- Eliminare i pericoli o definire appropriate misure di mitigazione.
- Assicurare l'integrità dell'esperimento e del sistema.
- Garantire adeguata ventilazione per prevenire l'accumulo di idrogeno.
- Gestire eventuali rilasci o scarichi di emergenza.
- Rilevare e isolare eventuali perdite dal sistema durante l'esperimento.
- Addestrare il personale.

Produzione di H₂

L'idrogeno è estremamente abbondante e può essere estratto dai composti che lo contengono.

Tuttavia, la maggior parte del fabbisogno viene coperto da **prodotti o sottoprodotti dell'industria chimica**:

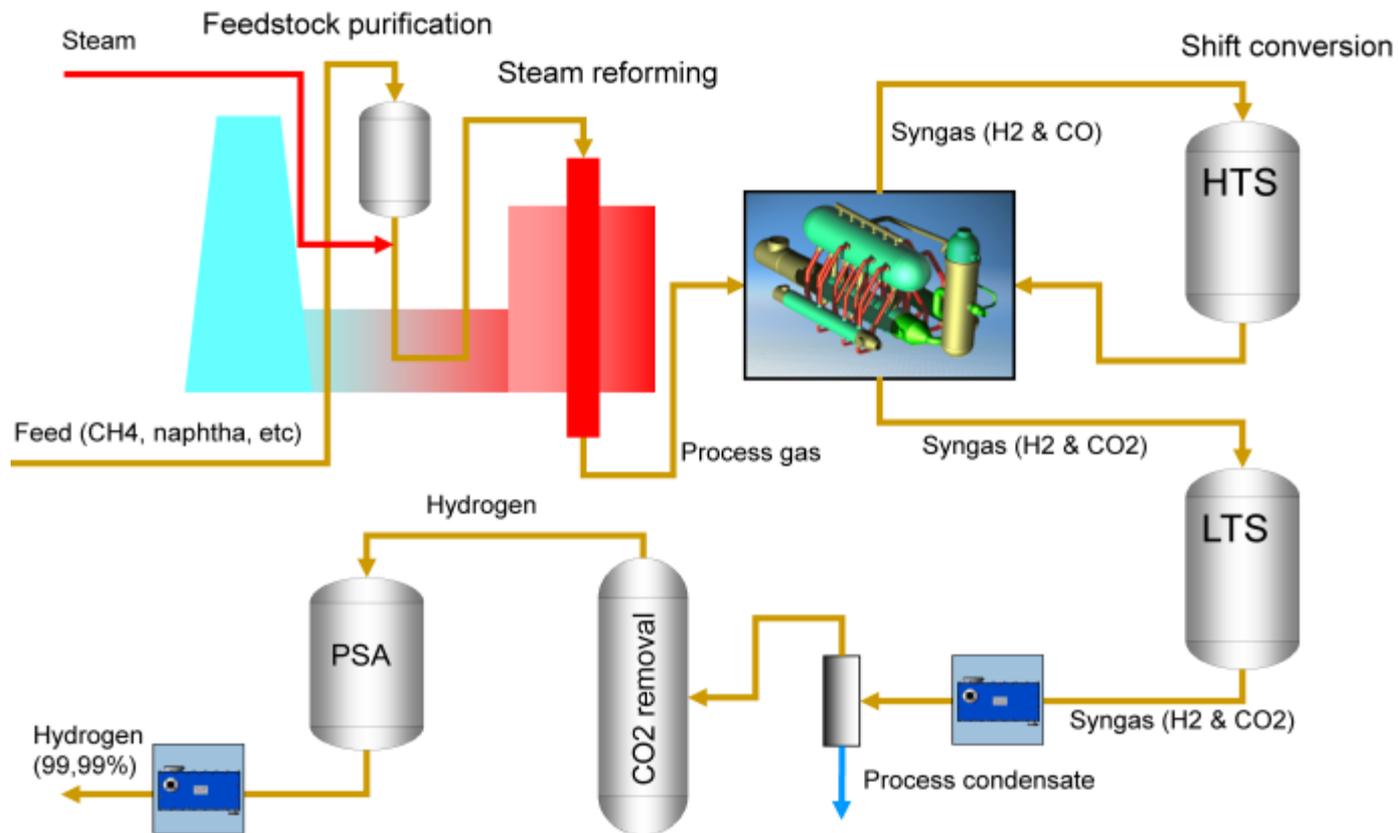
- reforming del gas naturale, ossidazione parziale di idrocarburi
- gassificazione del carbone o di biomassa
- elettrolisi dell'acqua
- rimozione di idrogeno da acidi mediante composti metallici
- reazioni di de-idrogenazione di prodotti chimici
- conversione di rifiuti

Altri metodologie sono utilizzate per applicazioni speciali come la **produzione di H₂ on-demand** (piccoli elettrolizzatori ecc.). Tali metodologie sono anche note come **decentralizzate** (su scala locale, piccoli impianti).

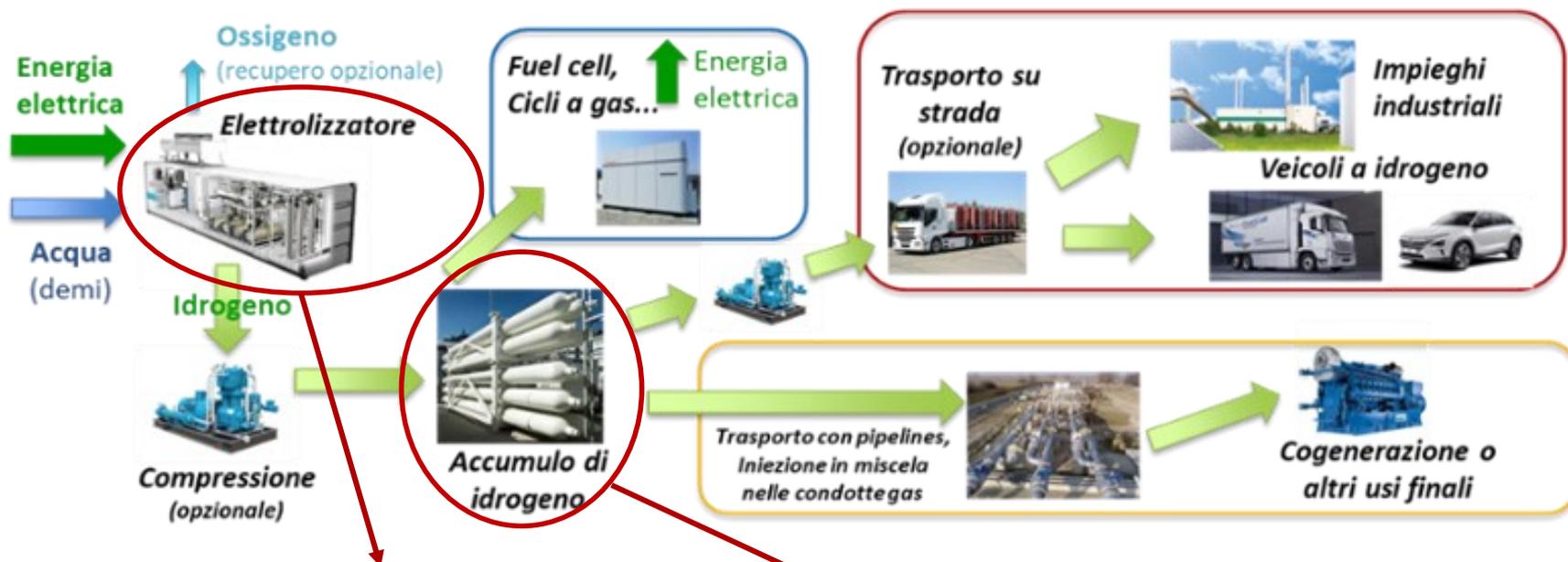
ISO 16110: *reforming* del gas naturale

ISO 22734: elettrolisi dell'acqua

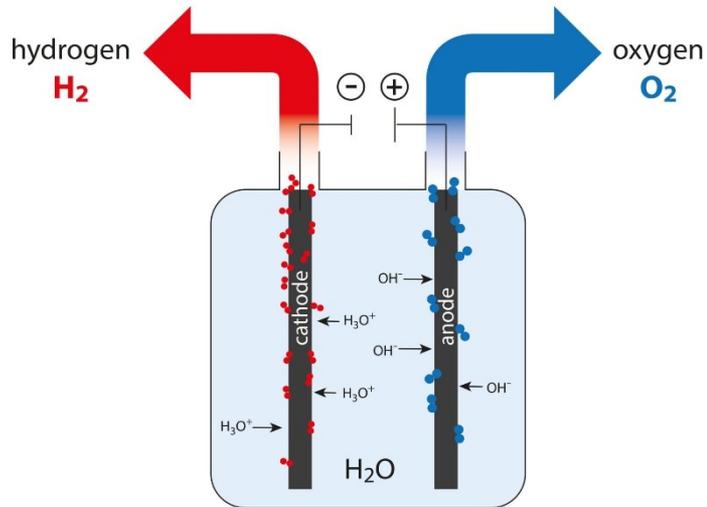
Schema di produzione di H₂ attraverso reforming di idrocarburi



Elettrolisi dell'acqua e filiera dell'H₂



Elettrolisi dell'acqua e filiera dell'H₂



L'elettrolisi dell'acqua è la decomposizione dell'acqua (H₂O) nei suoi componenti di base, **idrogeno** (H₂) e **ossigeno** (O₂), attraverso il passaggio di **corrente elettrica**.

L'unico sottoprodotto rilasciato durante il processo è l'ossigeno.

Questo processo utilizza energia elettrica che può essere immagazzinata come energia chimica sotto forma di idrogeno.

Elettrolizzatori alcalini (AEL)

100-150 °C utilizzando una soluzione di soda o potassa caustica.

Presenza di un diaframma per impedirne il mescolamento e che consente il transito selettivo di ioni idrossido.

Costo di produzione basso, tecnologia consolidata.

Elettrolizzatori a membrana elettrolitica polimerica (PEM EL)

70-90 °C

L'elettrolita è un materiale plastico solido speciale.

Purezza molto elevata, design compatto, rapida risposta. Durata limitata, costo.

Elettrolizzatori a membrana a scambio anionico (AEM EL)

– in sviluppo

30-60 °C

Ridotta presenza di fluido corrosivo, costi inferiori rispetto a PEM.

Elettrolizzatori a ossido solido (SOEL)

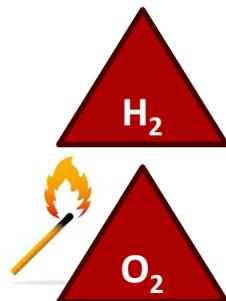
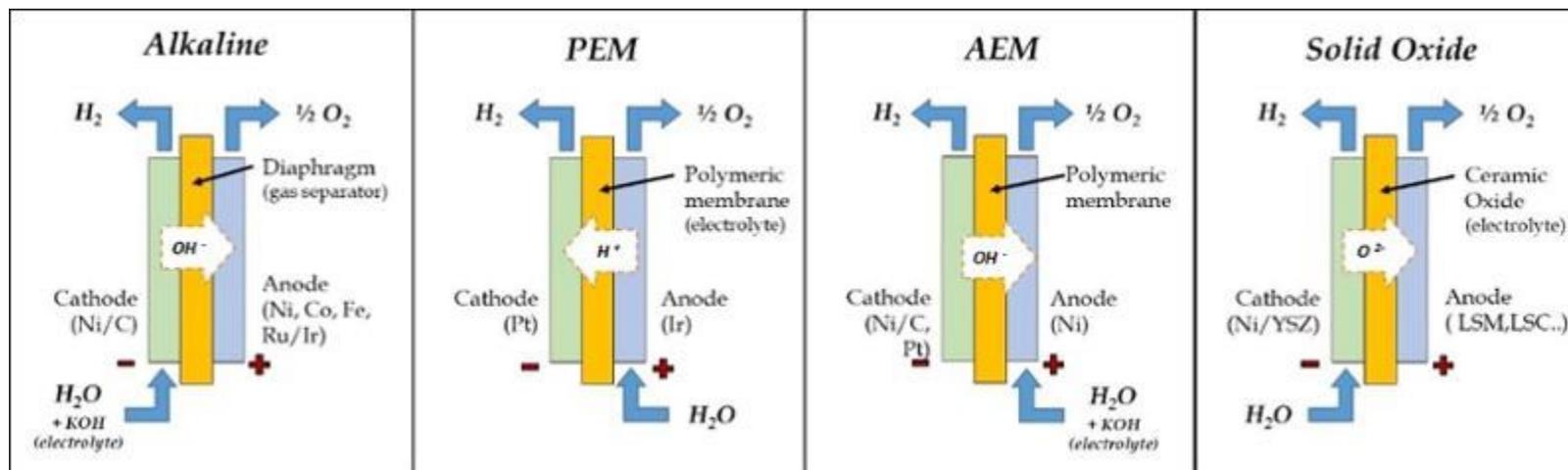
– in sviluppo

Elettrolizzatore ad alta temperatura (700-900 °C).

L'elettrolita è un materiale ceramico solido.

Elevata efficienza termica ed energetica, costo relativamente basso. Tempi lunghi di avviamento.

Tipologie di elettrolizzatori.



	AEL	PEMEL	AEMEL	SOEL
Elettrolita	Soluzione acquosa di idrossido di potassio (20-40% _{wt} KOH)	Membrana polimerica	Soluzione acquosa di idrossido di potassio (<1-5% _{wt} KOH) + membrana polimerica	Ossido ceramico, generalmente Yttria stabilized Zirconia (YSZ)
Ione trasferito	OH^-	H^+	OH^-	O^{2-}
Materiali impiegati	Ni, leghe Ni-Mo, Ni-Co, acciaio inox	Pt, Pt-Pd, RuO ₂ , IrO ₂ , Leghe di Ti	Ni, leghe Ni, Fe, Co, acciaio inox	Ni/YSZ, LSM/LSC, Leghe Fe-Cr-Mn
Temperatura operativa [°C]	60-80	50-70	30-60	600-900
Densità di corrente [A/cm²]	0.2-1.2	0.6-3.0	0.2-1.0	0.5-1.5
Rendimento elettrico [%, rif. PCI]	45-75	50-70	50-70	>80-85
Impianto di capacità massima dimostrato o in costruzione [MW]	100	10-20	0.1-0.2	~ 1
Vita utile dimostrata [h]	60'000 - 90'000	30'000 - 80'000	< 30'000	< 30'000

Stoccaggio e trasporto di H₂

L'idrogeno prodotto per un utilizzo altrove deve essere processato in uno stato di aggregazione tale da essere facilmente immagazzinato e trasportato, in modo sicuro.

Particolarità dell'H₂: densità e punto di ebollizione molto bassi.

Lo stoccaggio in condizioni normali, pertanto, non è mai conveniente ed è necessario adottare metodi per aumentare la densità dell'H₂ per l'immagazzinamento:

- gas pressurizzato
- liquido refrigerato
- *material-based* (supporti adsorbenti, liquidi organici, idruri, ecc.)
- trasporto mediante tubazioni (puro o in miscela con altri vettori), trasporto su terra/mare

Gas pressurizzato 40 - 70 Mpa (400 - 700 bar)	Utilizzato per piccole/moderate quantità e realizzato in serbatoi ad alta pressione. Materiali utilizzati: alluminio, acciai legati o compositi (COPV- <i>Composite Overwrapped Pressure Vessels</i>). Cilindri pressurizzati per il trasporto stradale (300 kg o più).
Liquido refrigerato 20 K	Condensazione di gas a liquido, mantenendo la temperatura a circa 20 K. Vengono utilizzati serbatoi isolati con cortina di vuoto. Senza cattura e ri-liquefazione l'H ₂ perduto da piccoli serbatoi è 1%/giorno mentre 1%/mese su grandi serbatoi.

Stoccaggio e trasporto di H₂

Le principali soluzioni per il trasporto di H₂ sono:

- **Trasporto stradale e ferroviario di H₂ gas o liquido**

In contenitori di varia misura e sistemati in gruppi, pressione 180-250 bar (o superiore).

Il materiale generalmente usato è una lega Cr-Mo.

Problematiche in caso di incidente, in sede di carico/scarico (20% di perdita).

- **Trasporto navale**

Imbarcazioni simili a LNG-tanker, serbatoi super-isolati e sferici.

Attualmente allo stadio di R&D.

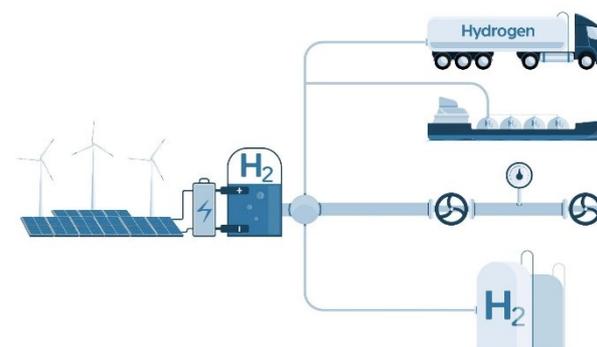
- **Trasporto in condotta**

Modalità preferibile ma ancora non normata, carenza di standard tecnici.

Pressione operativa 0.3-10 Mpa, diametro 10-300 mm.

Possibilità di trasporto in miscela con gas naturale.

Problematiche di compatibilità del materiale, vetustà delle reti esistenti, definizione delle distanze di sicurezza (da riconsiderare, specie in aree urbane).



D.M. 17 aprile 2008

Regola tecnica opere e impianti trasporto gas naturale

Condotte gas naturale

Pressione > 24 bar (< 60 bar)

Distanza sicurezza da manufatti: 30 m

Distanza da nuclei abitati: > 100 m

Stoccaggio e trasporto di H₂



Stoccaggio e trasporto di H₂

Altre modalità di stoccaggio e trasporto includono soluzioni per **evitare la compressione o il raffreddamento di H₂**:

- composti contenenti H₂ (idruri metallici, liquidi organici idrati, fullereni, metanolo, metil-cicloesano, ammoniaca, idrazina, etc.)
- *Slurry* di liquidi (poco utilizzato)

Molti di questi, tuttavia, presentano **rilevanti problemi di sicurezza** dovuti a:

- pericoli specifici delle sostanze
- proprietà infiammabili, talvolta piroforiche (sostanza che si incendia spontaneamente all'aria, anche a temperatura ambiente)
- compatibilità con i materiali di serbatoi, tubazioni, valvole, raccordi, ecc.
- tossicità
- comportamento in sede di controllo ed estinzione di incendi

Dispositivi di accumulo dell'H₂

Bombole di idrogeno (gas in pressione):

- Accumulo in bombole metalliche in pressione
- Contenitori in metallo e polimeri compositi (minor peso)
- Bombole in polimeri compositi (350-700 bar)
- Presenza di valvole di sicurezza

I materiali compositi sono circa 3 volte più leggeri e 3 volte più resistenti dell'acciaio.

Contenitori criogenici (liquido) o di idrogeno criocompresso:

- Contenitori speciali
- Dispositivi catalitici usati per ridurre le perdite

Idrati metallici (MH) ovvero H₂ accumulato in strutture molecolari solide

- Materiali speciali (in fase di ricerca)

Stazione di rifornimento di idrogeno

- Stazioni temporanee
- Stazioni conformi agli standard ISO con sistemi di raffreddamento

Accumulo di idrogeno in caverne sotterranee

Stazione di rifornimento prototipale

Una stazione di rifornimento è composta principalmente da due elementi:

- Accumulo di gas idrogeno
- Distributore di idrogeno

È basato su bombole in pressione montate su pacchi con un unico condotto che esce dalle bombole interconnesse.



Il pacco bombole è connesso al distributore.

Il distributore è formato da tubazioni, una delle quali è connessa ad una pistola di rifornimento



Il distributore ha una duplice funzione:

1. Connettere/chiusure il flusso di gas alla pistola di rifornimento
2. Depressurizzare e degassare i condotti dopo l'operazione di rifornimento

Stazione di rifornimento prototipale

Una stazione di rifornimento pubblica può essere posta vicino ad un sito di produzione di idrogeno.

I due devono però essere separati e il sito di produzione non può essere accessibile al pubblico.

Una stazione di rifornimento pubblica deve soddisfare tutti gli standard ISO.

L'idrogeno è compresso e accumulato a 350 o 700 bar (1000 bar stoccaggio intermedio).

L'idrogeno viene raffreddato a -40 °C prima del rifornimento per mitigare l'effetto di riscaldamento legato all'iniezione nel serbatoio del veicolo.

L'idrogeno, diversamente da molti altri gas, si riscalda quando espanso.

Se la temperatura durante il processo supera 85 °C , il rifornimento viene interrotto.

Stazione di rifornimento prototipale

Come funziona?

Stazione di rifornimento idrogeno

1. **Contenitori di idrogeno**
H₂ accumulato in bombole a 200 bars
2. **Fase di compressione**
H₂ compresso a 350 o 700 bars
3. **Contenitori buffer**
Accumulo di H₂ ad alta pressione

4. **Scambiatore di calore**
H₂ raffreddato a -40°C prima del rifornimento
5. **Distributore**
H₂ trasferito alla bombola del veicolo
6. **Dispositivi per il raffreddamento**
Fornisce refrigerante allo scambiatore
7. **Unità generale di controllo**



Regolamentazione del settore H₂

Quadro normativo italiano

**D.Lgs. 16 dicembre
2007 n. 257**

Il governo italiano ha recepito la direttiva europea **2014/94/UE** per la creazione di un'infrastruttura per i combustibili alternativi (tra cui H₂).

Stazione più avanzata: Bolzano (180 Nm³/h H₂), 15 autobus+700 auto /giorno

Fino al 2018

D.M. 31 agosto 2006

Regolamentazione della produzione e distribuzione di H₂.

L'H₂ assimilato ad un agente chimico industriale prodotto a larga scala da fonti fossili. Non contemplata la possibilità di produzione localizzata ad «emissione zero» da elettricità ed acqua.

Restrizione severa su stoccaggio dell'H₂ in qualsivoglia forma.

Dal 2018



Utilizzo pressione
fino a 700 bar
Allineamento con
ISO 19880

D.M. 23 ottobre 2018

Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione.

Impegno congiunto di VV.FF, Ministero Interno, Ministero Infrastrutture e Trasporti, Associazione italiana per l'idrogeno e le celle a combustibile (H2IT) e diversi attori industriali.

Concetto di base: analisi del rischio.

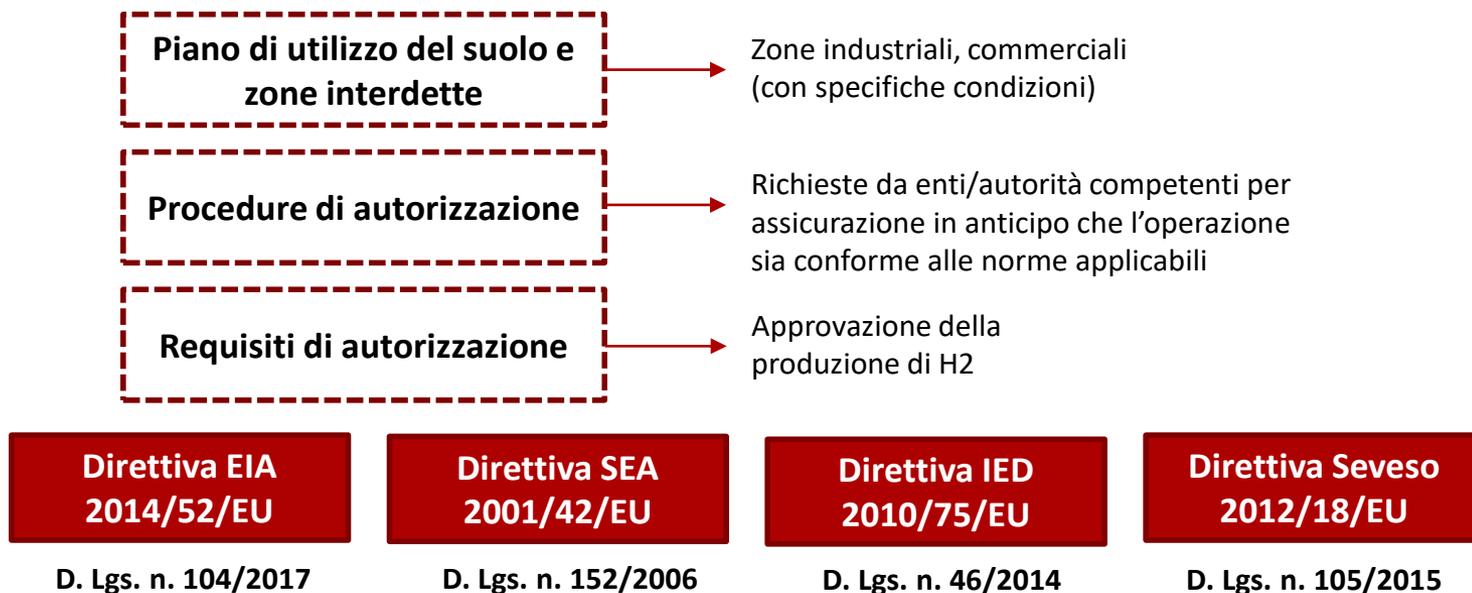
Installazioni per la produzione di H₂

La produzione di massa di H₂ è attualmente finalizzata all'utilizzo in **applicazioni industriali**.

La produzione centralizzata da fonti fossili è una pratica industriale ben consolidata con specifica regolamentazione. Su larga scala, la pratica più usata e competitiva è il reforming di fonti fossili che prevede emissioni di CO₂ e altri inquinanti.

Le diverse tecnologie nella filiera dell'H₂ hanno **diversi gradi di maturità tecnologica**.

La produzione di H₂, in Italia, è considerata un'attività industriale, indipendentemente dal metodo di produzione



Direttiva Seveso 2012/18/EU D.Lgs. n. 105/2015

Campo di applicazione: stabilimenti caratterizzati dalla presenza di sostanze o miscele pericolose in quantità superiori ai limiti di assoggettabilità. Per questi si rende indispensabile **monitorare il rischio di incidente**.

L'idrogeno rientra tra le sostanze pericolose ai fini del D.Lgs. n. 105/2015

Limiti di assoggettabilità

5 ton H₂ → SOGLIA INFERIORE

50 ton H₂ → SOGLIA SUPERIORE

Tra gli adempimenti vi è:

- redazione di un Rapporto di Sicurezza (soglia superiore)
- esecuzione di un'analisi di sicurezza (soglia inferiore)
- predisposizione, attuazione, simulazione di un piano di emergenza interno ed esterno
- informazione al pubblico
- consultazione pubblica su modifiche o nuovi siti
- studio di sicurezza integrato d'area (può essere richiesto dal CTR)



Accumulo stazionario di H₂

Campo di applicazione: stoccaggio di gas compresso, liquefatto, assorbimento chimico e fisico

Le regole tecniche per l'accumulo di idrogeno sono stabilite dal **D.M. 23 ottobre 2018 «Regola tecnica di prevenzione degli incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione dell'idrogeno per autotrazione»**

**Pressione massima di
stoccaggio 1000 bar**

**Quantitativo massimo di H₂
6000 Nm³**

**Stoccaggi progettati e realizzati
in conformità a ISO 19884**

Non esiste un processo uniforme di autorizzazione in Italia, specie per quanto riguarda uso del suolo e le distanze di sicurezza.

È richiesto il permesso da parte dei **VV.FF** (valutazione in termini di sicurezza e prevenzione incendi).

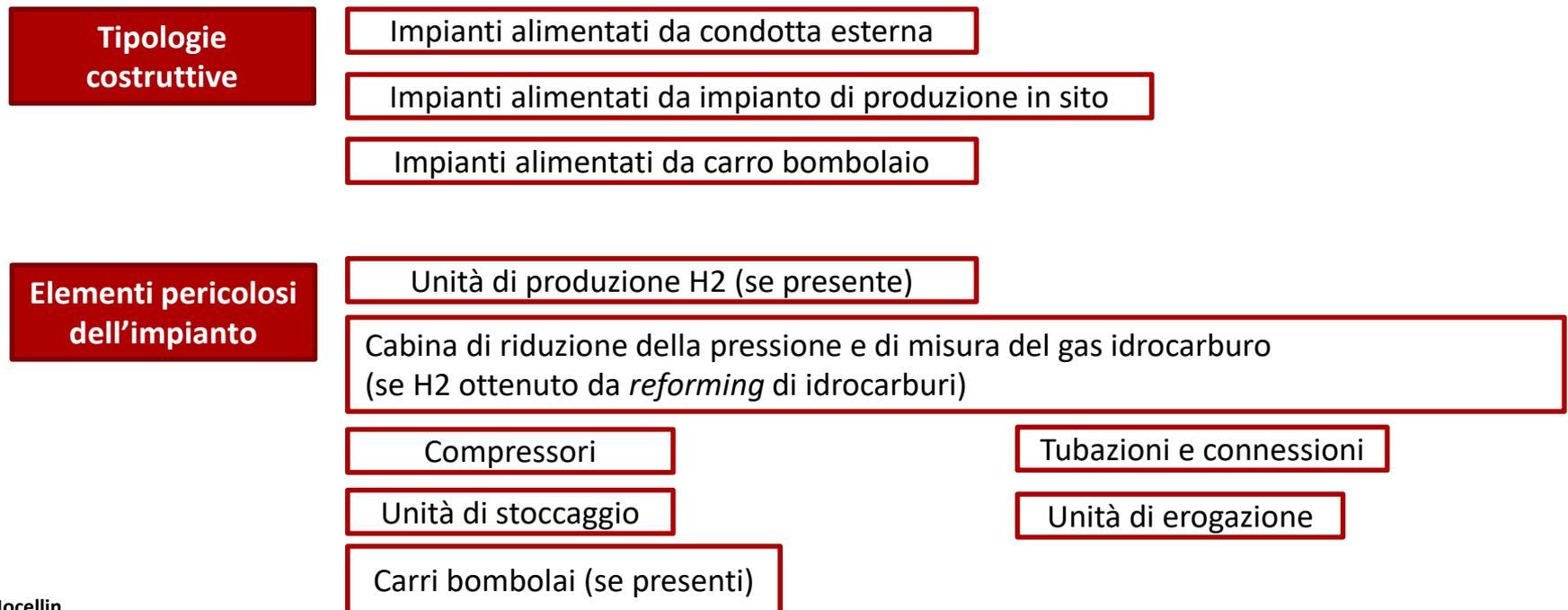
A seconda del luogo di installazione può essere necessario consultare il Comitato Tecnico Regionale (CTR), l'Agenda Regionale Protezione Ambiente (ARPA) e l'Autorità Locale per la Sicurezza.

Sicurezza antincendio

Per quanto riguarda la sicurezza antincendio, l'attività viene identificata nella categoria:

Impianti fissi di distribuzione carburanti gassosi e di tipo misto (liquidi e gassosi)

ovvero tra le **attività soggette ai controlli di prevenzione incendi** (attività **Categoria C** --> sopralluogo obbligatorio).



Sicurezza antincendio

La norma stabilisce le modalità costruttive richieste per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione.

Oltre alla sicurezza intrinseca dei componenti di impianto, la sicurezza antincendio deve anche essere garantita tramite una serie di rispetti inerenti alle **distanze di sicurezza** (Titolo III).

A) ELEMENTI PERICOLOSI DELL'IMPIANTO.

Elemento	Distanza di protezione (m)	Distanza di sicurezza interna (m)	Distanza di sicurezza esterna (m)
Compressori	15	-	30*
Stoccaggi	15	15	30
Box carro bombolaio	15	15	30

B) UNITÀ DI EROGAZIONE.

Elemento	Distanza di protezione (m)	Distanza di sicurezza interna (m)	Distanza di sicurezza esterna (m)
Unità di erogazione	15	12	30*

Per il locale compressori la distanza di sicurezza esterna, ad eccezione di quella computata rispetto ad edifici destinati alla collettività, può essere ridotta del 50% qualora risulti che tra le aperture del locale compressori e le costruzioni esterne all'impianto siano realizzate idonee **schermature di tipo continuo con muri in calcestruzzo o in altro materiale incombustibile di adeguata resistenza meccanica tali da assicurare il contenimento di eventuali schegge proiettate verso le costruzioni esterne**. Il dimensionamento di queste opere segue le indicazioni della Norma Tecnica delle Costruzioni 2018 e gli Eurocodici sulle azioni eccezionali dovute ad impatti ed esplosioni.

Sicurezza antincendio

Distanza di sicurezza esterna: distanza minima misurata in pianta tra il perimetro di ciascun elemento pericoloso di un'attività ed i seguenti elementi esterni al confine dell'attività e da preservare:

- a. i confini di aree edificabili,
- b. il perimetro del più vicino fabbricato,
- c. il perimetro di altre opere pubbliche o private.

Distanza di sicurezza interna: distanza minima misurata in pianta tra i perimetri dei vari elementi pericolosi di un'attività.

Distanza di protezione: distanza minima misurata in pianta tra il perimetro di ciascun elemento pericoloso di un'attività ed il confine dell'area su cui sorge l'attività stessa.

Sicurezza antincendio

Ulteriori distanze di sicurezza

Ufficio del gestore, magazzino, servizi igienici, officina senza utilizzo di fiamme libere e impianto lavaggio	Come sopra
Cabina energia elettrica	22 m
Abitazione gestore	Distanza sicurezza esterna
Posti di ristoro e/o vendita	Come sopra (fino a 50 m ²) 15 m dalla cabina di riduzione e misura gas e 22 m dagli altri elementi pericolosi (fino a 200 m ²); 30 m (oltre 200 m ²)
Edifici destinati alla collettività	Distanza sicurezza esterna x 2
Linee elettriche aeree (> 1000 V AC, > 1500 V CC)	45 m (rispetto alla proiezione in pianta)

Distanze di sicurezza differenti possono essere individuate applicando le metodologie dell'approccio ingegneristico (**Sezione M del Codice**).

Distanze di sicurezza

“Distanze di sicurezza differenti rispetto a quelle del presente titolo possono essere eventualmente individuate applicando le **metodologie dell’approccio ingegneristico** alla sicurezza antincendio previste dal decreto del Ministro dell’interno 9 maggio 2007.”

NUOVE SOLUZIONI

Giustificate da **dati sperimentali** o da **calcoli**

Criteri:

- Minimizzare le cause di incendio ed esplosione
- Limitare, in caso di evento incidentale, danni alle persone
- Limitare, in caso di evento incidentale, danni ad edifici o locali contigui.
- Permettere ai soccorritori di operare in condizioni di sicurezza

SCENARI PRINCIPALI

INCENDIO



Irraggiamento termico

ESPLOSIONE



Sovrappressione per azioni eccezionali

Aspetti specifici

MATERIALI COSTRUTTIVI

Compatibili con idrogeno alle temperature e pressioni di utilizzo.
Scelti anche in funzione del fenomeno dell'infragilimento (ISO 11114-4), permeabilità e porosità all'idrogeno.

IMPIANTI DI PRODUZIONE IN SITO

Conformi alla norma ISO 16110-1 (reforming da gas o idrocarburo).
Conformi alla norma ISO 22734-1 (elettrolisi).
In ogni caso, sistemati in appositi box delimitati da muri in c.a.

COMPRESSORI

Conformi alla norma EN 1012-3.
Devono disporre di un dispositivo di intercettazione di emergenza, sistema di sicurezza, sistema di svuotamento e inertizzazione.
In ogni caso, sistemati in appositi box.

UNITA' DI STOCCAGGIO

1000 bar, 6000 Nm³ in deposito (valori massimi).
Conformi alla norma ISO 19884.
Requisiti: struttura di supporto incombustibile (o protetta) e almeno R60.
Devono disporre di dispositivo di sicurezza attivato termicamente e poter essere isolabili dal resto dell'impianto.
Se i volumi sono maggiori di 6000 Nm³ devono essere previste delimitazioni in c.a. o altro materiale incombustibile.



Distributore di Brugg (Svizzera)

Distributore a Panchià (Trentino A.A.)



Distributore in Canada



Norvegia, Giugno 2019
Perdita di idrogeno. 3 feriti.



Aspetti specifici

IMPIANTO GAS

Requisiti sulla pressione di progetto (almeno 10 % di quella massima nominale di esercizio).

Dispositivi di misura con adeguata protezione.

Pressione massima di erogazione 700 bar.

Tubazioni rigide a giunti saldati o comunque ispezionabili.

Protezione dalle sovrappressioni, messa a terra.

Dispositivi di intercettazione e scarico: valvole di intercettazione di emergenza, valvole di scarico impianti di emergenza, valvole di intercettazione e scarico manuali.

Scarico di idrogeno ad un'altezza sufficiente.

SISTEMA DI EMERGENZA

Sistema di emergenza con le seguenti funzioni:

- Isolare completamente tubazioni di mandata.
- Isolare completamente linea di mandata dei compressori.
- Isolare completamente gli stoccaggi.
- Isolare completamente i carri bombolai e l'impianto su box.
- Interrompere integralmente il circuito elettrico.

Aspetti specifici

CIRCUITI PER L'ALIMENTAZIONE DEI SERVIZI DI SICUREZZA

Autonomia minima: 60 min.

Per gli impianti di spegnimento/raffreddamento: 120 min.

Tempo di commutazione tra alimentazione ordinaria e di emergenza: illuminazione emergenza (0.5 s), sistemi di controllo (15 s), impianti spegnimento/raffreddamento (15 s).

SISTEMI DI EMERGENZA

Sistema di rilevamento e controllo temperatura degli elementi pericolosi.
Sistema di rilevamento e controllo delle fughe di gas in tutta l'area suscettibile di formazione di un'atmosfera esplosiva.

Sistema di rilevazione della fiamma.

Tutte le segnalazioni devono pervenire ad apposite centrali collocate nell'ufficio del gestore. Segnale esterno luminoso e sonoro.

PROTEZIONE ANTINCENDIO

Estintori a protezione di ogni elemento pericolo (comunque 1 estintore ogni 100 m² di superficie in pianta per alcuni locali).

Carica nominale non inferiore a 6 kg con capacità estinguente non inferiore a 21 A 113 B.

Box carri bombolai e ogni unità di stoccaggio protetti con impianti di raffreddamento ad acqua ad azionamento automatico e manuale.

Impianto di produzione e compressore: reti idranti conforme a DM 20/12/2012.

Norme di esercizio

Esercizio ammesso sotto la sorveglianza del gestore e/o di una o più persone formalmente designate dal gestore. Il personale deve essere formato.

Rifornimento eseguito solo da personale addetto.

Nei box sono vietati stoccaggi di materiali infiammabili o combustibili.

Durante l'erogazione:

- Posizionare a portata di mano almeno un estintore pronto all'uso.
- Accertarsi che i motori dei veicoli da rifornire siano spenti.
- Far rispettare il divieto di fumo e impedire accensione/circolazione di fiamme libere entro 6 m dal perimetro delle unità di erogazione.
- Divieto di rifornimento di recipienti mobili.

Alimentazione dell'impianto con carro bombolaio:

- Sostituzione del carro non deve essere eseguita contemporaneamente ad operazioni di scarico di altri serbatoi.
- Il conducente deve essere presente durante le fasi di travaso.

Prescrizioni generali di emergenza

Il personale addetto deve essere edotto sulle norme del presente decreto, sul regolamento interno di sicurezza e sul piano di emergenza.

Intervenire immediatamente in caso di incendio o di pericolo agendo sui dispositivi e sulle attrezzature di emergenza in dotazione all'impianto. Deve altresì impedire che altri veicoli o persone accedano all'impianto, ed avvisare i servizi di soccorso.

MANUALE OPERATIVO CON LE ISTRUZIONI DI ESERCIZIO

PIANIFICAZIONE DI EMERGENZA CON PROCEDURE DI MESSA IN SICUREZZA DELL'IMPIANTO

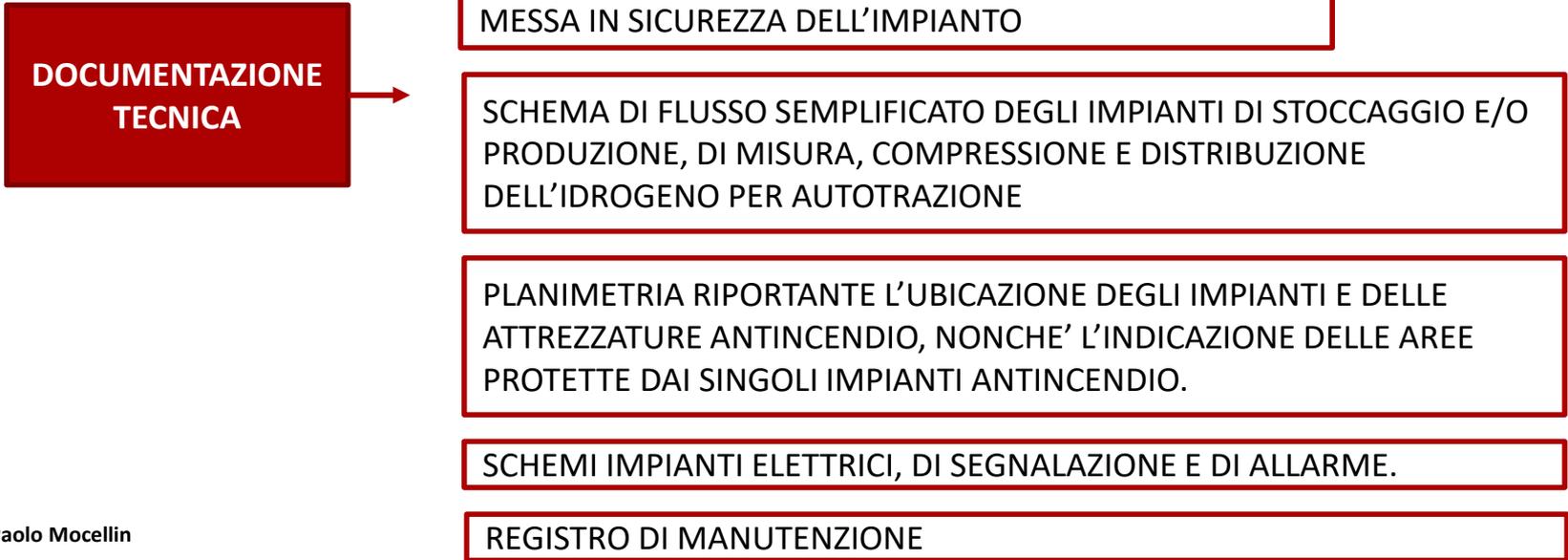
SCHEMA DI FLUSSO SEMPLIFICATO DEGLI IMPIANTI DI STOCCAGGIO E/O PRODUZIONE, DI MISURA, COMPRESSIONE E DISTRIBUZIONE DELL'IDROGENO PER AUTOTRAZIONE

PLANIMETRIA RIPORTANTE L'UBICAZIONE DEGLI IMPIANTI E DELLE ATTREZZATURE ANTINCENDIO, NONCHE' L'INDICAZIONE DELLE AREE PROTETTE DAI SINGOLI IMPIANTI ANTINCENDIO.

SCHEMI IMPIANTI ELETTRICI, DI SEGNALAZIONE E DI ALLARME.

REGISTRO DI MANUTENZIONE

**DOCUMENTAZIONE
TECNICA**



Impianti misti di distribuzione stradale per autotrazione

Distanze di sicurezza

Serbatoi di benzina e gasolio	15 m
Serbatoi di gas di petrolio liquefatto (GPL)	30 m 15 m (per le unità di erogazione di H₂)
Elementi pericolosi dell'impianto di distribuzione di gas naturale	22 m 12 m (per le unità di erogazione di H₂)

Schermature di protezione

Idonee schermature in materiale incombustibile di adeguata resistenza meccanica. Costituiscono schermatura le strutture perimetrali dei suddetti elementi pericolosi.

D.M. 7 Luglio 2023 «Regola tecnica di prevenzione incendi per l'individuazione delle metodologie per l'analisi del rischio e delle misure di sicurezza antincendio da adottare per la progettazione, la realizzazione e l'esercizio di impianti di produzione di idrogeno mediante elettrolisi e relativi sistemi di stoccaggio»

Elettrolizzatori e sistemi di stoccaggio di idrogeno gassoso

Nuova realizzazione

Esistenti ma in caso di modifiche rilevanti ai fini della sicurezza antincendio

FSE*

Protezione dalla
sovrappressione

Ridurre al minimo
rilasci accidentali

Informazione e
addestramento

* Se $P > 1000$ barg oppure sistemi di stoccaggio diversi dal Decreto oppure distanze di sicurezza inferiori al Decreto.

Distanze di sicurezza tra
elementi pericolosi
dell'impianto

Esterna fino a 30 m
Protezione fino a 15 m
Interna fino a 15 m

Dipendono dalla
pressione dell'idrogeno!

$P \leq 0,5$ barg;
 $0,5$ barg $< P \leq 50$ barg;
 50 barg $< P \leq 100$ barg;
 100 barg $< P \leq 300$ barg;
 300 barg $< P \leq 500$ barg;
 500 barg $< P \leq 700$ barg;
 700 barg $< P \leq 1000$ barg.

Trasporto di H₂ in serbatoi

Il trasporto di H₂ è considerato come quello di qualsiasi altro prodotto pericoloso o gas infiammabile e al regolamento è definita dal **D.M. 12 maggio 2017**, noto anche **ADR** (DIR/1016/2309/CE-ADR). Prevede norme che includono la classificazione delle merci ai fini del trasporto stradale, le procedure di spedizione (etichettatura, documentazione di marcatura) e disposizioni in merito alla costruzione, collaudo e omologazione di imballaggi, cisterne e serbatoi.

Non esistono tipologie specifiche di strade o percorsi speciali per H₂

L'H₂ è considerato come qualsiasi altro prodotto pericoloso

Vigono le medesime regole per il trasporto con riferimento alle gallerie, ponti e parcheggi



23 Gas infiammabile
1049 Idrogeno compresso
2034 Miscela H₂+CH₄
3468 Idrogeno in stoccaggio a idruro
1966 Idrogeno liquido refrigerato



Numerazione nel trasporto di idrogeno

23
1049

IDROGENO compresso infiammabile

223
1966

IDROGENO liquido refrigerato infiammabile

23
2034

MISCELA IDROGENO-METANO compressa infiammabile

3468

IDROGENO IN FORMA DI IDRURO (stoccaggio)

3479

CARTUCCE PER CELLE A COMBUSTIBILE (idrogeno in forma di idruro).
L'analogo 3478 contiene idrogeno in forma liquefatta.

Trasporto di H₂ nella rete gas

Con i regolamenti CE n. 713-714-715/2009 le reti gas europee per la trasmissione e distribuzione di gas sono state liberalizzate e aperte alla libera concorrenza.

Due attori: **TSO** (operatore responsabile della gestione e manutenzione rete nazionale dorsale ad alta pressione); **DSO** (operatore del servizio di distribuzione regionale e locale).

Rete TSO: diritto e obbligo di stabilire standard operativi per garantire un funzionamento sicuro ed efficace della rete.

Rete DSO: obbligo di soddisfare i requisiti tecnici e di sicurezza per l'infrastruttura operativa (condotte, compressione, valvole e raccordi) **configurata per una specifica qualità del gas.**

Al momento non è possibile iniettare H₂ nella rete del gas

Il 100% di H₂ non è ammesso in nessun caso

Aspetto critico: SICUREZZA

Attore principale: ARERA (Autorità di regolamentazione per i mercati dell'elettricità, del gas e dell'acqua)

Gas Grid Code (SNAM Rete Gas): H₂ max 0.5 % vol. con riferimento al bio-metano immesso in rete (in discussione un aumento fino a 1 %)

Trasporto di H₂ nella rete gas

La sicurezza è un aspetto critico per la gestione del trasporto gas in generale, in particolare H₂ e miscele H₂+CH₄.

L'autorità responsabile dell'interpretazione e monitoraggio delle misure di sicurezza è il Corpo Nazionale dei VVF.

Normativa di riferimento

D.M. 23 ottobre 2018

**Direttiva EIA
2014/52/EU**

D. Lgs. n. 104/2017

**Direttiva Seveso
2012/18/EU**

D. Lgs. n. 105/2015

**Direttiva SEA
2001/42/EU**

D. Lgs. n. 152/2006

**Direttiva ATEX
2014/34/EU**

D. Lgs. n. 85/2016

Qualsiasi impianto di iniezione di H₂ collegato ad una rete di distribuzione locale DSO

**Direttiva IED
2010/75/EU**

D. Lgs. n. 46/2014

Norma ISO 15916

La norma **UNI ISO/TR 15916** è il rapporto tecnico che fornisce le linee guida di base per la sicurezza dei sistemi ad idrogeno nelle forme gassose e liquide.

Principali contenuti:

- sicurezza dell'idrogeno gassoso e liquido
- conservazione dell'idrogeno
- problemi di sicurezza, pericoli, rischi
- proprietà dell'idrogeno rilevanti per la sicurezza
- impatto dell'idrogeno su alcuni materiali
- proprietà in sede di combustione

I requisiti di sicurezza per specifiche installazioni e applicazioni dell'H₂ sono trattati in norme separate.

TECHNICAL
REPORT

PD ISO/TR 15916:2015
ISO/TR
15916

Second edition
2015-12-15

**Basic considerations for the safety of
hydrogen systems**

*Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à
l'hydrogène*

Stazione di rifornimento di Bolzano Sud



Caratteristiche

H₂ da elettrolisi/carro bombolaio

Modalità di stoccaggio: H₂ compresso

Erogazione: 350 bar (2 linee), 700 bar (1 linea)

Capacità: pieno di 15 autobus urbani o 700 auto

3 elettrolizzatori modulari
(tot. 180 Nm³/h)

Tappe salienti dell'iter autorizzativo

Marzo 2014: inizio procedimento con richiesta di **deroga alla norma D.M. 31 agosto 2006** (pressione massima **da 350 bar a 700 bar**) presso l'Ufficio Prevenzione Incendi della Provincia di Bolzano.

Fine 2014: esiti dell'analisi del rischio per dimostrare che impianti a 700 bar hanno il medesimo rischio di quelli a 350 bar (da norma).

Rilascio autorizzazione, dopo approfondita valutazione ATEX e previa adozione di **misure di prevenzione e protezione del rischio**.

Stazione di rifornimento di Bolzano Sud

Misure di riduzione del rischio richieste:

- Dimensionamento impianto a 1000 bar (conservativo)
- Tubazioni prive di saldature e giunti, fino al misuratore di portata
- Misuratore di portata e valvole di sicurezza disposta in nicchia all'esterno della cabina di servizio (no accumulo di H₂)
- Raffreddamento a -40°C dell'idrogeno a 700 bar nel corso dell'erogazione
- Sezionamento della tubazione a 700 bar per ridurre la quantità di H₂ in caso di fuoriuscita

L'analisi del rischio ha previsto un'indagine di **casistica storica** su circa 40 impianti esistenti a 700 bar.
Al 30/06/2015: una media di circa **5 incidenti/anno**.

Scenari occorsi:

Incendio di H₂ a seguito di perdita da valvola di sicurezza o perdita indesiderata

Perdita indesiderata di H₂ (scenario più frequente)

Incendio di autoveicolo in prossimità dell'impianto di erogazione

Urto di autoveicolo sulla colonnina

Ferimento durante rifornimento

Esplosione di H₂

Scenari tipici di rischio e peculiarità dell'H₂

Incidentalità da H₂

La causa principale di incidentalità è l'**errore umano**: 26 % degli incidenti.

In particolare:

- Condizioni di lavoro inadeguate durante l'installazione, manutenzione, fabbricazione e pulizia.
- Carenza di addestramento e formazione, carenza di istruzioni operative corrette.

L'**esecuzione non corretta di procedure** è stata responsabile del 25 % degli incidenti.

Difetti di progettazione della componentistica, dei sistemi e della sicurezza: 22 %.

- Scelta impropria di materiali.
- Dimensionamento non corretto dei dispositivi di sicurezza.
- Protezione insufficiente contro le esplosioni (misure di protezione).
- **Analisi di sicurezza carenti o parziali** (14 % degli incidenti).

Altre cause includono **contaminazione, incompatibilità o danneggiamento dei materiali**.

Obiettivo n. 1

Minimizzare la possibilità di errore umano

Obiettivo n. 2

Garantire la sicurezza in caso di errore umano

Rilasci di H₂

Incidenti che coinvolgono H₂ possono avere origine da differenti pericoli:

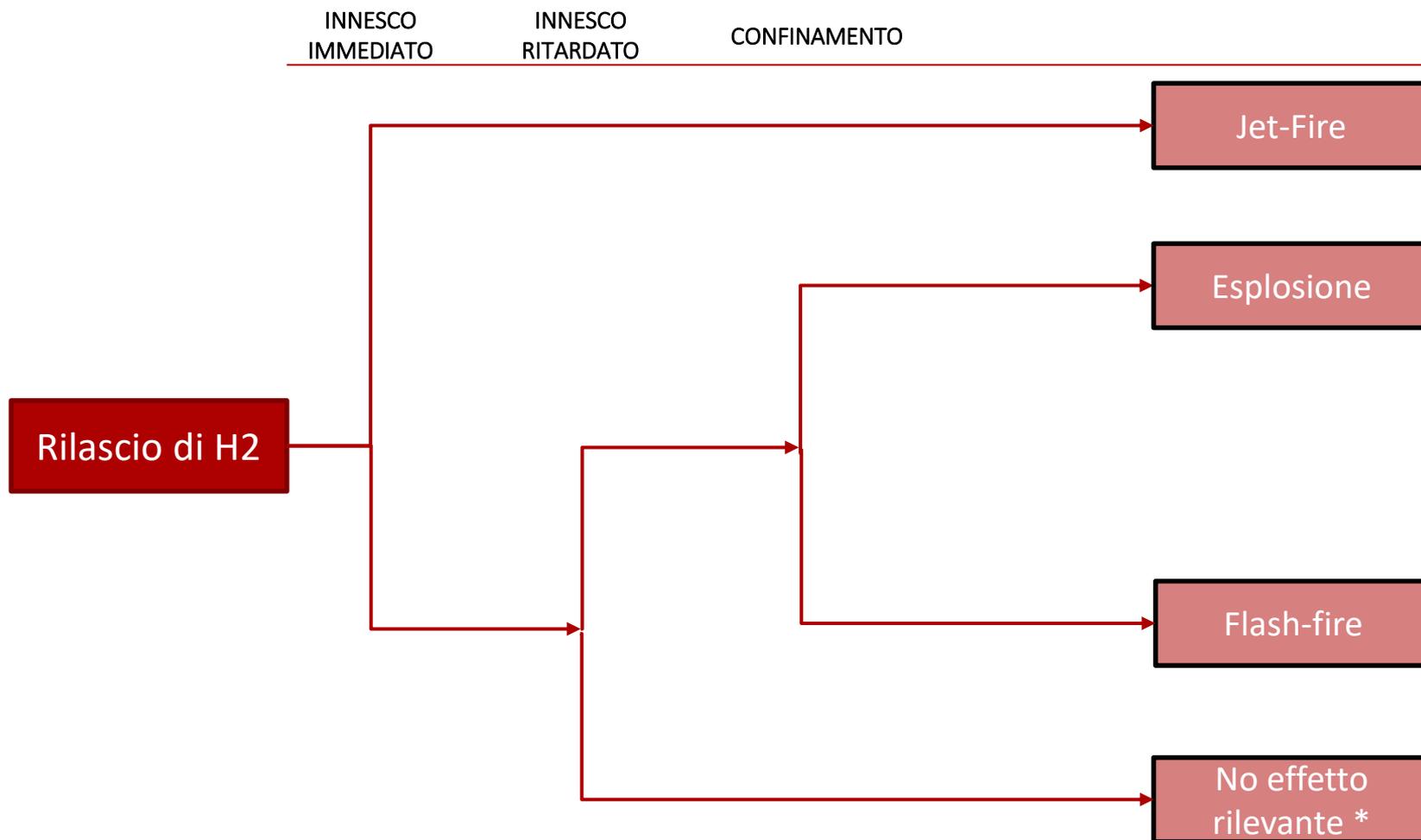
- Proprietà fisiche e chimiche dell'H₂
- Effetto di scenari quali incendi che seguono ad un rilascio di H₂ (irraggiamento)
- Effetto di scenari quali esplosioni che seguono ad un rilascio di H₂ (onde di pressione, proiezioni frammenti)

I pericoli associati all'H₂ potrebbero non determinare effetti avversi se sono messe in campo opportune **misure di sicurezza, adeguata progettazione e formazione del personale.**

L'H₂ essendo immagazzinato, processato e trasportato in apparecchiature pressurizzate può dare origine a rilasci accidentali.

Il rilascio accidentale è anche noto come perdita di contenimento (*Loss of containment*): una certa quantità di H₂ (istantanea o continua) viene rilasciata in un ambiente confinato o meno).

Rilasci di H₂



* a meno di rilascio di materiale criogenico con contatto e *oxygen displacement* in ambiente chiuso

Rilasci di H₂



Tipiche cause di rilascio di H₂:

- rottura di apparecchiature, connessioni, valvole, ecc.
- danneggiamento di tubazioni per infragilimento
- rilasci di emergenza di H₂
- errore umano e procedurale
- altri eventi esterni al sistema

Considerazioni sugli scenari con idrogeno

Jet-fire

Da una perdita e con innesco.
La principale problematica è l'impingement di superfici.

Esplosione

Da una perdita che si accumula in uno spazio confinato.
In caso di innesco, si ha esplosione con danneggiamento e/o impatto su persone.

Incendio

Da un accumulo verso il soffitto di idrogeno. Con innesco, non è in grado di generale sufficiente sovrappressione.
Molto pericoloso nel caso di afflusso di ossigeno.

Asfissia

Da una perdita che si accumula in uno spazio confinato.
La persona potrebbe svenire e/o morire.

Nessun effetto

Lo scenario più frequente.
Se la quantità è molto ridotta, generalmente non brucia.
Se la quantità è notevole ma non ci sono persone, l'effetto è sostanzialmente nullo (se non c'è esplosione).

Peculiarità dei rilasci di H₂

La natura del rilascio dipende dalle proprietà dell'H₂ che, a loro volta, sono determinate dalle condizioni in cui è processato l'H₂:

- rilascio di idrogeno criogenico
- rilascio di idrogeno pressurizzato
- rilascio di idrogeno caldo



Caratteristiche fondamentali dei rilasci di H₂:

1. Ciò che è a tenuta d'aria non lo è per l'H₂
2. L'H₂ ha la capacità di disperdersi molto velocemente ed efficacemente (forma rapidamente miscele infiammabili)
3. In condizioni normali (20°C, 1 atm) è 14 volte più leggero dell'aria pertanto tende a stratificare al soffitto
4. 1 litro di H₂ liquido, bollendo, rilascia circa 850 l di gas. Questo gas è più pesante dell'aria e tende, inizialmente, a stratificare al suolo

Jet-fire di H₂



Jet-fire di H₂

Il jet-fire (o getto pressurizzato infuocato) di H₂ ha luogo quando l'H₂ subisce **innesco immediato** e viene rilasciato da un **contenimento in pressione**.

È un fenomeno estremamente direzionato ed è associato alle seguenti problematiche:

- riscaldamento di apparecchiature vicine
- innesco di altri materiali
- ustioni di grado severo

Lo scenario è di interesse perché l'unica modalità per interromperlo, quando possibile, è l'**intercettazione del flusso di H₂ attraverso valvole di sezionamento** (automatiche o manuali, purché posizionate in luogo protetto).



Tipiche sorgenti di *jet-fire*:

- Forature in serbatoi e cilindri pressurizzati
- Disconnessione di tubazioni, difetti di installazione
- Valvole difettose
- Sfiati di emergenza

La fiamma di H₂ non è facilmente visibile.

Jet-fire di H₂



- È lo scenario atteso nel caso di perdita pressurizzata di idrogeno con innesco.
 - È fortemente direzionato ed intenso
 - Danneggiamento di materiali ed apparecchiature
 - È un fuoco che va gestito solo intercettando la sorgente di materiale combustibile.
-
- Elementi di vulnerabilità: flange, connessioni, bocchette, bombole, ...
 - Spie dell'evento: tipico «sibilo», fiamme localizzate (se visibili), calore.
 - Tempistiche di collasso delle apparecchiature: entro 10 min.

Flash-fire di H₂



Flash-fire di H₂

Il flash-fire di H₂ è un incendio caratterizzato da **breve durata** e danno limitato al raggio di influenza della fiamma che ha luogo in caso di **rilascio istantaneo** di H₂.

È un fenomeno localizzato e di breve durata (qualche secondo, < 2-4 s) ed è associato alle seguenti problematiche:

- ustioni severe esterne ed interne se coinvolti dalle fiamme
- in ambienti chiusi, consumando l'O₂ disponibile, può determinare situazioni di sotto-ossigenazione

Lo scenario è di interesse perché ad **evoluzione molto rapida** ed estremamente letale se coinvolge personale che dovesse ritrovarsi **avolto dalla nube infiammabile**.



Tipiche sorgenti di *flash-fire*:

- rilascio di piccole quantità di H₂ da connessioni, flange difettose
- Rilascio di H₂ in sede di movimentazione, sversamento di H₂ liquido
- Rottura istantanea del contenimento (quando non esplosiva)

Flash-fire di H₂



- È lo scenario atteso nel caso di accumulo di piccole quantità di idrogeno in sacche o a soffitto.
 - Non dà particolari effetti se non vi sono bersagli nell'area.
 - Viene gestito con adeguate misure di prevenzione e protezione.
-
- Elementi di vulnerabilità: perdite e accumuli non presidiati di idrogeno.
 - Spie dell'evento: nessuna (se non viene opportunamente rilevato).
 - Tempistiche: in caso di innesco e con la presenza di un bersaglio, l'effetto è immediato e riguarda la breve distanza.

Esplosione di H₂

L'H₂ in aria (ma non solo) forma miscele esplosive nell'intervallo **15-59 % vol.**, lo scenario risultante è l'esplosione della miscela infiammabile (VCE-Vapor Cloud Explosion). I limiti di infiammabilità sono invece **4 - 75 % vol.** in aria.

A differenza di un incendio (*flash-fire*), l'effetto principale è la formazione di un'onda di pressione che può:

- danneggiare sistemi, apparecchiature e strutture (e innescare effetti domino)
- ferire o uccidere persone
- proiettare frammenti pericolosi



L'intensità dell'esplosione dipende anche dal grado di confinamento: le esplosioni che hanno luogo in spazi confinati sono più severe.

Deflagrazioni → velocità sub-sonica

Detonazioni → velocità sonica, necessita di innesco rilevante e confinamento (rare in ambiente aperto)

Esplosione di H₂: considerazioni sulla sicurezza

Le considerazioni sulla sicurezza associate agli eventi esplosivi che coinvolgono idrogeno includono:

- Analisi dei contesti nei quali un guasto possa dare origine a miscele nei limiti di esplosibilità.
- Analisi dell'influenza del grado di confinamento sia all'interno che all'esterno dei sistemi.
- Analisi delle conseguenze legate alla formazione di elevate pressioni, gas caldi, radiazione e rapida propagazione di fronti di fiamma.

Deflagrazioni di miscele H₂-aria possono dare pressioni anche **8 volte superiori** a quella iniziale, mentre detonazioni anche **20 volte superiori**.



Impatto sulla scelta dei dispositivi di sicurezza (tempi di risposta).

Es. **valvole di sicurezza e dischi di rottura sono efficaci solo nel caso di deflagrazioni.**

In ogni caso, la potenzialità di dare un'esplosione va sempre considerata.

**Strategie per minimizzare
la formazione di miscele
esplosive**

Evitare confinamenti e congestionamento.

Utilizzare arrestatori di fiamma.

Utilizzare diluenti o tecniche di sottrazione dell'ossigeno per ritardare l'accelerazione della fiamma.

Utilizzare sempre sistemi a pressione positiva.

Esplosione di H₂

La potenzialità di avere deflagrazioni o detonazioni deve sempre essere analizzata nelle strutture che immagazzinano, trasportano o processano H₂.

Le strategie da adottare includono:

- evitare il confinamento dove è possibile la formazione di miscele infiammabili di H₂
- utilizzare arrestatori di fiamma e dispositivi di sfiato per esplosioni
- ridurre la dimensione del sistema

Se non è possibile eliminare la possibilità di deflagrazione/detonazione è necessario ricorrere a misure protettive:

- muri e sistemi di protezione (dimensionati)
- distanziamento e layout



Esplosione di H₂

Tra le tipiche cause di esplosione vi sono:

- presenza di aria nei circuiti
- ritorni di fiamma lungo le tubazioni sprovviste di adeguati dispositivi di sicurezza
- fughe di gas in ambienti chiusi



BS EN IEC 60079
Normativa ATEX
Allegato H – Idrogeno
(Gas gruppo IIC; Miscele con metano fino a 25 %
H₂ gruppo IIA secondo BS EN ISO 80079-20-1)

+

ISO/TR 15916
Sicurezza dell'idrogeno

Una detonazione può generare pressioni (dinamiche) anche 20 volte superiori a quella iniziale.

Se la detonazione ha origine all'interno di apparecchiature, **i dispositivi di sicurezza** (valvole sicurezza, dischi di rottura, ecc.) **non sono efficaci**.

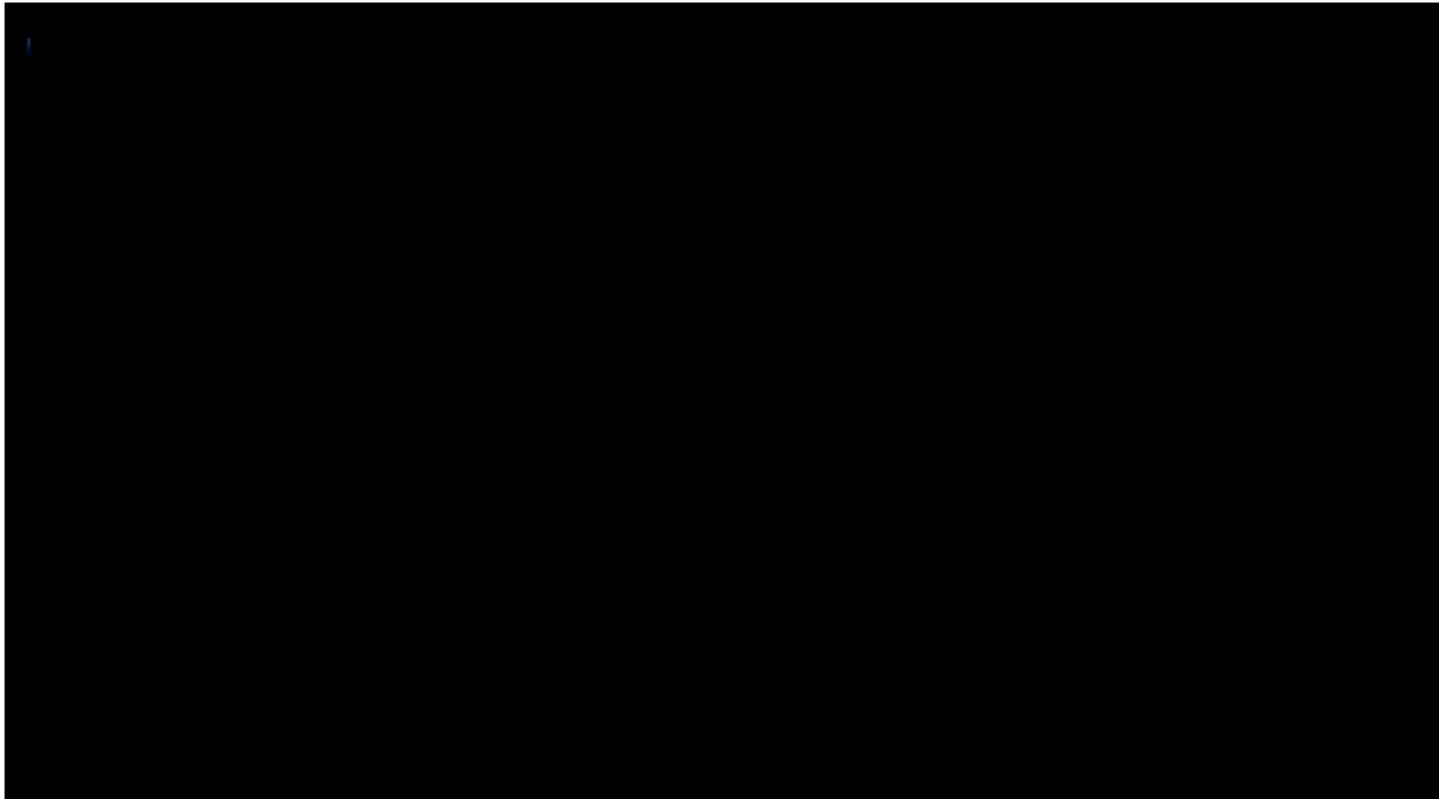
Esplosione di H₂



- È lo scenario atteso nel caso di accumulo di idrogeno in ambiente confinato con innesco ritardato.
 - Può danneggiare seriamente le strutture e provocare impatto sulle persone.
 - È uno scenario che non può essere gestito una volta iniziato.
-
- Elementi di vulnerabilità: rilasci (anche deboli ma prolungati), perdite incontrollate, difetti di installazione, guasto alla ventilazione.
 - Spie dell'evento: nessuna (se non vengono utilizzati appositi rilevatori).
 - Tempistiche: l'idrogeno è facilmente accendibile se non vengono controllate le sorgenti di innesco.

Collasso con esplosione di H₂ (BLEVE)

Il BLEVE (*Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion*) è un caso particolare di esplosione a cui segue incendio (in forma di palla di fuoco, *fireball*) e proiezione di frammenti.



Collasso con esplosione di H₂ (BLEVE)

Si manifesta in forma di **rilascio istantaneo di una certa quantità di sostanza pressurizzata**.

Tipica dinamica dello scenario:

1. esposizione di un serbatoio ad un **incendio esterno** (con o senza contatto diretto delle fiamme)
2. riscaldamento del materiale costruttivo (degradazione delle proprietà meccaniche)
3. riscaldamento del contenuto
4. aumento della pressione
5. collasso del serbatoio
6. rilascio del contenuto e, se infiammabile, innesco con formazione di una palla di fuoco (**fireball**) e proiezione di frammenti.

In impianti che processano H₂ questo scenario può avere origine da:

- *jet-fire* di H₂ che colpisce e riscalda un'apparecchiatura (deterioramento del materiale)
- sfiato di emergenza da dispositivo di sicurezza con rilascio innescato

Caso studio: Sandvika refueling station (Oslo, Norway)

Caratteristiche dell'incidente



«*Massive explosion*»

Chiusura di due arterie di comunicazione

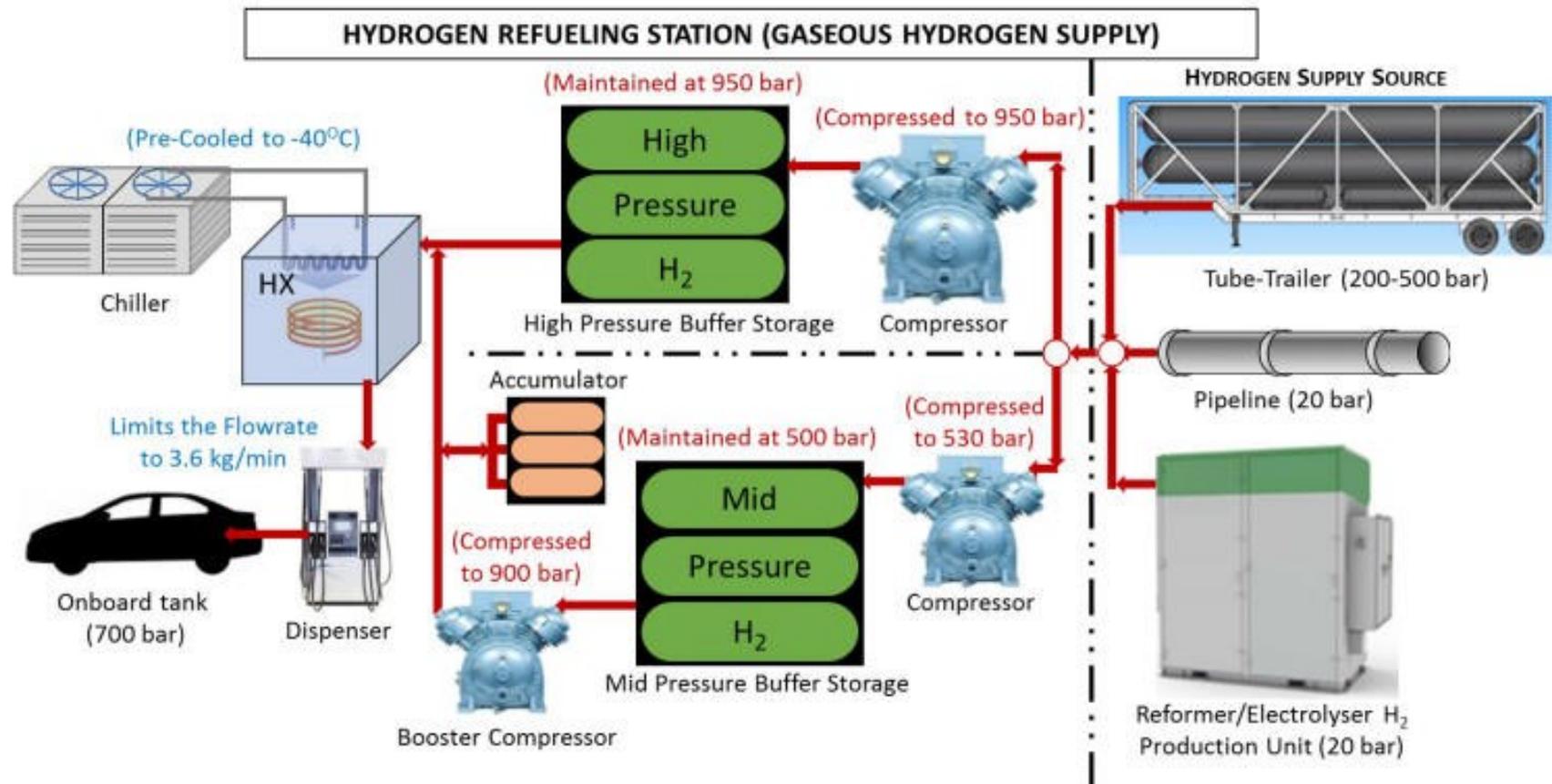
Zona di sicurezza di **500 m**

Nessun ferito ma danneggiamento severo della stazione di rifornimento

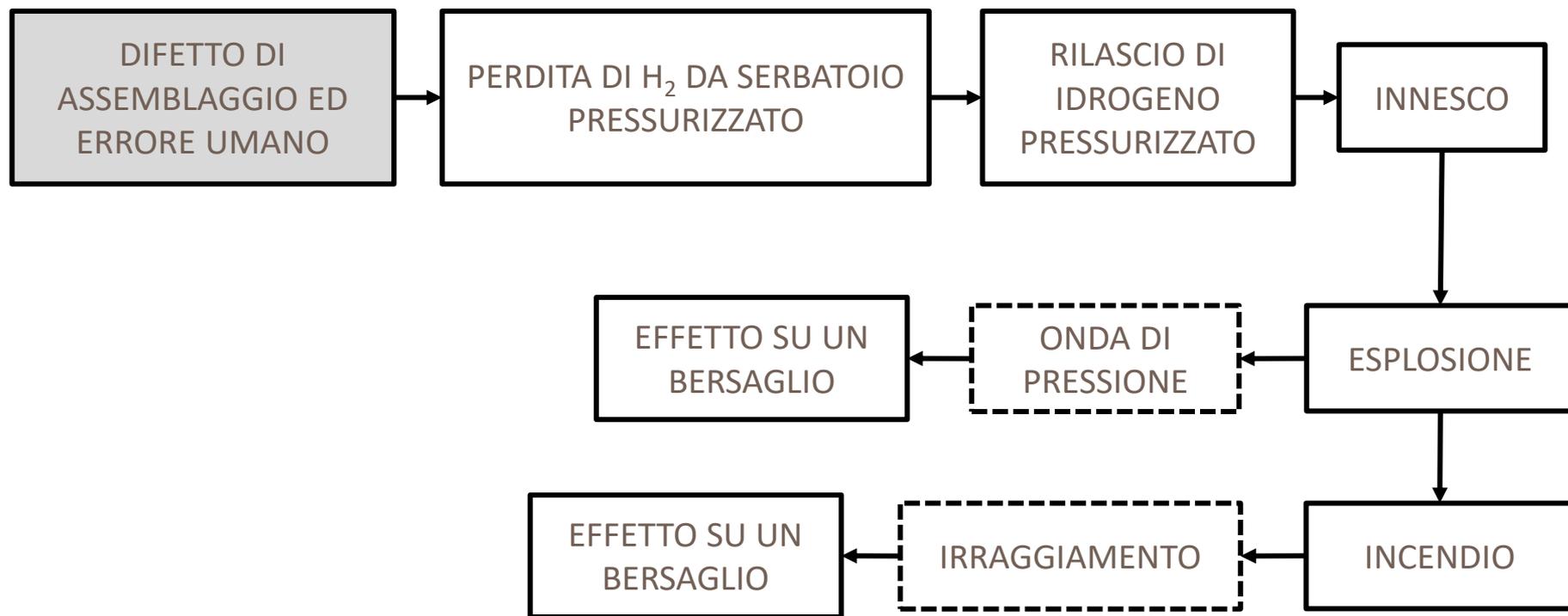
Causa: **errore di assemblaggio**

Investigazione: *Gexcon*

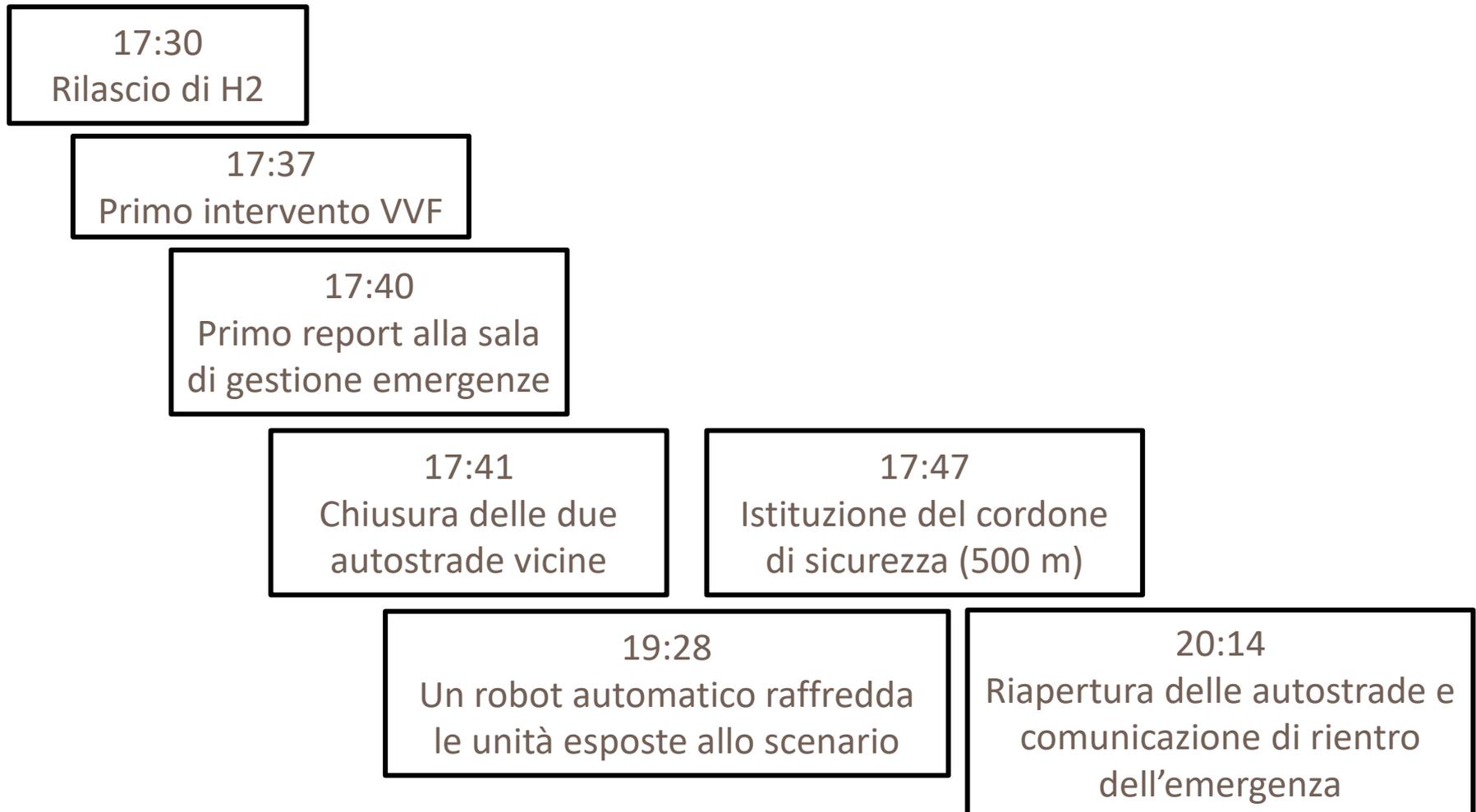
Schema tipo di una stazione di rifornimento per H₂



Dinamica dell'incidente

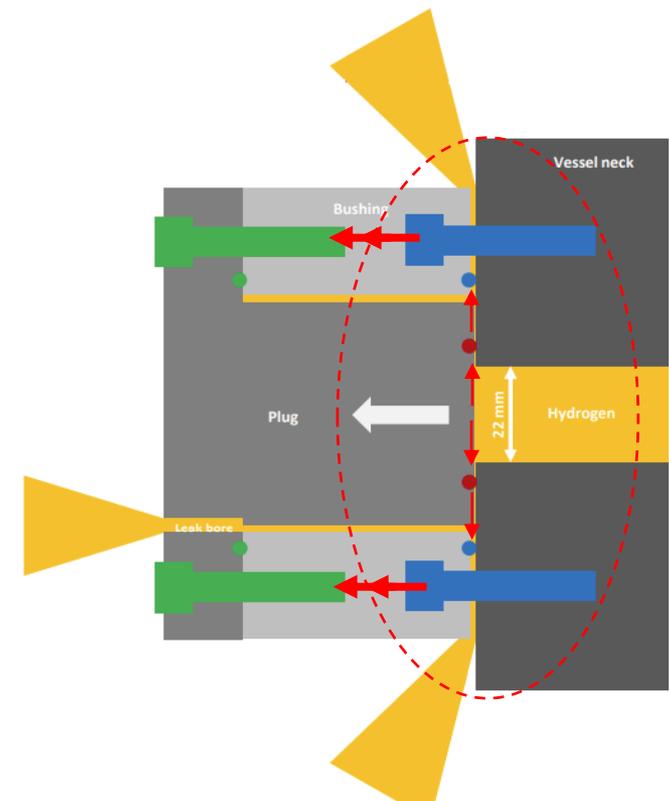
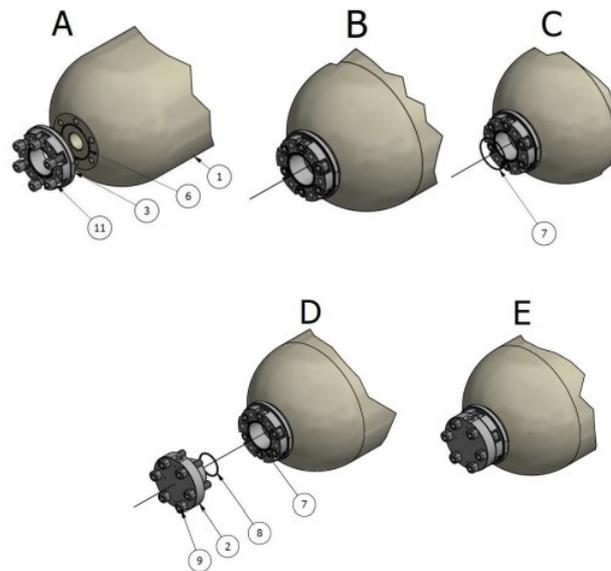


Dinamica dell'incidente



Dettaglio dei serbatoi di H₂

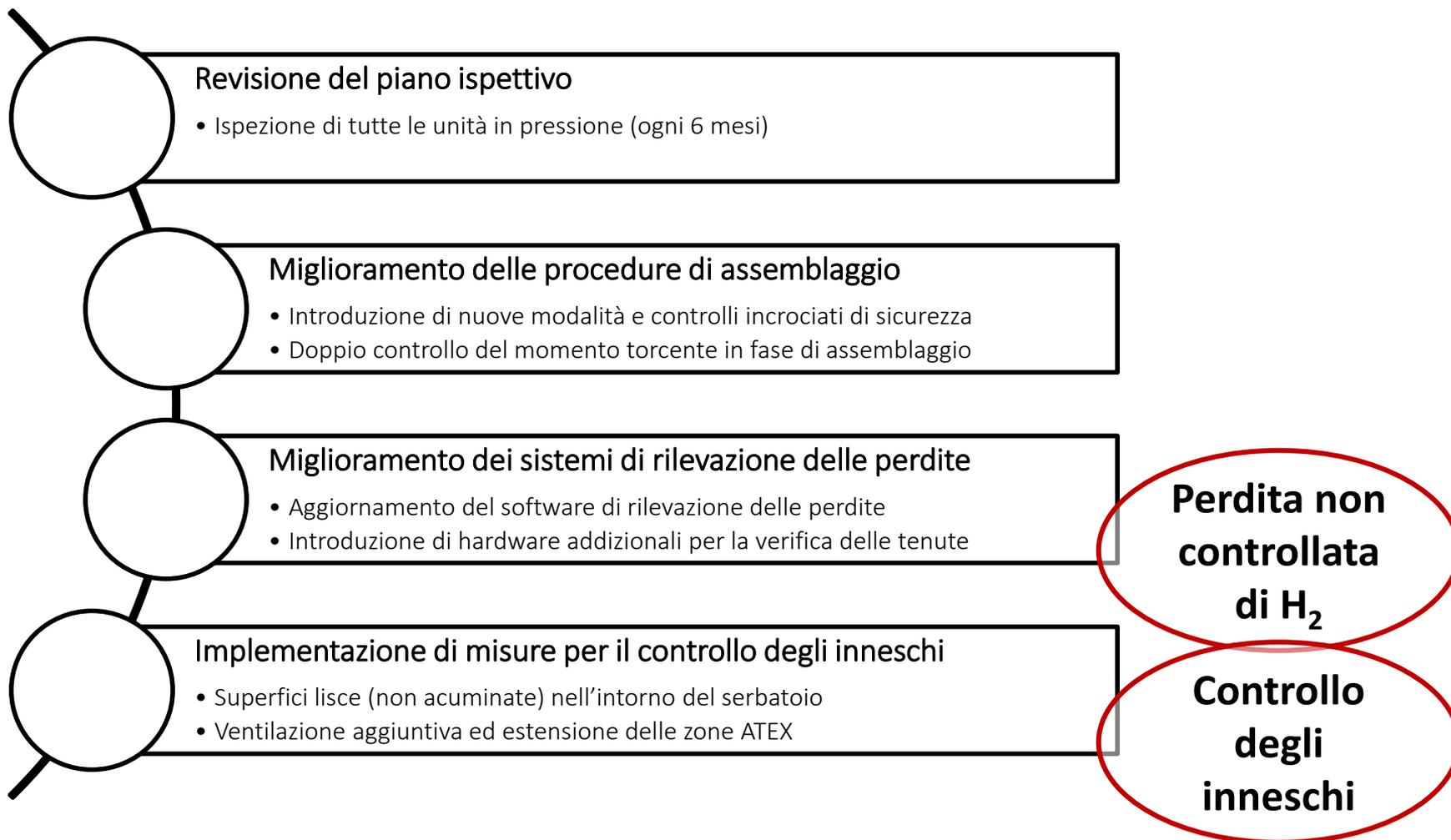
Errore di assemblaggio di un componente nel serbatoio di alta pressione per H₂.



Analisi delle cause incidentali

- **Materiali – OK**
 - Test magnetico di integrità
 - Test di penetrazione
 - Verifica dei materiali
- **Progettazione – OK**
 - Test con 1M di cicli
- **Assemblaggio – NON OK**
 - Test delle tenute
 - Momento torcente non sufficiente
 - Presenza di disallineamenti tra elementi di serraggio

Azioni migliorative



Alcune conclusioni

L'incidente alla stazione di servizio è stato di grado severo

La risposta dei servizi di emergenza e della comunità è stata rapida ed efficiente

L'analisi delle cause è stata fondamentale per identificare l'evento iniziatore (perdita da tenute)

L'analisi post-incidentale ha guidato azioni migliorative sulle procedure di assemblaggio e sui controlli periodici

Pericoli fisiologici da H₂

Asfissia, soffocamento

L'idrogeno **non è tossico** e non dà particolari problematiche di tipo acuto o cronico.

Tuttavia, come per qualsiasi altra sostanza gassosa (che non sia O_2), esiste il **rischio di asfissia** se rilasciato in ambiente confinato, sostituendosi alla quantità vitale di O_2 .

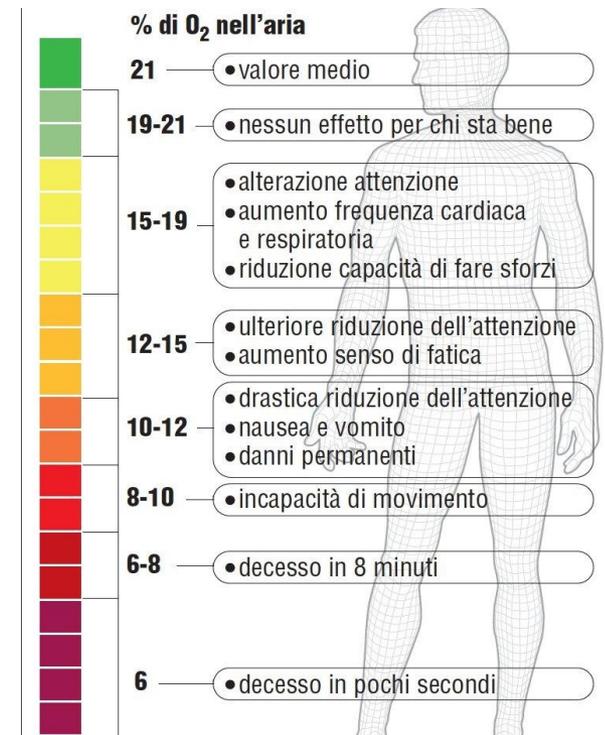
Concentrazione minima di O_2 tollerabile: **19.5 % vol.**

Tipici sintomi di *oxygen displacement*: mal di testa, vertigini, difficoltà respiratoria, nausea, incoscienza.

L' H_2 , se inalato in piccole quantità e per breve tempo, può dare sonnolenza e alterazione del timbro della voce.

Precauzioni essenziali: ventilazione, dispositivi di protezione individuale (DPI) – dispositivi di respirazione, sensori portatili di concentrazione.

In caso di incendio primario che coinvolge l' H_2 , l'intossicazione per inalazione di fumi è ritenuta meno preoccupante di altri scenari.



Ustione da caldo

Le ustioni da caldo sono determinate dal **calore irraggiato dalla fiamma di H₂** (temperatura di fiamma > 2000°C).

L'entità dell'irraggiamento è comunque **inferiore ad un analogo fuoco di idrocarburi** (metano, GPL, benzine, ecc.).

Tuttavia, la fiamma di idrogeno è **poco visibile** ed esiste il rischio di ustione per esposizione dal momento che l'operatore potrebbe non avvertire la prossimità delle fiamme.

Il contatto diretto con fiamme o gas di combustione causa **ustioni** di grado severo.

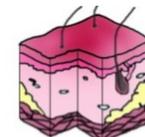
Precauzioni essenziali: abbigliamento protettivo in cotone, antistatico e con ritardante di fiamma; dispositivi di rivelazione del fuoco.

Radiazione termica kW/m ²	Effetto
1.4	Nessun effetto particolare
4-5	Dolore entro 20 s, ustione di 1° grado entro 30 s
9.5	Dolore immediato, ustione di 2° grado entro 20 s
12.5-15	Ustione di 1° grado entro 10 s, 1% morte in 1 min
25	Effetti irreversibili entro 10 s, morte certa in 1 min
35	Morte certa entro 10 s

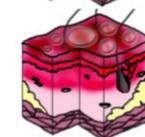
1° grado: riguardano lo strato superficiale della pelle ovvero l'**epidermide**.

2° grado: coinvolgono l'epidermide e **derma**.

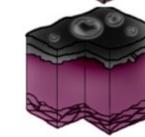
3° grado: coinvolgono epidermide, derma e **tessuto sottocutaneo**.



Epidermide



Epidermide
Derma



Epidermide
Derma
Tessuto sottocutaneo

Ustione da freddo

Le ustioni da freddo (*frostbite*) sono determinate da contatto con gas freddi, idrogeno liquido o parti metalliche molto fredde.

L'esposizione a sorgenti molto fredde determina:

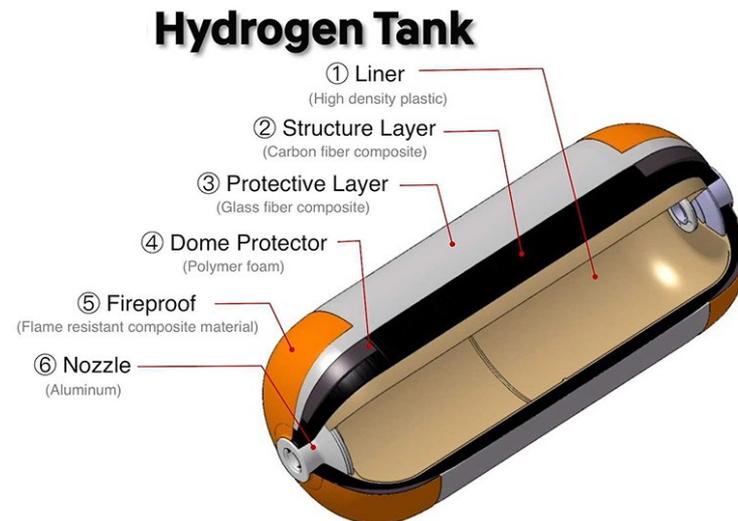
- danneggiamento (anche irreversibile) dei tessuti
- ipotermia (temperatura corporea < 32.2-35 °C)

L'idrogeno, quando rilasciato, potrebbe raggiungere temperature anche di -250 °C.

Precauzioni essenziali: abbigliamento e guanti protettivi, occhiali protettivi; sistemi costruttivi di protezione dal freddo.



Paolo Mocellin



Pericoli fisici da H₂

Infragilimento di materiali

Il fenomeno dell'infragilimento indotto da H_2 (*Hydrogen embrittlement*) consiste in un **aumento della fragilità** e nella comparsa di **cricche** in un materiale metallico esposto ad un atmosfera ricca di H_2 .

È un fenomeno con **effetti a lungo termine**, manifestandosi in **utilizzi** prolungati del materiale o dell'apparecchiatura.

Le proprietà dei materiali vengono degradate a tal punto da generare **perdite di contenimento** (→ incendi, esplosioni).

Il meccanismo con cui ha luogo l'infragilimento non è ancora ben noto ma i principali fattori includono:

- concentrazione di idrogeno (ovvero purezza della corrente)
- pressione e temperatura operativa
- tempo di esposizione all' H_2
- condizione del materiale e della sua superficie

Infragilimento di materiali

Materiale	Infragilimento severo	Infragilimento moderato	Infragilimento lieve	Infragilimento trascurabile
Leghe di alluminio				
1100				x
6061-T6				x
7075-T73				x
Lega Be-Cu 25				x
Rame				x
Nickel 270		x		
Acciai				
Alloy 4140		X		
Acciaio al carbonio				
1020			X	
1042 (normale)			X	
1042 (temprato)		X		
18Ni-250	X			
Acciai inossidabili				
304		X		
310			X	
316			X	
410		X		
Inconel	X			
Titanio/Leghe di titanio				
Titanio			X	
Ti-5Al		X		
Ti-6Al		X		

Soluzioni all'infragilimento dei materiali

1. Scegliere e utilizzare materiali idonei

Scala di resistenza all'infragilimento (decescente):

Alluminio e leghe di alluminio (con H₂ secco) > acciai inossidabili > acciai al carbonio

2. Preferire, se possibile, alluminio e relative leghe

3. Selezionare acciai medio-resistenti per applicazioni con H₂ gassoso e acciai inossidabili con H₂ liquido

4. Non usare ghisa e metalli/leghe che potrebbero formare idruri con H₂

5. Rivestire e proteggere il materiale con sostanze (a base di ossidi)

6. Eliminare le azioni concentrate sul materiale

Temperature operative molto basse (stoccaggio refrigerato)

La scelta di un opportuno materiale per applicazioni con H₂ liquido è governata, in primo luogo, dalle sue proprietà meccaniche del materiale (duttilità, tensione di snervamento, forza all'impatto).

Il materiale deve garantire l'operatività in caso di:

- temperatura operativa estremamente bassa (-250 °C)
- temperatura molto elevata (ovvero in caso di incendio)

ISO 15916:2015

Tabella C.2

Il materiale pertanto deve essere stabile dal punto di vista metallurgico (no cambio di struttura cristallina).

La scelta deve tenere in considerazione:

- **l'infragilimento a bassa temperatura** (il materiale non deve diventare fragile a temperature maggiori, esempio: polimeri)
- la **contrazione termica del materiale** (0.3 % per leghe base Fe, 0.4 % per alluminio, 1 % per plastiche; specialmente in materiali compositi o multi-strato, come nel caso degli isolanti per serbatoi criogenici).

Pericoli chimici da H₂

Infiammabilità dell'H₂

Il principale pericolo connesso a sistemi con H₂ è la **combustione incontrollata** di rilasci accidentali di H₂.



INCENDIO

DEFLAGRAZIONE

DETONAZIONE

Il fuoco (incendio o esplosione) è possibile se sono compresenti il **combustibile** (H₂), l'**agente ossidante** (aria) e un'**efficace sorgente di innesco**.

Le miscele H₂-aria sono infiammabili in un ampio range di concentrazione, pressione e temperatura.

Infiammabilità dell'H₂

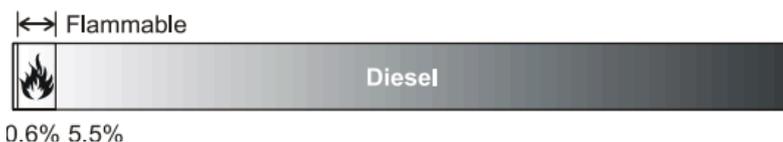
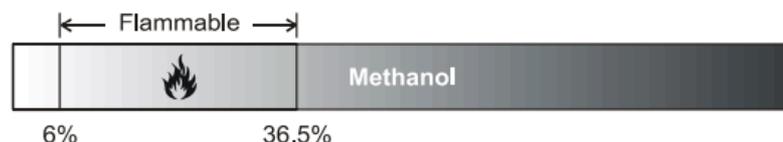
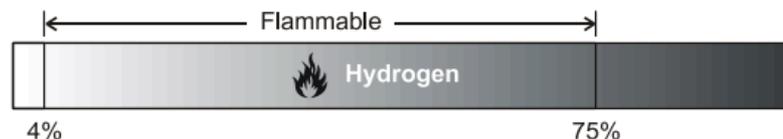
L'infiammabilità di miscele H₂+aria, oppure con O₂ o altri agenti ossidanti dipende:

- dall'energia di innesco
- dalle **condizioni operative** (temperatura e pressione)
- dalla presenza di **diluenti**
- dalla **configurazione delle apparecchiature**.

Se la concentrazione di H₂ è inferiore a LFL o superiore a UFL, la miscela non dà combustione anche a seguito di innesco.



Infiammabilità di miscele H₂ - aria



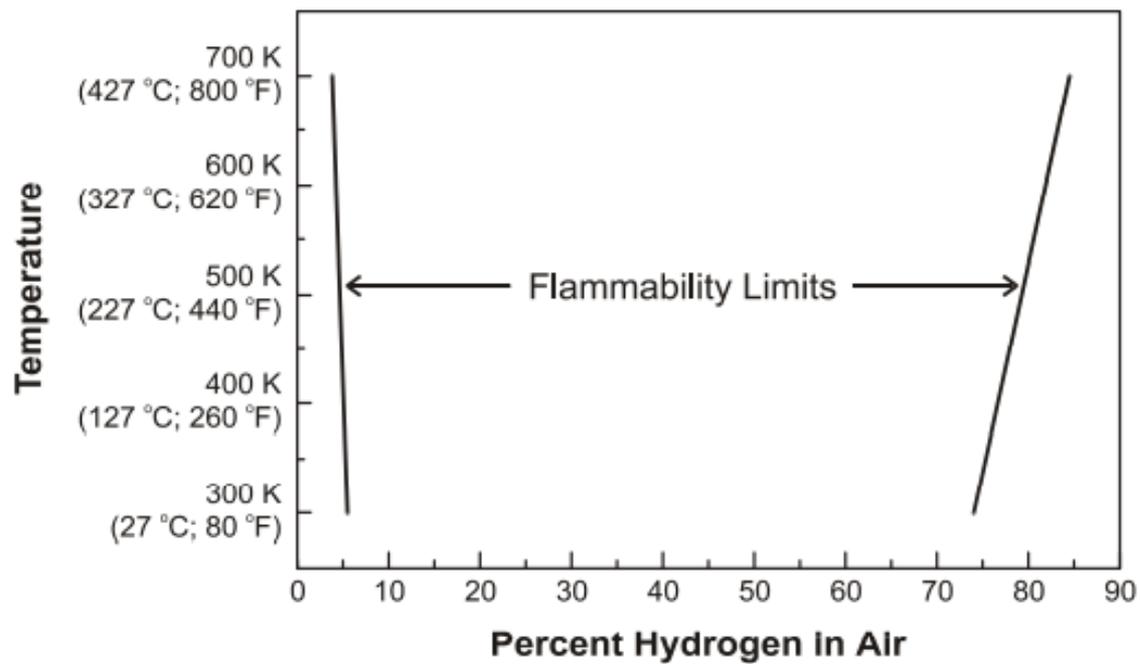
L'H₂ stoccato (gassoso o liquido) non è infiammabile finché contenuto nei serbatoi, a causa dell'assenza di O₂ nei cilindri. Ma diventa infiammabile nelle aree periferiche (in prossimità di forature, perdite, etc.).

Limiti di infiammabilità: 4-75 %

Limiti di esplosività: 15-59 %

Un aumento di temperatura o pressione determina un allargamento dell'intervallo pericoloso.

Infiammabilità di miscele H₂ - aria



Infiammabilità di miscele H₂ - aria

L'esperienza mostra che l'H₂, quando rilasciato accidentalmente, è soggetto molto facilmente ad innesco.

Le **sorgenti di innesco** possono essere rappresentate da:

- scintille generate da apparecchiature (valvole a chiusura rapida, elementi usurati, ecc.)
- scariche elettrostatiche
- superfici calde
- fiamme libere

Le sorgenti di innesco devono essere **eliminate o isolate** e **tutte le operazioni con H₂ devono essere condotte nell'ottica di incorrere nel pericolo di innesco della miscela.**

Minima pressione a cui una miscela H₂-aria viene ignita: **0.07 atm** (H₂ 20-30 %).

Se l'energia di innesco è > 45 mJ, la minima concentrazione di H₂ è **4.5 % vol.**

Rispetto a miscele CH₄-aria, i sistemi H₂-aria sono più pericolosi perchè hanno:

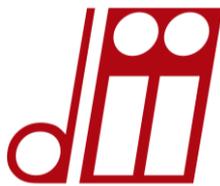
- **limiti di infiammabilità molto più ampi**
- **energia minima di innesco ridotta (un ordine di grandezza inferiore rispetto a 0.1-1 mJ)**

Energia minima di innesco

Material	MIE (mJ)	IGNITION TYPES	IGNITION EXAMPLES	ENERGY	LIKELIHOOD	RISK
Gasoline	0.80	Open Flames	Heaters; Boilers; Flares	Very High	High	Very High
Ethanol	0.65	Hot Work	Welding; Cutting; Power Tools	Very High	High	Very High
Propanol	0.65	[Electrical]	[Unclassified Equipment]	[Very High]	[Very High]	[Very High]
Ethyl acetate	0.46	Frictional Hot Spots	Conveyors; Bearings; Calendar	High	High	High
Methane	0.28	Flash Fires; Explosions	Reactors; Process Equipment	Very High	Low	Moderate
Propane	0.25	Malicious	Arson; Sabotage	Very High	Very Low	Moderate
Ethane	0.24	Hot Surfaces	Ovens; Driers; Piping; Motors	Moderate	Moderate	Moderate
Hexane	0.24	Spontaneous	Unstable, Pyrophoric Materials; Oils	Moderate	Moderate	Moderate
Methanol	0.14	[Electrostatic]	[Ungrounded Equipment]	[Low]	[High]	[Moderate]
Acetylene	0.017	Adiabatic Compression	Compressors; Blowers	Moderate	Moderate	Moderate
Hydrogen	0.011	Self-Ignition	Dusts on Hot Surfaces	Moderate	Low	Low
Carbon disulphide	0.009	Stray Currents	Ground Loops; Corrosion Protection	Moderate	Low	Low
		Hot Particles/Sparks	Grinding; Air Heaters; Impact	Low	Moderate	Low
		Smoking Materials	Matches; Lighters	Moderate	Low	Low
		Vehicles	Exhaust; Ignition System	Low	Moderate	Low
		Electromagnetic Energy	Radio Transmitters; Cell Phones	Moderate	Low	Low
		Lightning	Storms	Very High	Very Low	Low
		Ionizing Radiation	Level Instruments	Very Low	Moderate	Very Low
		Ultrasonic Vibration	Level Sensors; Cleaning Equipment	Very Low	Low	Very Low

La minima energia di innesco richiesta corrisponde ad una miscela H₂-aria nell'intervallo **22-26 % vol.** (miscela stechiometrica).

Tipiche sorgenti di innesco includono: **superfici calde, fiamme libere, scintille durante le operazioni, scariche elettrostatiche.**



Diluizione di miscele H₂-aria



Una misura fondamentale per prevenire scenari di incendio o esplosione è quella di condurre la miscela H₂-aria **fuori dai limiti di infiammabilità**.

Allo scopo, vengono utilizzati diversi diluenti, con efficacia variabile.

Il diluente meno efficace è l'**Argon** (Ar) mentre quello più efficace è sia l'**Anidride carbonica** (CO₂) che l'**Elio** (He).

In generale sono infiammabili le seguenti miscele:

miscela con azoto se H₂ > 5.7 % vol.

miscela con argon se H₂ > 2.9 % vol.

miscela con elio se H₂ > 2.9 % vol.

In ogni caso, dovrà essere utilizzato **Elio** per inertizzare sistemi con H₂ liquido (punto di ebollizione inferiore a quello dell'H₂).

Criticità: un ambiente sottoposto a diluizione può essere estremamente pericoloso per gli operatori («*oxygen displacement*»).

Miscela H₂-O₂

I limiti di infiammabilità dell'H₂ in puro O₂ sono pari a **4 e 94 %** vol., dunque più ampi di quelli associati ad una miscela H₂-aria.

In operazioni **sotto vuoto** ($P < 1$ atm), il limite inferiore di infiammabilità (LFL) tende a diminuire, aumentando la pericolosità della miscela in termini di infiammabilità.

Fino invece a **120 atm**, invece, LFL non cambia.

Però già a 15 atm, **UFL è > 96 %**. Pertanto anche correnti quasi pure di H₂, se innescate, potrebbero dare origine a scenari di incendio o esplosione.

Sperimentalmente è stato osservato che la minima pressione a cui si ha innesco di miscele H₂+O₂ è **0.56 atm**, con concentrazione di H₂ pari ad almeno il 50% vol. e con sorgente di innesco ad elevata energia.

Miscela H_2+CH_4 in aria

La miscela H_2+CH_4 hanno diverso comportamento rispetto ai componenti puri.

Addizionare H_2 al CH_4 (oltre il 20 %) ha l'effetto di:

- ridurre la minima energia di innesco della corrente
- ampliare i limiti di infiammabilità
- determinare fenomeni di degradazione dei materiali
- aumentare la pericolosità per quanto riguarda l'infiammabilità

Tuttavia, il tema è ancora oggetto di studio e pertanto non esistono conclusioni definitive.

In ogni caso, addizionare H_2 a correnti di CH_4 determina un incremento della pericolosità del sistema.

Miscela H₂+CH₄ in aria

	Idrogeno	Metano
Densità relativa gas (Aria = 1)	0.07	0.56-0.59
Coefficiente di diffusione in aria [cm ² /s]	0.60	0.15
Temperatura di auto-accensione [°C]	585	540
Energia minima di innesco [mJ]	< 0.02	> 0.3
Temperatura di fiamma [°C]	2045	1875
Limiti di infiammabilità in aria [% vol.]	4-75	5-15
Limiti di esplosività in aria [% vol.]	15-59	6.3-13.5

Temperatura di auto-accensione

La temperatura di auto-accensione di un combustibile (AIT – *Autoignition Temperature*) è la temperatura minima alla quale la sostanza inizia spontaneamente a bruciare in presenza di ossigeno, senza l'ausilio di sorgenti esterne di innesco (fiamme, scintille, ecc.).

La stessa temperatura rappresenta infatti innesco sufficiente alla combustione.

La temperatura di auto-accensione di H_2 è **superiore rispetto a quella di idrocarburi a catena lunga** (benzina, gasolio, ecc.) **e al metano**.

Pressione atmosferica: **500-585 °C**

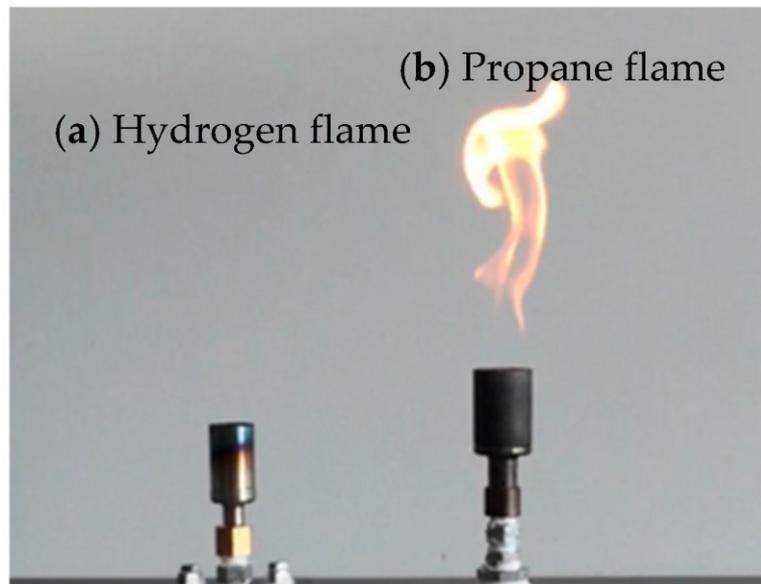
Tra 0.2 e 0.5 atm: **350 °C**

Sostanze	Temperatura di accensione (°C) valori indicativi	Sostanze	Temperatura di accensione (°C) valori indicativi
Acetone	540	carta	230
Benzina	250	legno	220-250
Gasolio	220	gomma sintetica	300
Idrogeno	560	metano	537
alcol metilico	455		

Particolarità dell'H₂: visibilità della fiamma

Una fiamma generata da una miscela H₂+aria è praticamente **non visibile** e irraggia prevalentemente nell'infrarosso (IR) e ultravioletto (UV).

Diventa visibile in presenza di **impurezze** (umidità, particolato) e nel caso di grandi incendi dà luogo ai cosiddetti «*heat ripples*».

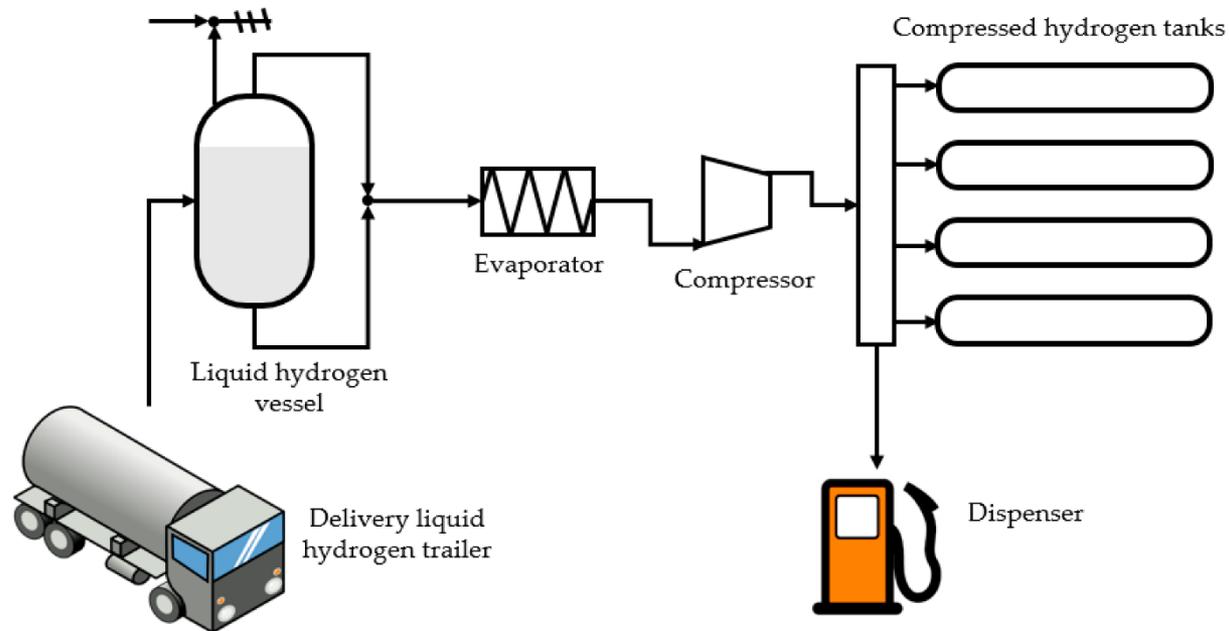


Incendi sostenuti da rilasci pressurizzati (*jet-fire*) tendono ad assumere direzionalità **verticale** e sono **localizzati**.

In ogni caso, date le proprietà di H₂, il fuoco tende ad essere **molto più intenso** ma di **durata inferiore** rispetto ad incendi di idrocarburi.

Sicurezza nello stoccaggio e convogliamento di H₂

Configurazione di stoccaggio



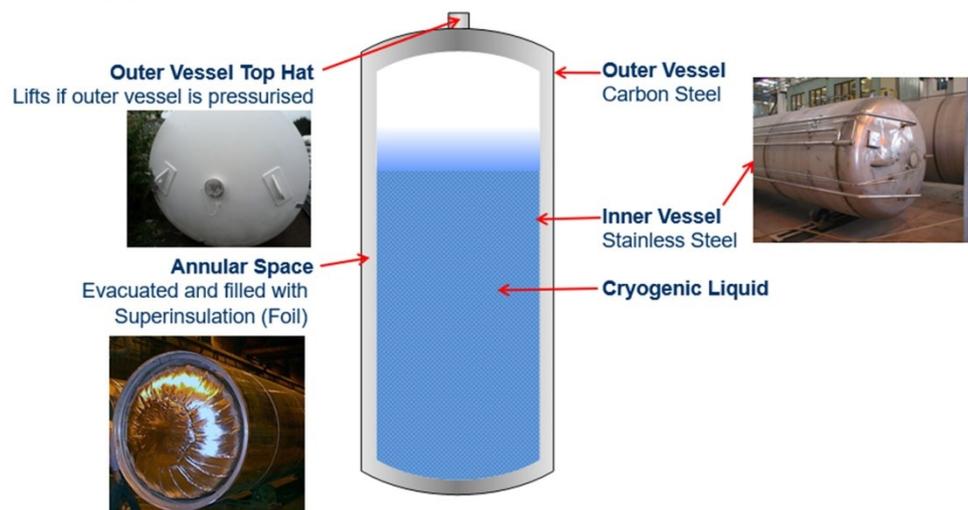
Tipiche problematiche includono:

- mantenimento della corretta temperatura per evitare sovrappressione
- sovrappressione (con potenziale esplosione o *BLEVE*)
- rilascio di H_2
- incompatibilità dei materiali

Serbatoi per lo stoccaggio di H₂ liquido

Typical Cryogenic Tank Construction

- Cryogenic tanks are double walled and vacuum insulated



Problematiche specifiche:

- congelamento di umidità, blocco di apparecchiature o dispositivi (es. valvole di sicurezza)
- evaporazione di idrogeno dentro al serbatoio con aumento della pressione

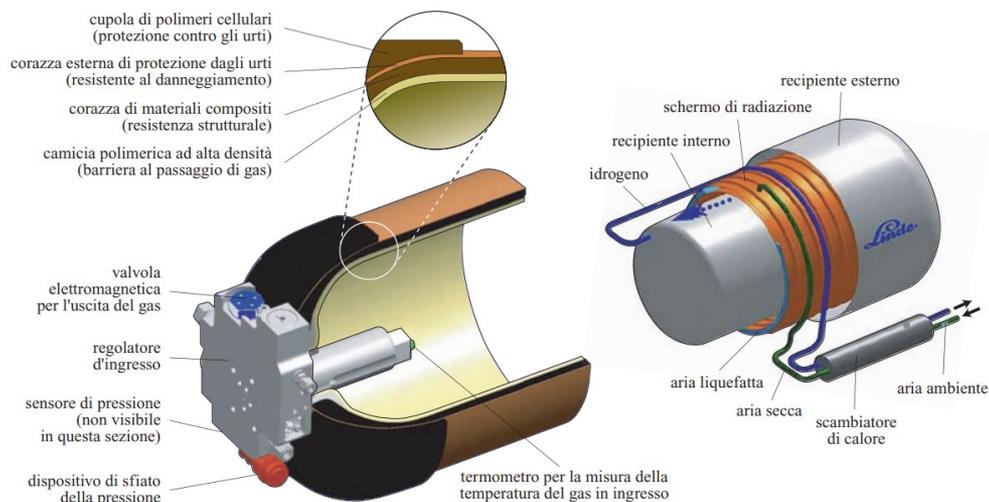
Raffreddamento di H₂ a circa -250 °C (1 atm)

Densità 65-70 kg/m³ (un serbatoio di 75 l può contenere 5 kg di H₂)

Il serbatoio deve essere perfettamente isolato per garantire lo stato liquido

Solo per specifiche applicazioni (ricerca, aerospaziali)

Serbatoi per lo stoccaggio di H₂ compresso



Problematiche specifiche:

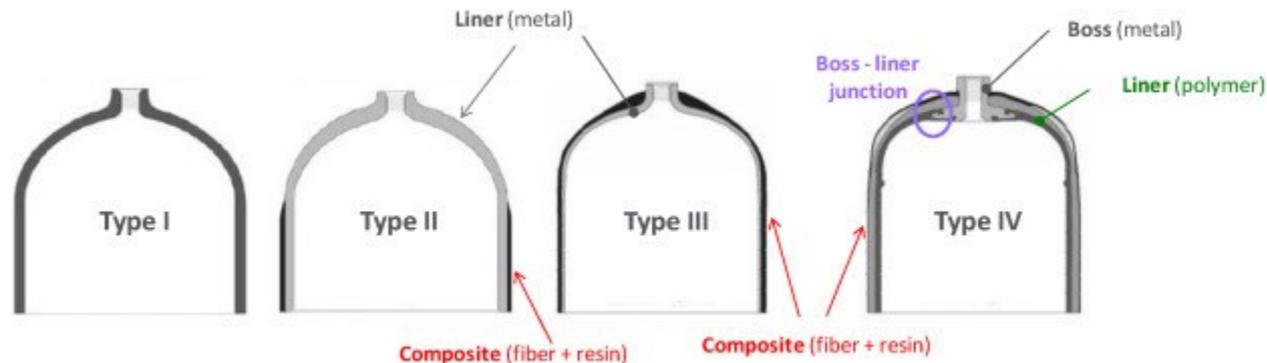
- aumento della pressione interna se esposti a calore dall'esterno (potenziale possibilità di esplosione del serbatoio)
- rilasci pressurizzati (*jet-fire*)
- guasto del sistema di controllo della pressione o dei dispositivi di sfiato

È la modalità più semplice per lo stoccaggio di H₂ (bombole, pacchi bombole, tubazioni)

A 700 bar, la densità è circa 45 kg/m³ (un serbatoio di 125 l può contenere 5 kg di H₂)

Tipiche pressioni di stoccaggio: 350-700 bar (si può arrivare anche a 1000 bar)

Bombole per l'idrogeno (in pressione)



Ci sono 4 tipologie di bombole per l'idrogeno:

- **Tipo I:** contenitori in metallo (acciaio, alluminio)
- **Tipo II:** contenitori di tipo I incapsulati in un avvolgimento polimerico rinforzato con fibra di vetro (GFRP)
- **Tipo III:** come il tipo II ma il rinforzo è dato dalla fibra di carbonio (CFRP)
- **Tipo IV:** nucleo in materiale plastico (polietilene, poliammide) e avvolgimento esterno in CFRP.

Il peso di un serbatoio tipo IV è 4 volte inferiore ad un serbatoio analogo di Tipo I.

Sicurezza nello stoccaggio di H₂

È fondamentale conoscere le proprietà dell'H₂ per garantire operazioni sicure e preservare l'integrità dei sistemi di stoccaggio.

Gli scenari più critici sono:

- collasso del contenimento
- perdita di contenimento (istantanea o continua)

L'idrogeno è infiammabile e trova innesco molto facilmente.

L'energia richiesta per innescare una miscela H₂-ossidante è molto più bassa di quella richiesta per accendere, ad esempio, gli idrocarburi (basta una piccola scintilla o una scarica elettrostatica per dare origine ad un incendio o esplosione).

Dal punto di vista pratico, qualsiasi rilascio di idrogeno subisce innesco.

Sicurezza nello stoccaggio di H₂

Tipiche sorgenti di innesco

Elettriche	Meccaniche
Elettricità statica	Impatto
Scarica elettrica da apparecchiature	Attrito, riscaldamento
	Scintille per scarsa lubrificazione
Termiche	
Fiamme libere	
Getti pressurizzati molto caldi	
Superfici calde	
Sistemi di scarico di veicoli	
Reazioni chimiche	

Normativa ATEX
ATEX 2014/34/UE



Idrogeno: gruppo **IIC** (acetilene)

Requisiti specifici su: massima temperatura di superficie di qualsiasi apparecchiatura in zona ATEX; energia residua; massima durata e potenza di segnali radio; materiali ammessi per l'abbigliamento; vincoli sui dispositivi con batteria interna ammessi.

Sicurezza nello stoccaggio di H₂

Lo stoccaggio di idrogeno deve sempre essere localizzato **all'esterno** e in **aree controllate e ad accesso monitorato**, comunque **distanti da persone e strutture**.

L'area di stoccaggio va predisposta con idonee:

- misure di prevenzione (eliminazione degli inneschi, riduzione del quantitativo, segregazione di materiali incompatibili, sistemi di ventilazione, sensoristica fissa e portatile)
- misure di protezione (muri di protezione, sistemi di allarme, sistemi di controllo ed estinzione del fuoco, procedure operative)

ISO 19884

Sistemi di stoccaggio di H₂ gassoso

ISO 26142

Sistemi di rilevazione delle perdite di H₂

D.M. 23 ottobre 2018

Regola tecnica di prevenzione incendi

Distanza di sicurezza interna (da altre unità quali compressori, box carro bombolaio): **15 m**

Distanza di sicurezza esterna (da confini di aree edificabili, il più vicino fabbricato o altre opere pubbliche o private): **30 m**

Sicurezza nello stoccaggio di H₂

La distanza di sicurezza viene determinata sulla base dello scenario verosimile più severo (esplosione).

In Italia: è necessaria una valutazione del rischio (in deroga).

La massima pressione ammessa è 1000 bar e un volume di 6000 Nm³.

E' vietata l'installazione in aree urbane o in aree di espansione urbana (D.M. 23 ottobre 2018, art. 5).

Quando usato all'interno di strutture è necessario convogliare l'idrogeno attraverso **tubazioni a tenuta**, con **monitoraggio continuo di perdite indesiderate** e installazione di **allarmi**.

**D. Lgs. 9 aprile 2009, Titolo V
Segnaletica di sicurezza**

Segnaletica ben visibile

Schema di flusso dell'impianto con indicazione delle valvole, apparecchiature e unità di stoccaggio

Planimetria dell'impianto con esplicite istruzioni per:

- comportamento da tenere in emergenza
- posizione dei dispositivi di sicurezza
- manovre da eseguire per mettere in sicurezza l'installazione

Analisi del rischio di impianti operanti con H₂

Sicurezza dell'impianto

Aspetto impiantistico (compatibilità dei componenti, affidabilità del sistema)

Analisi del rischio dell'impianto, alla luce delle particolarità dell'idrogeno

L'analista del rischio dispone di archivi con dati sistematici su eventi indesiderati legati all'idrogeno: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/> (Online Data & Information Network for Energy - ODIN) su database aperto H.I.A.D. (Hydrogen Incidents and Accidents Database).

Punti critici da considerare

Il rifornimento a 700 bar è diventato lo standard mondiale.

Omologazione dei recipienti in pressione secondo normativa.

La produzione avverrà sempre più frequentemente in loco (containers).

Lo stoccaggio di idrogeno in ambiente chiuso richiede un'elettronica complessa ed è da considerarsi meno sicuro di uno stoccaggio all'aperto con protezione fisica e controllo dell'accesso al sito.

Il trasporto avviene principalmente con carri bombolai (pressione limitata).

Le aziende costruttrici dovranno contribuire allo sviluppo con il proprio *know-how*.

Strumenti di analisi del rischio di impianti operanti con H₂

Approccio metodologico di base:

D. Lgs. n. 105/2015

EVENTO INDESIDERATO

Valutazione della frequenza

Albero dei guasti, albero degli eventi, statistiche proprietarie

Valutazione della gravità

Modellazione dei rilasci, degli incendi e delle esplosioni di idrogeno

L'identificazione degli eventi indesiderati, invece, si basa su un'attività di identificazione dei pericoli e dei rischi (HAZID):

- **Analisi HAZOP** (analisi di operabilità, BS IEC 61882)
- **Analisi FMEA** (*Failure Mode and Effects Analysis*, BS EN IEC 60812)
- **Analisi bibliografica e dati storici**

Questo passaggio consente di identificare una serie di **eventi apicali e di modi di guasto più critici** che sono poi sviluppati dettagliatamente nelle fasi di valutazione del rischio.

Strumenti di analisi del rischio di impianti operanti con H₂

Nel caso della stazione di Bolzano, ad esempio, è poi un indice di priorità di rischio (RPN) calcolato come segue:

$$RPN = P \times G \times R$$

Gravità dell'evento (0-10)

Probabilità dell'evento (0-10)

Possibilità di rilevamento da parte dei controlli (0-10)

CRITERIO DI ACCETTABILITA'

RPN < 100

Priorità per determinare l'accettabilità del rischio:

OBBLIGHI DI LEGGE

NORME TECNICHE

STATO DELL'ARTE E DELLA TECNICA

PRASSI CONSOLIDATE

POLITICA AZIENDALE

Valutazione del rischio

Misure tecniche di compensazione
del rischio aggiuntivo

Strumenti di analisi del rischio di impianti operanti con H₂

Nel caso della stazione di Bolzano, ad esempio, sono state adottate le seguenti misure tecniche atte a compensare il rischio aggiuntivo:

- Pressione nominale delle tubazioni pari a 1000 bar (superiore a quella di esercizio).
- Tubazioni prive di saldature e giunti fino al misuratore di portata.
- Misuratore di portata e valvole di sicurezza ubicate in nicchia all'esterno della cabina di servizio del distributore (evita la presenza di gas in ambiente chiuso).
- L'idrogeno a 700 bar viene raffreddato a -40 °C per prevenirne il riscaldamento nel corso dell'erogazione.
- Per la tubazione a 700 bar è stato installato, nei pressi della cabina di servizio del distributore, un misuratore di portata con relativa valvola di sicurezza. In tal modo, il tratto di tubazione che potrebbe svuotarsi in caso di guasto è di soli 20 m.
- Valutazione ATEX (atmosfere esplosive).

Scenari tipici e metodologie di controllo

Caratteristica	Potenziali pericoli	Controllo dello scenario
No odore, no sapore, no colore	Impossibilità di rilevare la presenza dell'idrogeno	Sensori di rilevazione
<ul style="list-style-type: none"> • Bassa viscosità • Dimensioni molecolari 	<ul style="list-style-type: none"> • Rilascio di notevole intensità • Infragilimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema di rilevazione delle perdite • Ventilazione • Scelta del materiale
Basso contenuto volumetrico di energia	Stoccaggio ad elevata pressione	<ul style="list-style-type: none"> • Progettazione del contenimento • Sistemi di sfiato di emergenza
Gas asfissiante	Potenziale accumulo indesiderato in spazi confinati	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilazione • Sistemi di rilevazione delle perdite
Ampio intervallo di infiammabilità	<ul style="list-style-type: none"> • Può essere innescato o esplodere • Rilasci (di tutte le entità) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilazione • Sistemi di rilevazione delle perdite
Bassa energia di accensione	Innesco anche con sorgenti di lieve intensità	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilazione • Messa a terra • Misure per rimuovere potenziali sorgenti di innesco
Ridotta temperatura di liquefazione	<ul style="list-style-type: none"> • Ustioni da freddo • Pericolo di inalazione 	<ul style="list-style-type: none"> • Adeguata progettazione • Sistema di rilevazione delle perdite • Dispositivi di protezione individuale
Veloce cambiamento di fase	<ul style="list-style-type: none"> • Sovrappressione 	<ul style="list-style-type: none"> • Adeguata progettazione • Sistemi di sfiato di emergenza • Ventilazione

Accorgimenti per una gestione sicura degli stoccaggi di H₂

Predisporre sistemi di **rilevazione delle perdite** di H₂

Adottare opportune misure di **prevenzione e mitigazione del rischio**

Predisporre **adeguata ventilazione** per diluire l'H₂ (se in ambiente confinato)

Eliminare (per quanto possibile) le **sorgenti di innesco** (direttiva ATEX)

Predisporre sistemi di **rilevazione delle fiamme** di H₂

Selezionare opportuni **materiali costruttivi**

Predisporre **sistemi di sfiato** dell'H₂ e adeguati sistemi di trattamento

Selezionare robusti **sistemi di controllo, allarme e blocco di emergenza con riarmo manuale**

Separare fisicamente **gas incompatibili** con H₂ (agenti ossidanti, O₂)

Non esporre ad **azione diretta dei raggi solari** e a **temperature > 50 °C**

Rilevazione delle perdite di H₂

L'idrogeno è inodore e incolore pertanto non può essere rilevato dall'operatore.

PRATICHE UTILI

Prestare attenzione al caratteristico suono di efflusso di gas ad elevata velocità

Prestare attenzione agli allarmi

Utilizzare sensori portatili di H₂

Controllare con regolarità sezioni soggette a piccole perdite mediante soluzioni saponate

Indossare i DPI

ISO 26142

Apparecchi per la rilevazione delle perdite di H₂

Strumenti per rilevare perdite di H₂

Rilevatori di gas infiammabili in prossimità di aree di accumulo di H₂ (al soffitto, zone a scarsa ventilazione)

Sensori di pressione o portata, periodicamente calibrati (ogni 3-6 mesi)

Doppio tubo e monitoraggio del volume tra i tubi

Allarmi predisposti per rilevare H₂ > 1% vol. (25% LFL)

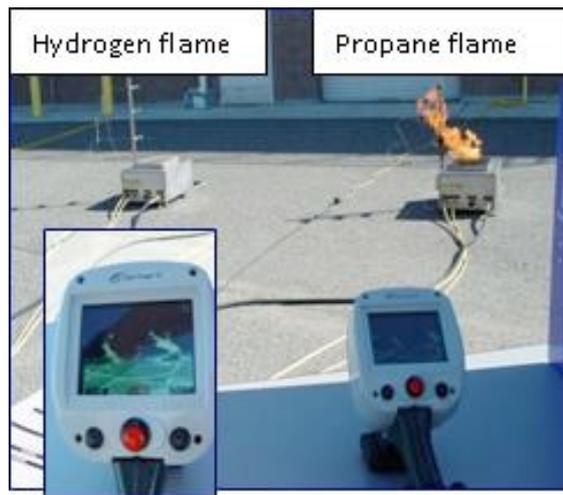
Rilevazione delle fiamme di H₂

La fiamma di H₂ è invisibile alla luce del giorno.

L'installazione di **sistemi fissi** dotati di **sensori ottici/termici** può aiutare a rilevare fiamme di H₂.

In funzione dell'estensione dell'area, potrebbero essere necessari diversi sensori.

Sensori a ultrasuoni possono essere di ausilio per la rilevazione di perdite di idrogeno.



I sensori specifici per l'H₂ più affidabili sono quelli operanti nell'**infrarosso**.

I sensori termici devono rispondere a specifiche variazioni di temperatura (false misure).

Gli operatori dovrebbero usare **sensori portatili**.

Ventilazione

Un'adeguata ventilazione **riduce la probabilità** che una miscela H_2 -aria si formi in regime confinato.

L' H_2 tende ad accumularsi in prossimità del **soffitto, complessi di sottotetto e in zone a scarsa ventilazione**.

In generale, sono sempre da prevedere **aperture di ventilazione in quota**. Infatti rilasci di H_2 , anche limitati, possono dare origine a miscele infiammabili.



Esempio di **ventilazione passiva**

In caso di **ventilazione attiva** (ventilatori, ventilazione forzata), questa dovrà sempre essere funzionante e garantire **$H_2 < 1\%$ vol.**

Operare in ambienti a rischio di formazione miscela H₂-aria

È di primaria importanza evitare perdite di contenimento di H₂ ed eliminare le sorgenti di innesco. Alcune strategie:

- eseguire un'accurata valutazione dei rischi per approntare idonee misure di prevenzione e mitigazione del rischio
- gestire in maniera corretta i permessi di lavoro
- verificare le tenute del sistema prima di iniziare un'attività/test
- indossare indumenti resistenti al fuoco e che non costituiscano innesco
- istituire distanze di sicurezza con lavorazioni a caldo
- prevedere l'installazione di barriere di protezione del fuoco
- addestrare e formare il personale coinvolto in operazioni con H₂
- sviluppare procedure robuste e verificabili
- segnalare e comunicare i pericoli e le sorgenti di rischio

Sicurezza nello stoccaggio criogenico di H₂

Per necessità legate all'ingombro, l'H₂ può essere stoccato a **temperature molto basse** ovvero in condizioni criogeniche.

Principali problematiche di sicurezza:

- Infragilimento dei materiali (serbatoio, tubazioni, valvole, dispositivi sicurezza)
- Rilascio di H₂ liquido (**1 litro liquido = 850 litri gas liberati**)
- Temperature criogeniche con rischio di ustioni e alterazioni DPI
- Dispersione di H₂ con comportamento di gas pesante

È essenziale maneggiare l'H₂ criogenico con **opportuni DPI e in ambiente adeguatamente ventilato**.

Il contatto con metalli raffreddati a temperature molto basse può avere azione anestetizzante, provocando **congelamenti e ustioni** senza accorgersene.

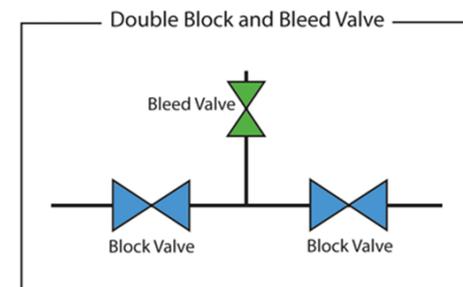
Sicurezza nel convogliamento di H₂

I materiali delle tubazioni che convogliano H₂ sono affetti dalle medesime problematiche dei serbatoi di stoccaggio.

È opportuno:

- contrassegnare chiaramente le tubazioni per H₂
- sistemare valvole di isolamento
- sistemare le tubazioni all'esterno dell'edificio e predisporre un sistema di blocco
- dimensionare le linee in modo tale da resistere a fenomeni di accensione interna, se non sono previsti dispositivi di arresto della fiamma
- Convogliare gli sfiati verso luoghi sicuri e comunque distanti da personale, sorgenti di innesco, aperture di edifici, ecc.

Le tubazioni di H₂ dovrebbero sempre essere collocate ad un'altezza maggiore rispetto alle altre condotte.



Sicurezza nel convogliamento di H₂

Lo scenario più verosimile associato al convogliamento di H₂ è il *jet-fire* che ha origine da una foratura, una disconnessione o presso elementi di connessione difettosi.

La lunghezza della fiamma dipende dalla **pressione dell'H₂** e dalla **dimensione del foro**.

Nella predisposizione del *layout* è cruciale valutare le distanze di sicurezza con riferimento a:

- vie di fuga, affinché non siano influenzate da potenziali incendi
- altre apparecchiature, per evitare effetti domino

L'uso di giunti saldati o brasati è raccomandato mentre i giunti fragili devono essere ridotti al minimo (potenziale fonte di perdita).

Indicazioni generali di sicurezza

- Quando ci si avvicina ad una perdita di H_2 , occorre tenere davanti a sé del materiale facilmente infiammabile (es. giornale arrotolato, scopa di paglia).
- Per estinguere un incendio di H_2 , occorre sempre spegnere la fonte di alimentazione (se è possibile farlo in sicurezza) → **Incendio classe C**
- Non rilasciare o scaricare mai H_2 in edifici o spazi ristretti
- Assicurarsi che i locali in cui viene manipolato H_2 abbiano un'adeguata ventilazione, specialmente a soffitto.
- Non fumare, portare fiammiferi o accendini in un'area in cui l' H_2 sia prodotto, immagazzinato o usato.
- Utilizzare solo apparecchi approvati Ex (direttiva ATEX).
- Non eseguire alcun lavoro a caldo su un impianto a H_2 . Quanto è necessario un lavoro a caldo va ottenuto il relativo permesso.
- Non manomettere o danneggiare i sistemi di messa a terra.
- Prima di aprire impianti e/o attrezzature su un impianto ad H_2 , ottenere un permesso che richiederà che tutti i tubi e i serbatoi siano bonificati con N_2 prima dell'inizio dei lavori ($\% O_2 < 1 \%$). La medesima procedura vale prima di immettere H_2 nel sistema. Se questo è a H_2 liquido, va spurgato con He dopo o prima lo spurgo con N_2 .
- Le apparecchiature contenenti H_2 devono sempre lavorare in sovra-pressione per evitare l'ingresso di aria. In ogni caso, tutte le tenute devono sempre essere verificate.

Misure per ridurre la severità degli scenari di incidente che coinvolgono H₂

- Minimizzare la quantità di idrogeno stoccato o processato.
- Minimizzare il diametro delle tubazioni e la pressione.
- Isolare l'idrogeno da sostanze e componenti critici (ossidanti, apparecchiature pericolose).
- Identificare, separare o eliminare sorgenti di innesco potenziali.
- Separare persone e strutture dai potenziali effetti di rilasci non igniti, incendi, deflagrazioni o detonazioni di idrogeno derivante da perdite di contenimento.
- Sistemare in posizione elevata i sistemi ad idrogeno e relativi sfiati.
- Prevenire la formazione e l'accumulo in spazi confinati di miscele idrogeno-aria.
- Minimizzare l'esposizione limitando il numero di persone esposte e il tempo di esposizione.
- Utilizzare allarmi e sistemi di rilevazione (inclusi rilevatori di idrogeno e di fuoco) e monitorare l'area presso sistemi che operano con idrogeno.
- Utilizzare DPI.
- Gestire adeguatamente i percorsi di esodo e le aree di protezione.
- Osservare misure fondamentali di sicurezza come lavorare in coppia durante situazioni pericolose.

Rilevazione di scenari che coinvolgono H₂

Norma **ISO 26142** per sistemi stazionari di rilevazione di H₂.

Localizzazioni critiche per i sensori:

- Sezioni dove possono avere luogo perdite di H₂.
- Sezioni di connessione tipicamente disconnesse (erogatori).
- Luoghi dove l'idrogeno può accumularsi.
- Nei condotti di aspirazione dell'aria, qualora l'idrogeno dovesse essere introdotto in un ambiente a ridotta ventilazione.
- Nei condotti di aria esausta, qualora l'idrogeno dovesse essere rilasciato.

Fattori da considerare nella scelta dei sensori:

- Accuratezza, affidabilità, calibrazione.
- Sensibilità ai contaminanti, compatibilità con l'ambiente.
- Manutenzione.
- Limiti di rilevazione (minimo e massimo).
- Tempo di risposta.

Soglia di primo allarme:
25 % LFL (1 % vol.)



Sensori portatili

Ventilazione in ambienti confinati

Scenari da considerare:

- Presenza di idrogeno in ambienti confinati → **RIMOZIONE/DILUIZIONE DELL'IDROGENO**
- Migrazione di idrogeno in ambienti confinati → **LA VENTILAZIONE NON DEVE INTRODURRE IDROGENO**

Il rilascio di idrogeno in ambienti non ventilati dà rapidamente origine a miscele accendibili.



Tutti gli ambienti che contengono apparecchiature con idrogeno devono essere dotati di ventilazione attiva o passiva e di sensori di concentrazione di idrogeno.

Ulteriori indicazioni:

- La ventilazione non va interrotta nel caso di una procedura di arresto dell'impianto.
- Tutte le apparecchiature elettriche correlate al sistema di ventilazione non devono costituire innesco.
- Il sistema di ventilazione deve essere progettato in modo tale da non generare scintille o attrito in caso di guasto.
- Un adeguato sistema di controllo dovrebbe essere dotato di interblocco di sicurezza basato sulla rilevazione di idrogeno e mantenere in funzione la ventilazione (nel caso di presenza di idrogeno da diluire) finché tutto l'idrogeno non viene rimosso dall'ambiente confinato.

Sistemi di allarme

Situazioni che potrebbero essere
agganciate ad un segnale di allarme



Alta o bassa pressione

Presenza di idrogeno in corrispondenza dell'aspirazione di sistemi di ventilazione.

Spegnimento della fiamma pilota.

Perdita delle condizioni di vuoto nell'isolamento dei serbatoi.

Guasto al sistema di compressione.

Perdita di idrogeno.

Incendio.



Informazioni, azioni, comportamenti



Azione automatica (procedura di *shut-down*)



Attivazione di sistemi di protezione

Sistemi di sicurezza

I sistemi di sicurezza da installare in un impianto che tratta idrogeno sono:

- **Sistemi di allarme/segnalazione:** rileva condizioni anomale, malfunzionamenti o guasti incipienti. Vanno sempre previste strategie ridondanti (soprattutto sulla sensoristica).
- **Sistemi di controllo del flusso:** valvole di sicurezza, regolatori di flusso utili per rispondere e proteggere l'incolumità degli operatori e l'integrità delle apparecchiature.
- **Sistemi di sicurezza:** installati per controllare in modo automatico le apparecchiature. Se previsti sistemi manuali devono sempre essere previsti dei limitatori per evitare situazioni indesiderate.

Tutta la strumentazione, software e computer utilizzati devono:

1. Essere indipendenti dalla componentistica utilizzata nell'esercizio dell'impianto.
2. Prevedere sufficiente ridondanza per prevenire la disabilitazione del sistema di sicurezza.

Nella gestione dell'idrogeno sono da prevedere anche sistemi di inertizzazione da usare:

- Nel carico e scarico di idrogeno da apparecchiature.
- Per spurgare aria dai circuiti.

Se sono previsti sistemi di inertizzazione con anidride carbonica, va accertato che tutta l'anidride carbonica sia stata spurgata (è un gas pesante che tende ad accumularsi).

Componenti elettrici

Particolare attenzione va data agli apparecchi o connessioni alimentati elettricamente e collocati in prossimità di aree dove potrebbero formarsi miscele esplosive:

- Durante le normali operazioni (es. linee di carico).
- Presso componenti soggetti a frequente manutenzione, riparazione o perdite.
- Come conseguenza di rilasci di idrogeno che potrebbero determinare guasti di tipo elettrico.

La componentistica elettrica deve:

1. Essere approvata per l'utilizzo in aree con potenziale presenza di idrogeno.
2. Essere intrinsecamente sicura per l'utilizzo in atmosfere con idrogeno.
3. Essere sistemata in apposite aree protette, eventualmente inertizzate.

È necessaria anche una protezione dai fulmini che potrebbero accendere facilmente miscele infiammabili di idrogeno.

Inoltre, tutte le apparecchiature devono prevedere corretti collegamenti elettrici e messa a terra (specialmente nelle connessioni in materiale polimerico).



Gestione/estinzione del fuoco

Un sistema di protezione dal fuoco va sempre previsto ed installato e può includere:

- Sistemi automatici o manuali di arresto delle operazioni.
- Sistema *sprinkler*.
- Sistema *deluge* a diluvio.
- Sistemi di estinzione ad estinguento secco (piccoli incendi possono essere spenti con CO₂, azoto o vapore di acqua).

Non si dovrebbe tentare di estinguere un incendio di idrogeno finché non viene interrotta la sorgente.

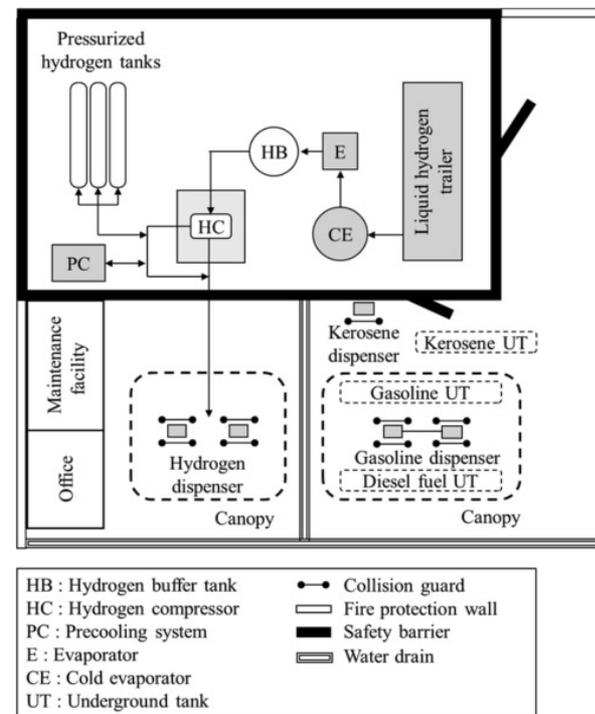


Barriere di protezione da esplosioni con H₂

Le barriere fisiche possono fornire protezione contro la **proiezione di frammenti** e il **danneggiamento per impatto**.

Le medesime possono essere utilizzare per prevenire collisioni da parte di **veicoli in manovra**.

La **disposizione della barriere** e le loro **caratteristiche** vanno progettata con attenzione per non dare origine a situazioni di confinamento che potrebbero aggravare lo scenario di esplosione.

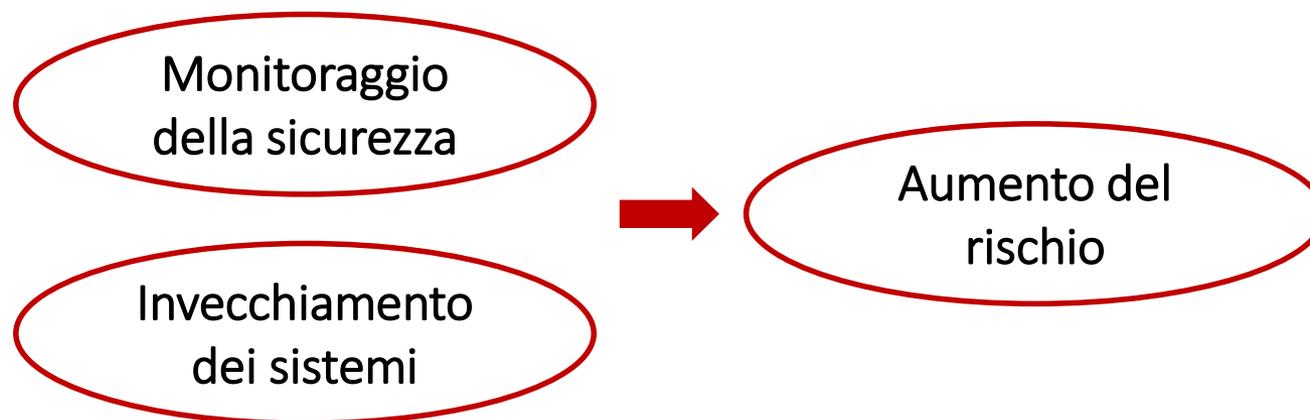


Raccomandazioni di carattere generale

- È raccomandata una base tecnica nello sviluppo di tutti gli aspetti legati alla sicurezza delle infrastrutture operanti con idrogeno (**approccio performance-based**).
- **Variabili da considerare nella progettazione e gestione della sicurezza:**
 - Portata di rilascio (funzione della pressione e della componentistica)
 - Probabilità di rilascio (funzione della degradazione delle apparecchiature, incompatibilità, bontà progettuale, installazione e manutenzione)
 - Ventilazione richiesta e disponibile.
 - Misure di protezione dalle esplosioni.
 - Danno (su persone o cose) determinato da un rilascio ed eventi seguenti.
 - Distanze di separazione.

Raccomandazioni di carattere generale

- L'azione tecnica descrive le misure da adottare per ridurre il livello di rischio e guida l'adozione di metodologie di controllo del rischio.



Basi dell'azione tecnica

Pubblicazioni tecniche e scientifiche, codici e standard applicabili.

Considerazioni sulla presenza di zone confinate.

Variabili di progettazione e di sicurezza.

Variabili legate alla zona confinata
(volume, quantità di idrogeno, probabilità di formazione).

Linee guida interne dove esiste una lacuna normativa.



**Take
home message*

Le attività che prevedono la produzione, stoccaggio e trasporto di idrogeno potrebbero introdurre **nuovi pericoli e scenari di rischio**.

- Esplosione e *jet-fire* oltre a scenari legati alle proprietà fisiche dell' H_2 .
- Applicazioni criogeniche.

Avere **consapevolezza** dei pericoli e dei rischi è elemento fondamentale per impostare una corretta progettazione e valutazione della sicurezza, una politica di gestione ed implementare misure di prevenzione e mitigazione.

La conoscenza delle proprietà dell'idrogeno e un attento approfondimento delle questioni legate alla sicurezza possono ridurre sensibilmente l'accadimento di scenari di rischio.

- Contesto in rapida evoluzione anche per quanto riguarda la conoscenza e la ricerca.

L'introduzione dell'idrogeno influenzerà notevolmente la **sicurezza dei lavoratori e della popolazione**.



Contatti

Paolo Mocellin

paolo.mocellin@unipd.it

paolo.mocellin.ing@gmail.com



<https://www.linkedin.com/in/paolo-mocellin-05b966b3/>