

ANALISI DELLE INCERTEZZE NELLA MODELLAZIONE DI UN IMPIANTO DI DISTRIBUZIONE DI IDROGENO PER AUTOTRAZIONE

Zio, E. 1, Di Maio, F. 1, Berteletti, N. 1, Carpignano, A. 2 e Ganci, F. 2

1 Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano, Via Ponzio 34/3, Milano, 20133, Italia

2 Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, Torino, 10129, Italia

SOMMARIO

La crescente domanda di energia è attualmente soddisfatta ricorrendo nella quasi totalità dei casi all'uso dei combustibili fossili, il cui impiego costituisce la principale causa dell'aumento delle emissioni di gas serra. Per non compromettere la stabilità del sistema energetico e dell'assetto climatico globale, la transizione verso un futuro sostenibile basato anche su fonti energetiche rinnovabili appare quindi inevitabile. In quest'ottica l'impiego dell'idrogeno quale vettore energetico riveste un ruolo di primo piano. Tuttavia l'introduzione dell'idrogeno come combustibile richiede sforzi di ricerca e sviluppo per un impiego su larga scala affidabile ed economicamente competitivo. Inoltre, in tutti i campi in cui ne è previsto l'impiego, esistono ancora questioni legate agli aspetti di sicurezza dei sistemi di produzione, trasporto ed accumulo del gas a causa della sua elevata infiammabilità a contatto con l'aria.

In questo lavoro viene analizzato uno scenario incidentale di rilascio di idrogeno in un impianto di distribuzione per autotrazione, progettato per realizzare il rifornimento di autobus alimentati ad idrogeno gassoso ad alta pressione. L'obiettivo dell'analisi è quello di valutare le conseguenze dello scenario incidentale con le associate incertezze, identificandone le principali fonti mediante un'analisi di sensitività. Il lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto "Metodi di valutazione dell'incertezza nell'analisi di rischio di sistemi tecnologici complessi: applicazione ad una stazione di rifornimento idrogeno" finanziato dal MIUR (PRIN 2005). Nell'articolo vengono presentati i risultati ottenuti e messi in evidenza i parametri più rilevanti per la caratterizzazione del fenomeno nonché le difficoltà nella loro determinazione. L'approccio seguito consente di evidenziare situazioni potenzialmente pericolose, altrimenti non identificabili qualora si trascuri l'effetto della propagazione dell'incertezza dei parametri di input sugli esiti della modellazione e tali da fornire importanti feedback progettuali.

NOMENCLATURA

CV	coefficiente di variazione
$\sigma_{in,i}$	deviazione standard input i -esimo
$\sigma_{out,j}$	deviazione standard output j -esimo
$\mu_{in,i}$	media input i -esimo
$\mu_{out,j}$	media output j -esimo
I_{ji}	indice di importanza
v	velocità efflusso
P	pressione
ρ	densità
γ	coefficiente isoentropica
P_i	pressione interna
ρ_i	densità interna
C_d	coefficiente di efflusso
\dot{m}	portata in massa
A	sezione di efflusso
t_r	tempo ridotto
t	tempo
v_{vento}	velocità del vento
\bar{l}_l	lunghezza di fiamma adimensionale
x_l	distanza sottovento apice fiamma
\bar{x}_l	distanza sottovento adimensionale apice fiamma
d_d	diametro sezione efflusso

r	parametro adimensionale
z	altezza fiamma
z_t	altezza ricettore
x_d	distanza origine-apice fiamma
H	altezza punto di rilascio
Q	energia irraggiata
ε	emissività
T_f	temperatura superficiale di fiamma
S	distanza sorgente-ricettore
A_f	area fiamma
l	lunghezza fiamma

1. INTRODUZIONE

Il mondo moderno avverte la necessità di soddisfare la crescente domanda di energia ricorrendo sempre più all'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili o comunque a basse emissioni di gas serra, in grado dunque di garantire la sostenibilità del settore energetico. In questa situazione il vettore energetico idrogeno e le attività ad esso legate rivestono un ruolo di primo piano. A tal proposito l' H_2 presenta infatti alcune interessanti caratteristiche, tra cui: la possibilità di essere ricavato da fonti rinnovabili disponibili su larga scala; il ridotto impatto ambientale; la possibilità di essere introdotto in una rete di distribuzione agli utenti finali.

Processi affidabili e sicuri durante la produzione, lo stoccaggio, la distribuzione e l'uso dell'idrogeno sono requisiti fondamentali per l'affermazione delle tecnologie che sfruttano tale vettore energetico. Infatti il verificarsi di gravi eventi incidentali in qualunque punto della filiera idrogeno aumenta la percezione del rischio da parte dell'opinione pubblica e contribuisce a rallentare la diffusione dei sistemi ad H_2 .

Al fine di identificare chiaramente gli scenari incidentali e le relative conseguenze è necessario quantificare in modo oggettivo il grado di rischio della situazione considerata identificando mediante un'analisi di sensitività le conseguenze dello scenario incidentale e le incertezze associate.

L'analisi di sensitività può fornire informazioni di rilevante interesse circa il comportamento del modello di un sistema, relativamente a quanto l'output dipenda dagli input del sistema stesso, ovvero quali grandezze in ingresso influenzano maggiormente i risultati delle simulazioni. Diversi approcci sono stati sviluppati per eseguire studi di sensitività, ad esempio analisi differenziali del primo ordine [1], campionamento Monte Carlo [2], response surface methodology [3], Fourier Amplitude Sensitivity Test [4] e molto altro, ma si tratta spesso di soluzioni onerose in termini di tempi di calcolo. Per agevolare l'analisi si rende quindi necessario rivolgere l'attenzione verso modelli più veloci e semplificati oppure verso interpolazioni empiriche della risposta del modello [5].

In questo lavoro, riferito ad un'analisi di rischio per un impianto di distribuzione di H_2 per autotrazione si è provveduto a determinare per lo scenario incidentale "rilascio di H_2 da serbatoio ed innesco jet fire" il parametro che maggiormente influenza i risultati dell'analisi di sensitività e gli intervalli di tolleranza delle grandezze che descrivono il jet fire, attraverso il campionamento Monte Carlo dei valori di input del modello dalle rispettive distribuzioni probabilistiche e successiva valutazione degli esiti delle simulazioni. È stato dunque calcolato un indice di importanza che ha consentito l'individuazione dei parametri la cui incertezza maggiormente si propaga nell'output.

L'approccio proposto consente di quantificare gli effetti sugli output del modello delle variabilità sia di singoli parametri che di gruppi di parametri, includendo così anche le loro interazioni.

L'esposizione è così organizzata: al paragrafo 2 è introdotto l'indice di importanza impiegato nel corso dell'analisi di sensitività; il paragrafo 3 descrive brevemente i modelli utilizzati: TNO per il rilascio di gas [6] ed il modello di Brzustowski per il jet fire [7]. Il paragrafo 4 fornisce la descrizione dell'impianto e dello scenario incidentale considerati, mentre al paragrafo 5 sono riportati i risultati dell'analisi.

2. L'INDICE DI IMPORTANZA

In un sistema con più variabili in ingresso ed in uscita, ciascuna caratterizzata dalla propria incertezza, si deve stabilire l'effetto di tali variazioni sugli output del sistema stesso.

L'indice di importanza I_{ji} proposto per questo lavoro permette di ricavare un'informazione numerica circa l'entità dell'influenza dell'incertezza dell'input i -esimo sull'incertezza dell'output j -esimo considerato, direttamente confrontabile con quella ricavata da altre coppie input-output. L'equazione (1) definisce tale indice come rapporto tra il coefficiente di variazione della variabile di output j ed il coefficiente di variazione della variabile di input i :

$$I_{ji} = \frac{CV_{out,j}}{CV_{in,i}} = \frac{\frac{\sigma_{out,j}}{\mu_{out,j}}}{\frac{\sigma_{in,i}}{\mu_{in,i}}} \quad (1)$$

Il campione statistico necessario al calcolo della deviazione standard σ e della media μ , utilizzate nell'indice di importanza, può essere ricavato da banche dati o da simulazioni al calcolatore di un modello del sistema studiato.

Nel caso studio in esame tale campione sufficientemente ampio è stato ottenuto attraverso il campionamento dei valori dei parametri di input ripetuto per le numerose simulazioni condotte con i modelli che implementano rispettivamente i fenomeni di efflusso di gas da un serbatoio ed il jet fire originato a seguito di innesco. L'obiettivo dell'analisi condotta impone che l'esecuzione dei modelli sia sequenziale, infatti il modello di efflusso restituisce in output delle variabili utilizzate come input dal modello di jet fire. In Figura 1 è rappresentato lo schema concettuale dell'algorithmo implementato.

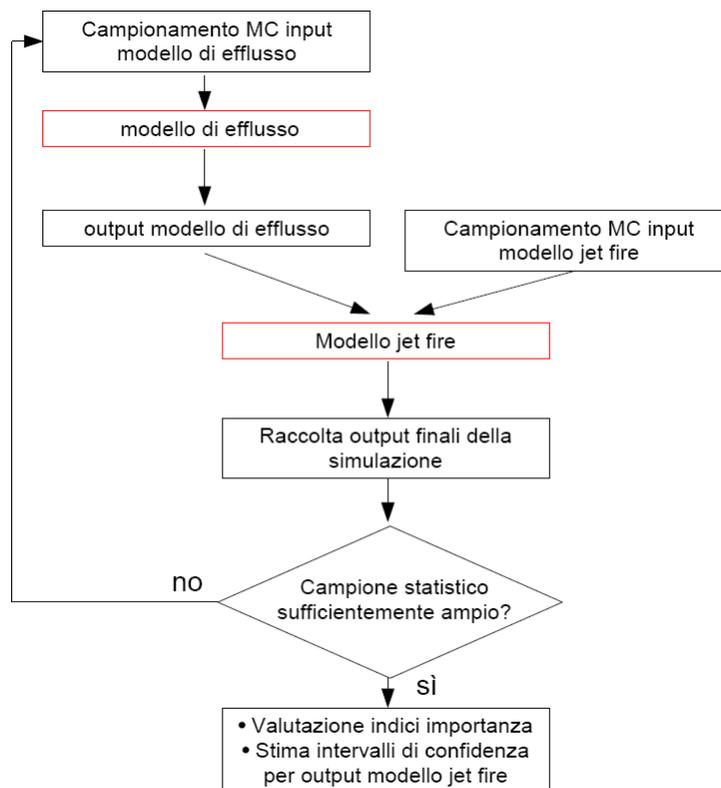


Figura 1 Schema concettuale dell'algorithmo utilizzato

3. CENNI DI TEORIA PER LA MODELLAZIONE DELLO SCENARIO INCIDENTALE

3.1. Modello TNO per il rilascio di gas da serbatoio

Il modello adottato consente di descrivere l'efflusso di gas da un serbatoio a seguito di una piccola rottura della parete calcolando in funzione del tempo l'evoluzione delle grandezze termodinamiche del fluido contenuto nonché della portata scaricata e della durata del rilascio [6]. Il computo viene effettuato sulla base

dei parametri caratteristici del gas contenuto nel serbatoio, della sua pressione e temperatura al momento della rottura e del volume del contenitore, considerato costante.

Il fenomeno di efflusso descritto dal modello TNO viene supposto adiabatico ed isoentropico, ipotesi giustificabile data la rapidità della trasformazione e l'entità trascurabile delle interazioni fluido-pareti del serbatoio [6]. Il gas è approssimato ad un gas ideale, pertanto la relazione tra le variabili di stato è fornita dall'equazione di stato dei gas perfetti.

Il modello permette di scrivere la seguente equazione differenziale, che descrive la portata effluente:

$$\dot{m} = C_d \cdot A \cdot \Psi \cdot \left[\gamma \cdot P_0 \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{m}{m_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{2}} = -\frac{dm}{dt} \quad (2)$$

dove C_d è detto coefficiente di efflusso, A è la sezione di efflusso, Ψ è un parametro che assume valore unitario in condizioni critiche e valore compreso tra 0 ed 1 in condizioni sottocritiche di efflusso, γ è detto coefficiente isoentropico, P_0, ρ_0 sono le condizioni di pressione e densità all'istante iniziale del fenomeno di efflusso; infine m_0 è la massa iniziale contenuta nel serbatoio.

Per semplicità espositiva si consideri il solo caso di efflusso critico, in modo da avere $\Psi=1$. Da (2) si ricava che:

$$m = m_0 \cdot \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma-1) \cdot t_r \right]^{-\frac{2}{\gamma-1}} \quad (3)$$

dove la quantità adimensionale $\left[1 + \frac{1}{2}(\gamma-1) \cdot t_r \right]^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}$ è definita portata in massa ridotta.

La portata effluente risulta quindi pari a:

$$\dot{m} = C_d \cdot A \cdot (P_0 \cdot \rho_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma-1) \cdot t_r \right]^{-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \quad (4)$$

Nelle equazioni (3) e (4) compare la grandezza adimensionale tempo ridotto:

$$t_r = C_d \cdot A \cdot (P_0 \rho_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{m_0} \cdot t \quad (5)$$

L'andamento della pressione nel serbatoio è infine esprimibile, sempre utilizzando le ipotesi di efflusso adiabatico isoentropico e di volume costante del serbatoio, mediante la relazione:

$$P = P_0 \cdot \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma-1) \cdot t_r \right]^{-\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \quad (6)$$

ricavata supponendo una trasformazione isoentropica a volume costante.

3.2. Modello di Brzustowski a sorgente puntiforme multipla per il calcolo del jet fire

Nel modello di Brzustowski, utilizzato per la caratterizzazione di un jet fire di vapore o gas infiammabile, viene supposto che l'energia emessa dall'incendio sia distribuita su più punti lungo una linea e non concentrata in un solo punto. Quindi la radiazione che colpisce il ricettore si ottiene integrando il flusso emesso da un segmento infinitesimo lungo la lunghezza di fiamma [7]. In Figura 2 sono rappresentate le principali grandezze coinvolte nella modellazione.

Il modello lineare che schematizza il jet fire, valido in atmosfera con vento, utilizza delle correlazioni semiempiriche valide considerando un parametro adimensionale, dato dal rapporto tra velocità di scarico del gas v e velocità del vento v_{vento} , definito come $w=v/v_{vento}$ e compreso tra 0 e 76, cioè $1/w > 0.013$.

Occorre quindi conoscere, per la valutazione di w , sia la velocità del vento, supposta ortogonale al jet, che la velocità di scarico del jet stesso, fornita in output dal modello di rilascio di gas descritto in precedenza al paragrafo 3.1.

Il modello richiede anche la conoscenza della temperatura superficiale di fiamma, il cui valore compare nella formula integrale per il calcolo della radiazione totale incidente sui ricettori.

Principali output di tale modello sono le coordinate dell'apice di fiamma (x_l e z) e l'irraggiamento orizzontale e verticale che il bersaglio subisce.

La distanza x_l sottovento dell'apice di fiamma è ricavabile dalla relazione:

$$x_l = \bar{x}_l d_g r \quad (7)$$

dove:

$$\bar{x}_l = \left(\frac{\bar{l}_l}{3.2} \right)^{1.852} \quad \text{ed} \quad r = \frac{v}{v_{\text{vento}}} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{\text{aria}}}} \quad (8)$$

d_g è il diametro della sezione di efflusso, \bar{l}_l lunghezza di fiamma adimensionale, v velocità di efflusso, v_{vento} velocità del vento, ρ densità efflusso e ρ_{aria} densità dell'aria.

L'altezza di fiamma z è descritta dalla relazione:

$$z = 3.1x_d^{0.36} (d_g r)^{0.64} + H \quad (9)$$

dove x_d rappresenta la distanza tra l'origine e l'apice della fiamma, H l'altezza del punto di rilascio.

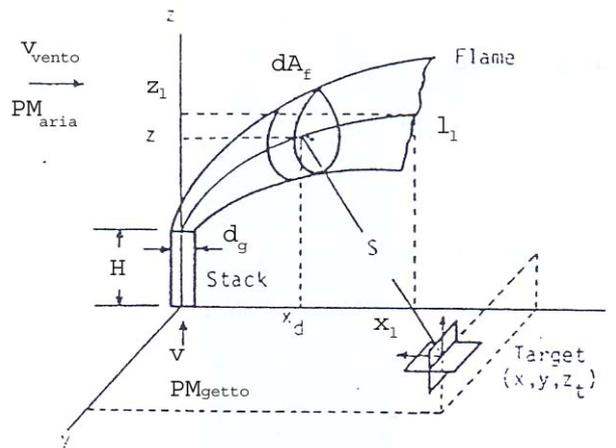


Figura 2 Schema del jet fire e relative grandezze geometriche [8]

L'irraggiamento prodotto dalla fiamma è espresso mediante:

$$Q = 1.728 \frac{\varepsilon \sigma T_f^4}{2} (d_g r)^{0.6} \int_0^{x_l} \frac{x_d^{0.4} \cos \beta}{(z - z_t)^2 + y^2 + (x - 0.5x_l)^2} dx_d \quad (10)$$

dove ε emissività delle fiamme, T_f temperatura superficiale di fiamma, z è ricavato mediante l'equazione (9),

$\cos \beta = \frac{z - z_t}{S}$ nel caso di ricettore orizzontale, $\cos \beta = \frac{x - x_d}{S}$ nel caso di ricettore verticale.

La relazione (10) mette in evidenza come l'irraggiamento termico aumenti al crescere della temperatura della fiamma T_f e del diametro dell'efflusso d_g . Logicamente Q diminuisce all'aumentare della distanza del ricettore dalla sorgente; è al contrario difficile stabilire una relazione fra Q e r .

Da notare che, poiché il calcolo dell'emissività delle fiamme risulta difficoltoso, il coefficiente ε viene posto conservativamente pari a 1. Questo permette, dunque, di ottenere dei risultati cautelativi dal punto di vista della valutazione delle conseguenze, ad esempio in termini di raggiungimento della soglia di danno di elevata letalità dovuta all'irraggiamento. Inoltre le relazioni sin qui riportate ammettono le condizioni $x > x_l$ e $z_t < h$, implicando quindi che il ricettore non possa trovarsi nello spazio delimitato dall'arco di fiamma e dall'asse $z=h$. In tal caso, infatti, si ipotizza una letalità certa per i ricettori interessati; l'attenzione in questo studio, pertanto, viene focalizzata solamente sulle conseguenze in seguito al fenomeno di irraggiamento esterno alla fiamma.

4. L'IMPIANTO DI DISTRIBUZIONE DI IDROGENO E LO SCENARIO INCIDENTALE

L'impianto descritto nel seguito ed oggetto di studio è una stazione di distribuzione di H₂ per autotrazione, in cui la produzione del vettore energetico idrogeno avviene mediante l'uso di elettrolizzatori [9].

L'impianto è progettato per realizzare il rifornimento di autobus alimentati ad idrogeno alla pressione di 300 bar. Il rifornimento dei mezzi avviene per mezzo di un sistema di distribuzione direttamente collegato al sistema di stoccaggio del gas. La stazione è in grado di erogare fino ad una portata nominale di 50 Nm³/h di idrogeno [9], utilizzando acqua come fluido di processo la quale, dopo demineralizzazione, viene dissociata elettroliticamente in idrogeno ed ossigeno. L'idrogeno prodotto, dopo un preventivo processo di purificazione, viene dunque compresso fino a 350 bar e stoccato in fase gassosa in 6 serbatoi da 1000 litri ciascuno, che a loro volta alimentano il sistema di distribuzione per gli autobus. Per motivi di sicurezza l'area di stoccaggio è separata dal resto dell'impianto mediante un muro di calcestruzzo e da uno schermo contro l'irraggiamento solare.

Lo scenario incidentale per il quale si ritiene opportuno condurre un'accurata analisi di sensitività è il rilascio di H₂ dai serbatoi pressurizzati nei quali è stoccato il gas pronto per essere distribuito.

La rottura di una tubazione o di un serbatoio di alimentazione dell'idrogeno comporta l'immissione di un quantitativo variabile di gas in atmosfera. La quantità rilasciata varia a seconda dei tempi di intervento dei sistemi di sicurezza. I fenomeni che possono svilupparsi in seguito al rilascio sono un jet fire, in caso di innesco immediato, od un'esplosione non confinata, in caso di innesco ritardato della nube.

In particolare verranno valutate le conseguenze del rilascio di gas all'interno del muro di contenimento che circonda il parco serbatoi nell'ipotesi di efflusso da piccole rotture penetranti, imputabili a corrosione o perdite da flangie, o da valvole di sicurezza difettose o erroneamente aperte [9]. Nel modello proposto l'efflusso è considerato adiabatico ed isoentropico. È inoltre supposto l'innesco immediato del materiale scaricato, con formazione del jet fire.

4.1 Sorgenti di incertezza nella modellazione

I parametri di modellazione impiegati nel corso dell'analisi sono riassunti nelle Tabelle 1 e 2.

Tabella 1 Variabili considerate per la modellazione dell'efflusso di gas

Variabile	Estremi parametro		Valore nominale	Deviazione standard	Distribuzione di probabilità
	Min	Max			
Condizioni Iniziali					
<i>Coefficiente dell'isoentropica</i>	1.31	1.49	1.4	0.0225	Normale
<i>Area dell'apertura [m²]</i>	0.000036	0.000076	0.000056	0.000005	Normale
<i>Pressione interna iniziale [MPa]</i>	34.5	35.5	35	0.125	Normale
<i>Temperatura iniziale [K]</i>	243	333	288	11.25	Normale
<i>Volume del contenitore [m³]</i>	0.94	1.06	1	0.015	Normale
<i>Pressione atmosferica [m³]</i>	0.1003	0.1043	0.1013	0.00025	Normale
Parametri di modellazione					
<i>Gas da considerare</i>	1	11	11	-	Discreta Uniforme
<i>Adiabatica/Isoterma</i>	1 (ad)	2 (iso)	1	-	Discreta Uniforme
<i>Gas perfetti/Vapori saturi</i>	1 (gas)	2 (vap)	1	-	Discreta Uniforme
<i>Discretizzazione temporale[s]</i>	0.5	5	1	-	Discreta Uniforme
<i>Massa molecolare del gas [kg/kMol]</i>	2.00594	2.02594	2.01594	0.0025	Normale
<i>Costante K₁ [Pa]</i>	15	30	0	1.2	Normale
<i>Costante K₂ [10³K]</i>	1	10	0	1.34	Normale
<i>Costante K₃ [(m³/kg)^{k₃}]</i>	0	0.03	0	0.05	Normale
<i>Costante K₄</i>	0	1	0	0.03	Normale

Ad una prima analisi della Tabella 1 sembra evidente che le principali fonti di incertezza nel modello di efflusso di gas da serbatoio sono:

- Pressione iniziale del gas P_0 . L'incertezza di tale parametro dipende dalle ipotesi effettuate dall'analista; tuttavia si assume in genere il massimo valore possibile di pressione, in modo da considerare le situazioni incidentali maggiormente gravose.
- Temperatura iniziale del gas T_0 . Il gas è stoccato a temperatura ambiente: poiché questa è soggetta a variazioni stagionali nel corso dell'anno, l'incertezza associata dipende dalle ipotesi effettuate dall'analista.
- Coefficiente di efflusso C_d . Il valore del coefficiente di efflusso tiene conto delle perdite di carico che si registrano in corrispondenza della sezione di scarico a causa della contrazione della vena fluida. La scelta del valore (in genere 0.62) è legata alla geometria dell'area di efflusso e dunque alle ipotesi dell'analista a tal proposito.
- Diametro della rottura d_g . Anche questo parametro dipende fortemente dalle ipotesi dell'analista circa la geometria della sezione di scarico e condiziona il valore di portata massima effluente.

Tabella 2 Variabili considerate per la modellazione del jet fire

Variabile	Estremi parametro		Valore nominale	Deviazione standard	Distribuzione di probabilità
	Min	Max			
Condizioni Iniziali					
<i>Velocità di scarico del combustibile [m/s]</i>	-	-	Output del Modello di efflusso	-	Normale
<i>Densità del gas nel jet [kg/m³]</i>	-	-	Output del Modello di efflusso	-	Normale
<i>Diametro dell'efflusso [m]</i>	-	-	Input del Modello di efflusso	-	Normale
<i>Coordinate della posizione del ricettore x [m]</i>	5.2	5.6	5.4	0.05	Normale
<i>Coordinate della posizione del ricettore y [m]</i>	-0.2	0.2	0	0.05	Normale
<i>Coordinate della posizione del ricettore z [m]</i>	0.3	0.7	0.5	0.05	Normale
<i>Altezza da terra del punto di uscita del jet [m]</i>	0.3	0.7	0.5	0.05	Normale
Parametri di modellazione					
<i>Concentrazione del combustibile al limite inferiore di infiammabilità LFL (%)</i>	3.984	4.016	4	0.004	Normale
<i>Peso molecolare dell'aria [kg/kMol]</i>	28.51	29.31	28.91	0.1	Normale
<i>Peso molecolare del combustibile [kg/kMol]</i>	2.00594	2.02594	2.01594	0.0025	Normale
<i>Velocità del vento [m/s]</i>	-	-	$\frac{v_{vento}}{v_{getto}} > 0.013$	1.0	Normale
<i>Densità dell'aria [kg/m³]</i>	1.17208	1.21992	1.196	0.00598	Normale
<i>Temperatura superficiale della fiamma [K]</i>	1831.22	2804.78	2318	162.26	Normale
<i>Costante di Stefan- Boltzmann [W/m²K⁴]</i>	-	-	5.67E-08		-

Dalla Tabella 2 risulta evidente che le principali incertezze introdotte nel modello del jet fire sono relative ai parametri:

- Portata di gas \dot{m} . Poiché tale valore è in realtà il principale output del modello di rilascio applicato al caso in esame, ne segue che la sua incertezza è funzione dei parametri impiegati nella modellazione eseguita a monte.
- Altezza del punto di rilascio H . Anche in questo caso l'incertezza associata dipende dalle scelte effettuate dall'analista circa la geometria del rilascio.
- Velocità del vento v_{vento} . È un parametro condizionato dalla situazione meteorologica al momento del rilascio, quindi è sottoposto ad una grande variabilità. L'incertezza associata dipende anche in questo caso dalle scelte dell'analista.

La modellazione del jet fire è soggetta anche alle incertezze legate a pressione P_0 e temperatura T_0 del gas discusse in precedenza.

È stata condotta l'analisi di sensitività a singolo parametro e a gruppi di parametri considerando le variabili di ingresso A, T_0, P_0, T_f, H e gli output del modello che descrive il jet fire, ovvero: la coordinata dell'apice di fiamma lungo l'asse x , la coordinata dell'apice di fiamma lungo l'asse z , l'irraggiamento orizzontale sul bersaglio e l'irraggiamento in direzione verticale.

In tutte le simulazioni condotte la velocità del vento è stata considerata pari al valore nominale di 6 m/s: data l'esistenza del vincolo $v_{vento}/v_{getto} > 0.013$ si è scelto di implementare l'adeguamento del valore di v_{vento} nel caso in cui, a causa di efflusso con v_{getto} troppo elevata, la disuguaglianza non venga rispettata. Ciò nonostante, viene garantita la modesta entità della variazione rispetto all'incertezza sul valore nominale.

Tutti i risultati proposti sono ottenuti campionando 10000 valori delle variabili di interesse dalle relative distribuzioni probabilistiche e valutando gli indici di importanza I_{ji} della variabile di input i rispetto all'output j .

5. RISULTATI DELL'ANALISI

5.1. Analisi a singolo parametro

Nella prima fase di questo lavoro l'analisi è stata condotta facendo variare un solo parametro alla volta e valutandone l'influenza sull'incertezza degli output considerati. La variabile che influenza maggiormente le coordinate di fiamma lungo gli assi x e z è la pressione interna P_0 . Nel caso degli irraggiamenti assume maggior rilievo la variabile temperatura di fiamma T_f , poiché l'irraggiamento dipende dalla quarta potenza della temperatura. Dato il carattere non esaustivo dell'analisi a singolo parametro non è stato possibile individuare una variabile che influenza in modo rilevante tutti gli output del modello. Pertanto si è ritenuto di approfondire lo studio attraverso una analisi di sensitività a gruppi di parametri, i cui risultati sono riportati nel seguente paragrafo.

5.2. Analisi a gruppi di parametri

A titolo esemplificativo la Tabella 3 espone i risultati relativi all'analisi per un gruppo di tre parametri. Tale scelta è stata dettata dalla necessità di valutare simultaneamente l'effetto sui quattro output di tutte le variabili ritenute maggiormente incerte, potendo in tal modo operare dei confronti diretti basati sull'indice di importanza calcolato per ciascun caso.

Tabella 3 Indici di importanza ed intervalli di variazione per l'analisi con parametri A, T_0, P_0

Analisi con parametri A, T_0, P_0				
OUTPUT (j)	INGRESSO (i)	Indice importanza	Intervallo variazione OUTPUT	
			Min	Max
Coordinata apice fiamma lungo asse x [m]	A	0.5944	0.1300	0.1900
	T_0	1.3449		
	P_0	14.7899		
Coordinata apice fiamma lungo asse z [m]	A	0.4475	3.2300	4.3400
	T_0	1.0127		
	P_0	11.1361		
Irraggiamento bersaglio orizzontale [kW/m ²]	A	0.9333	4.3540	8.3200
	T_0	2.1119		
	P_0	23.2240		
Irraggiamento bersaglio verticale [kW/m ²]	A	0.5523	9.1520	13.2520
	T_0	1.1817		
	P_0	12.9953		

Dai risultati ottenuti si evince la maggiore influenza del parametro P_0 (pressione interna) sui risultati dell'analisi. Infatti dal confronto dei risultati proposti nelle precedenti tabelle emerge che l'indice di importanza associato alla variabile di input P_0 presenta valori maggiori degli altri indici coi quali è confrontato.

5.3. Intervalli di tolleranza degli output

Con l'obiettivo di affiancare la nozione di incertezza alle stime puntuali dei valori numerici degli output del modello di jet fire che si otterrebbero con una singola simulazione, sfruttando i risultati delle simulazioni effettuate, sono state costruite le distribuzioni cumulative di probabilità (cdf) per le coordinate dell'apice di fiamma lungo le due coordinate x e z e per l'intensità di radiazione sul bersaglio orizzontale e verticale, riportate nelle Figure 3,4,5 e 6. Gli intervalli bilaterali con confidenza $\beta=0.95$ per ciascuno dei 4 output del modello di jet fire considerato sono riportati in Tabella 4. Gli estremi inferiori e superiori di tali intervalli sono stati ottenuti considerando rispettivamente i percentili 2.5 e 97.5 delle rispettive distribuzioni empiriche.

Tabella 4 Intervalli di confidenza al 95% delle variabili di output considerate nel modello di jet-fire

Intervalli di confidenza $\beta=0.95$		
OUTPUT (j)	Min	Max
Coordinata apice fiamma lungo asse x [m]	0,1400	0.1700
Coordinata apice fiamma lungo asse z [m]	3,4700	4.1000
Irraggiamento bersaglio orizzontale [kW/m^2]	3.4195	10.6590
Irraggiamento bersaglio verticale [kW/m^2]	6.2450	18.9370

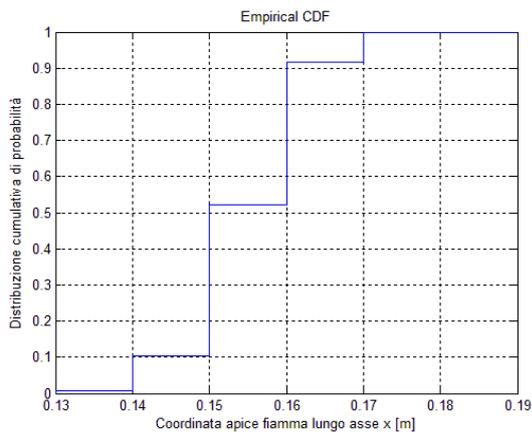


Figura 3 Cdf della coordinata dell'apice di fiamma lungo asse x

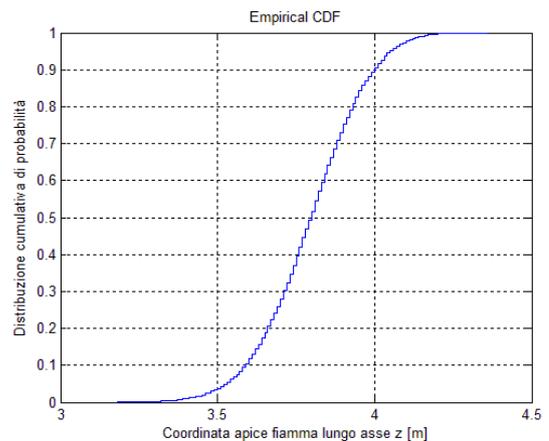


Figura 4 Cdf della coordinata dell'apice di fiamma lungo asse z

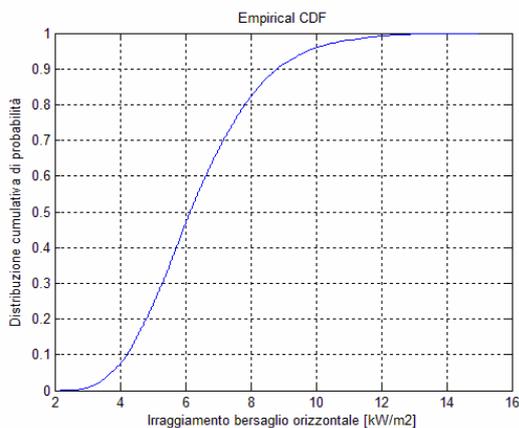


Figura 5 Cdf dei valori di irraggiamento su bersaglio orizzontale

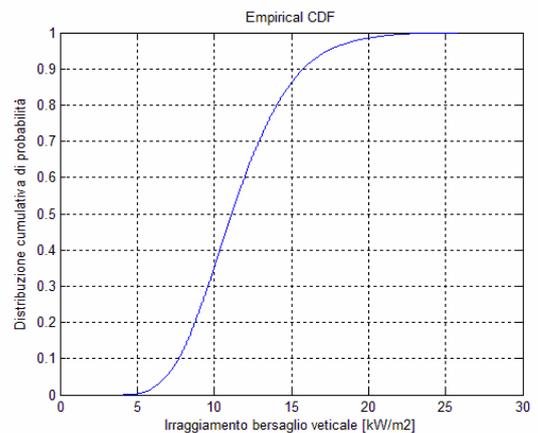


Figura 6 Cdf dei valori di irraggiamento su bersaglio verticale

7. CONCLUSIONI

A conclusione dello studio proposto viene ribadita l'importanza dello svolgimento dell'analisi di sensitività al fine di individuare i parametri di progetto maggiormente incerti e pertanto in grado di influenzare in modo significativo gli esiti dello scenario incidentale. La riduzione della variabilità di tali parametri consente di stabilire valori delle variabili operative del processo in esame più precisi e quindi di valutare in modo più accurato le eventuali conseguenze di un'anomalia accaduta all'impianto.

Nello svolgimento dell'analisi è determinante anche la disponibilità di strumenti di simulazione sufficientemente veloci, condizione dettata dall'elevato numero di iterazioni necessarie per raccogliere un campione statistico significativo.

L'analisi di sensitività, eseguita campionando numerose volte con metodo Monte Carlo i valori dei parametri di input del modello dalle rispettive distribuzioni di probabilità e valutando il corrispondente esito della simulazione, è stata applicata ad uno scenario di innesco di un jet fire in un impianto di distribuzione di H_2 per autotrazione, essendo ritenuto tra i più gravosi quello più probabile. L'analisi ha evidenziato la maggiore influenza della pressione P_0 interna al serbatoio sulle conseguenze dello scenario incidentale. Una stima più accurata del parametro P_0 permetterebbe di assicurare una minore incertezza anche nella determinazione delle conseguenze dello scenario incidentale. Tale stima potrebbe essere molto difficoltosa in quanto connessa alle condizioni operative dell'impianto ed alla temperatura dell'ambiente esterno. Si osserva che tale valore potrebbe essere drasticamente diverso nell'eventualità di un incendio esterno agli stoccaggi, qui trascurato. Inoltre gli intervalli di tolleranza associati alle grandezze che descrivono il jet fire consentono di determinare le possibili conseguenze dovute a tale evento e pertanto le misure da adottare per mitigare il rischio.

È inoltre emersa l'efficacia del metodo nell'individuare situazioni potenzialmente pericolose, rappresentate da valori massimi di irraggiamento del jet fire eccedenti la soglia di danneggiamento di 12.5 kW/m^2 , altrimenti non evidenziate qualora si trascuri l'effetto dell'incertezza dei parametri iniziali sugli esiti della modellazione. Quest'ultimo risultato è molto importante in quanto, con riferimento alla Tabella 4 e considerando il bersaglio con irraggiamento peggiore (bersaglio verticale) si evince come, a parità di distanza dalla sorgente x , l'irraggiamento massimo vari da un minimo di 6.24 kW/m^2 ad un massimo di 18.94 kW/m^2 al variare dei diversi dati di ingresso. Questo potrebbe avere importanti risvolti in termini di stima del danno dal momento che l'elevata letalità è attesa con irraggiamenti superiori ai 12.5 kW/m^2 , mentre per irraggiamenti prossimi ai 5 kW/m^2 ci si attendono danni irreversibili ma non letali.

RIFERIMENTI

- [1] A. Saltelli, K. Chan, E. M. Scott, Sensitivity analysis, John Wiley & Sons, 2000.
- [2] A. Saltelli, M. Scott, The role of sensitivity analysis in the corroboration of models and its links to model structural and parametric uncertainty, RESS, Special issue, vol 57, N° 1, 1997.
- [3] J. C. Helton, Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal, Reliability Engineering and System Safety, 42, 1993, pp 327-367.
- [4] A. Saltelli, T. Andrei, T. Homma, Sensitivity analysis of model output: an investigation of new techniques, Comput. Statistics and data analysis, 15, 1993, pp 211-238.
- [5] E. Zio, F. Cadini, F. Di Maio, V. Kopustinskas, R. Urbonas, A neural-network-based variance decomposition sensitivity analysis, Int. J. of Nuclear Knowledge Management, Vol.2, No.3, 2007, pp.299-312.
- [6] Efflusso di gas da vessel, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, 2006.
- [7] M. Boazzo, A. Carpignano, G. Del Tin, G. Sobrero, Analisi di sicurezza di impianti a rischio rilevante. Modelli per l'analisi di incendi, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, 1994, pp 19-22.
- [8] Mudan K. S., Thermal radiation hazard from hydrocarbon pool fire, Progress in energy combustion science, 10, 59-80.
- [9] Analisi di rischio Stazione di rifornimento autobus ad idrogeno (report 2), Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, 2006.