

SIMULAZIONE SOFTWARE IN TEMPO REALE DI INCIDENTI INDUSTRIALI

Filippo Bezzi¹, William Dosi²
CREA srl, via M. Monti 30
48100 Ravenna (RA)
¹E-mail: fbezzi@crea-srl.com
²E-mail: wdosi@crea-srl.com

ABSTRACT

Di seguito viene descritto un sistema software in grado di simulare lo sviluppo nel tempo di un incidente industriale in modo sincrono con la reale evoluzione dello stesso. Il sistema utilizza un insieme di modelli matematici dinamici i cui dati di input, come i parametri meteorologici del sito ed i dati ingegneristici dello scenario, sono acquisiti in tempo reale da sensori collegati ad una scheda di acquisizione.

Il sistema risolve separatamente i modelli matematici di ogni singolo evento fisico che compone l'incidente, ed unisce gli output dei modelli in modo automatico per mostrare l'evoluzione del fenomeno incidentale nel suo complesso.

Lo strumento può essere utilizzato sia per una analisi "a priori" dei possibili rischi di incidente rilevante, sia per un monitoraggio in tempo reale di una emergenza industriale.

1. INTRODUZIONE

Un tipico problema dei sistemi industriali di gestione della sicurezza è quello di evitare, o almeno minimizzare, le possibili conseguenze nefaste di incidenti rilevanti. Questi incidenti possono nascere da diverse cause, come guasti di apparecchiature, errori umani, manutenzioni non accurate, negligenza degli operatori o sabotaggi. Gli effetti di un incidente talvolta possono essere catastrofici in termini di danni alle persone, ai beni ed all'ambiente.

Fin dagli anni '60 l'analisi di rischio degli impianti industriali si confronta con questi problemi, tentando di definire le migliori soluzioni e strategie per evitare l'occorrenza di un incidente e per minimizzare i suoi effetti.

Negli ultimi 50 anni diversi episodi hanno spinto l'opinione pubblica e la comunità scientifica ad interessarsi al problema degli incidenti in ambito industriale, rivelando l'importanza dell'analisi del rischio associato alla presenza di sostanze pericolose all'interno degli stabilimenti produttivi [17]. Allo stato attuale, la legislazione delle maggiori nazioni industrializzate richiede una dettagliata analisi che possa quantificare sia in termini deterministici che probabilistici i danni originati dai possibili incidenti, come preconditione per la costruzione di un nuovo insediamento o per la modifica di uno esistente.

Il rischio associato ad un incidente è una funzione sia della probabilità che questo si verifichi, sia della magnitudo delle sue conseguenze [16]. In prima battuta, possiamo definire il rischio di un incidente industriale come il prodotto di queste due variabili.

Questa definizione è applicabile unicamente al caso di eventi che accadono con una certa frequenza, in cui è possibile stimare la probabilità di accadimento sulla base di analisi statistiche dei dati storici. Fortunatamente, gli incidenti che causano le conseguenze più gravose sono molto rari, pertanto è impossibile effettuare indagini statistiche dirette. Nella maggioranza dei casi si preferisce effettuare l'analisi degli alberi di guasto, che rappresentano uno schema delle possibili origini di un *top-event* incidentale. Da questa analisi, sono caratterizzabili i vari scenari incidentali e la portata delle loro conseguenze.

La definizione di un modello matematico analitico in grado di calcolare la molteplicità degli effetti che possono nascere da un incidente industriale è un problema estremamente complesso. Tale difficoltà nasce, ad esempio, dalla corografia delle strutture interne all'impianto, dalla varietà dei possibili processi produttivi e delle sostanze chimiche utilizzate, dalla molteplicità dei possibili guasti, e dai diversi tipi e magnitudo degli effetti dell'incidente. Inoltre, le condizioni al contorno dell'incidente, come l'insieme delle grandezze meteorologiche, sono estremamente variabili come tipo ed intensità e possono influenzare profondamente l'evoluzione dell'incidente.

Tuttavia, la simulazione di incidenti industriali è considerata di grande importanza in quanto è in grado di aumentare la sicurezza e l'affidabilità degli impianti produttivi durante il loro intero ciclo di vita. Prima della costruzione dell'impianto, la simulazione di incidenti può essere utilizzata per stimare l'impatto ambientale dell'insediamento e per valutare la portata degli danni dei possibili incidenti. Durante la progettazione dell'impianto

la simulazione può essere utilizzata per massimizzare l'efficacia delle contromisure di emergenza, come valvole di sicurezza, barriere e bacini di contenimento attorno ai serbatoi. Quando l'impianto è in funzione, la simulazione degli effetti di un incidente permette di calibrare attentamente i piani di emergenza e di evacuazione delle aree che possono essere colpite. Inoltre, le simulazioni *a posteriori* degli incidenti già avvenuti possono aiutare sia ad identificare le cause degli stessi che a fornire una spiegazione scientifica dei fenomeni coinvolti.

Se la simulazione è *sincronizzata* con l'evoluzione reale dell'incidente, allora può tener conto delle vere condizioni al contorno, come i parametri atmosferici e la geometria spaziale della sorgente, e può *reagire* a variazioni di questi parametri. In questo caso la simulazione riguarda lo scenario "reale" e si può determinare durante la sua esecuzione il piano di emergenza migliore per fronteggiare la situazione incidentale in corso. Il sistema proposto in questo articolo fornisce questa possibilità.

Un sistema di simulazione sincronizzato e reattivo può seguire due differenti approcci per rappresentare l'evoluzione in tempo reale di un incidente industriale. Il primo approccio necessita la misura della presenza e della concentrazione di sostanze pericolose fuoriuscite dall'area dello stabilimento; tale approccio richiede l'installazione di una complessa rete di sensori su tutta l'area dell'impianto; il sistema software, tramite l'acquisizione di questi dati, usa metodi statistici di regressione per interpolare i dati misurati e per rappresentare graficamente la concentrazione delle sostanze fuoriuscite sulla mappa dell'impianto. Questo approccio è di difficile attuazione in quanto richiede costi molto elevati per l'installazione e la manutenzione dell'intera rete di sensori.

L'approccio alternativo consiste in una simulazione dell'evoluzione dell'incidente in corso tramite l'utilizzo di modelli matematici dinamici, cioè modelli nella cui formulazione analitica è presente la variabile tempo in modo esplicito. Questo tipo di simulazione richiede un numero molto minore di sensori installati nell'impianto, alcuni dei quali vengono utilizzati per monitorare il rilascio incidentale di sostanze in alcuni centri di pericolo predefiniti mentre i rimanenti sensori misurano in tempo reale le condizioni atmosferiche. Il sistema descritto segue questo secondo approccio.

La parte rimanente della memoria è organizzata nel seguente modo. La prossima sezione mostra le idee di base seguite nello sviluppo del nostro sistema software di simulazione. Viene quindi descritta la sua architettura di base, mentre un esempio di scenario incidentale è simulato nel seguito; alcune osservazioni concludono l'articolo.

2. UN SISTEMA REATTIVO

La differenza principale tra una operazione manutentiva di routine ed una situazione di emergenza è il tempo. Durante una emergenza, la mancanza di tempo richiede decisioni efficaci e veloci, che devono essere interpretate in modo univoco dagli operatori.

La soluzione più comune per fronteggiare le emergenze industriali si basa sull'adozione di procedure e piani di emergenza. Questi strumenti sono fondamentalmente liste, o flussi sequenziali, di azioni che gli incaricati devono essere in grado di eseguire qualora si verifichi un evento di pericolo. Il limite maggiore di tali strumenti riguarda la loro mancanza di flessibilità: l'applicabilità delle procedure di emergenza è generalmente limitata agli scenari più comuni, oppure a quelli più pericolosi, escludendo la moltitudine dei casi intermedi. Inoltre, le istruzioni contenute nelle procedure sono spesso scritte senza un elevato grado di dettaglio, ad esempio "Raggiungere il punto di raccolta immediatamente", le quali raramente forniscono anche il modo più sicuro per eseguirle, ovvero non indicano il modo più efficace per raggiungere il punto di raccolta.

L'uso di una simulazione software per monitorare l'evoluzione di una emergenza industriale in corso può fornire la flessibilità necessaria per gestire efficacemente l'incidente. Il sistema può essere utilizzato "in linea" per mostrare i risultati della simulazione in modo sincronizzato con l'evoluzione reale degli effetti dell'incidente, e la simulazione può reagire alle variazioni fisiche delle condizioni ambientali nello stesso momento in cui queste si verificano. Inoltre il sistema può essere utilizzato *off-line* per stimare l'efficacia e l'affidabilità dei normali strumenti di gestione delle emergenze, come i piani e le procedure di emergenza.

Caratteristiche del sistema

Quando il tempo di elaborazione richiesto per la risoluzione del modello di simulazione è uguale all'intervallo di tempo che trascorre nella realtà simulata, possiamo dire che la simulazione è *sincronizzata* con il fenomeno reale. Combinando questa idea con l'utilizzo di modelli dinamici, è possibile calcolare periodicamente lo stato aggiornato dell'evento studiato mentre questo si evolve nel mondo reale.

Per simulare in modo sincrono un fenomeno fisico, la miglior cosa sarebbe operare in un sistema hardware e software rigorosamente *real-time*. In tale sistema, la correttezza di una operazione dipende sia dalla correttezza formale del codice, che dal rispetto di scadenze temporali da rispettare nell'esecuzione dell'operazione. Il tempo di elaborazione dell'operazione può essere stabilito prima della sua esecuzione, pertanto è possibile simulare dinamicamente un evento lanciando le elaborazioni con una certa frequenza stabilita.

Il sistema di simulazione sviluppato è stato progettato per essere eseguito su normali computer, ovvero su piattaforme hardware e software che non forniscono un ambiente di calcolo *real-time*. Come conseguenza, si è seguito un approccio *best effort* relativamente alle risorse di sistema disponibili. Inoltre, i normali personal computer generalmente non sono sistemi dedicati alla simulazione, e l'elaboratore dispone di risorse variabili principalmente a causa della natura *multitasking* dei moderni sistemi operativi; pertanto il software di simulazione deve tener

conto, ad esempio, del *time sharing* del processore, della memoria disponibile, e della larghezza di banda del disco. Da ciò deriva che non è possibile prevedere il tempo di elaborazione degli algoritmi di simulazione.

Un approccio *best effort* permette tuttavia la sincronizzazione tra l'evoluzione reale dell'incidente e la simulazione. Il sistema software sviluppato si dimostra *reattivo* in quanto è in grado di reagire alla disponibilità di risorse hardware e software messe a disposizione dall'elaboratore, eseguendo la sincronizzazione con la realtà simulata con il minore passo temporale possibile

Una ulteriore forma di reattività è rappresentata dall'abilità di reagire alle variazioni delle condizioni al contorno dell'incidente. Tali condizioni al contorno, come i parametri meteorologici, sono variabili richieste dai modelli di simulazione e la loro evoluzione nel tempo è spesso impossibile da determinare all'interno di un'area relativamente piccola e complessa come quella di un insediamento industriale. Tipicamente queste variabili cambiano considerevolmente durante l'evoluzione stessa dell'incidente, e l'assunzione che abbiano valori costanti durante tutto il fenomeno è fonte di errore.

Per assicurare questo tipo di reattività, il sistema è collegato a sensori di sostanze pericolose e a centraline atmosferiche, per rimanere costantemente aggiornato sulle variazioni dello scenario. Come mostrato nell'esempio descritto in seguito, un cambiamento nella direzione del vento causa un cambiamento nella forma e nella direzione della nube di gas disperso, e queste variazioni sono correttamente calcolate dal programma di simulazione.

Un'altra caratteristica del sistema è la sua interfaccia grafica che mostra una visualizzazione immediata e di facile comprensione dei risultati della simulazione. Il software può visualizzare gli effetti dell'incidente calcolati direttamente sul *layout* dello stabilimento, usando formati standard della mappa dell'impianto. Nell'esempio verranno mostrati i risultati della simulazione con alcuni *screenshot* del programma.

Modellizzazione di un incidente industriale

Come detto in precedenza, un incidente industriale è un evento estremamente complesso e la sua modellizzazione matematica è un compito arduo.

In accordo con [11], è possibile scomporre ed analizzare un incidente industriale come una serie di sotto-eventi logicamente collegati in maniera dipendente dal tempo. La tipica decomposizione è mostrata in Figura 1; di seguito viene data una breve descrizione dei sotto-eventi:

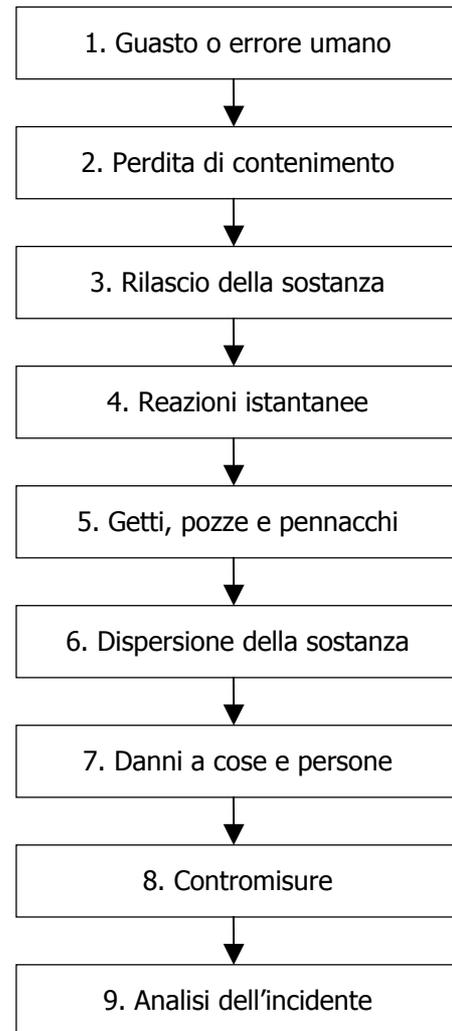


Figura 1: Evoluzione di un tipico incidente industriale

1. la causa di un incidente può essere un guasto, un errore umano, il deterioramento progressivo di una apparecchiatura, un errore di progettazione, ed altro ancora;
2. la perdita di contenimento della sostanza pericolosa può avere luogo da una rottura su una tubazione, da una flangia, da un raccordo o da un serbatoio;
3. la sostanza fuoriuscita può essere liquida, gassosa o multifase;
4. diversi fenomeni veloci, come reazioni chimiche istantanee, *flash* o passaggi di fase, possono avvenire non appena la sostanza è fuoriuscita;
5. altri fenomeni più lenti e perduranti nel tempo guidano l'evoluzione dell'incidente, come generazioni di getti, formazione di aerosol, scambi termici, allargamento di pozze di liquido, evaporazione e formazione di pennacchi e nubi;
6. l'interazione con l'ambiente circostante porta alla dispersione ed al trasporto della sostanza nell'aria, nell'acqua o nel suolo, a causa della gravità e delle correnti nei mezzi (aria ed acqua);

7. se la sostanza fuoriuscita è pericolosa, possono avvenire danni alle persone (per inalazione o contatto con tossici, irraggiamento, ...) ed alle strutture circostanti (per sovrappressioni, stress termici, ...);
8. vengono prese contromisure per limitare i danni ed arginare l'evoluzione del fenomeno incidentale;
9. viene effettuata una analisi delle cause dell'incidente e dei danni subiti.

Le possibili cause di incidente e la localizzazione dei punti critici, oggetto dei punti 1 e 2 del flusso in Figura 1, vengono stimati con metodi statistici tramite gli alberi di guasto o tecniche alternative (vedi sezione precedente). Gli effetti dell'incidente, evidenziati nei punti da 3 a 7, sono generalmente valutati usando modelli matematici di efflusso, formazione di getti, evaporazione, dispersione, irraggiamento, sovrappressione, ecc.

Ogni modello matematico si riferisce ad un singolo sotto-evento. Il modello completo dell'incidente può essere ottenuto dalla ricomposizione dei modelli elementari in sequenze, creando una dipendenza logica e dipendente dal tempo come mostrato in Figura 2. In tale sequenza di modelli, l'input di un modello è rappresentato dall'output di uno o più dei modelli che lo precedono nella serie.

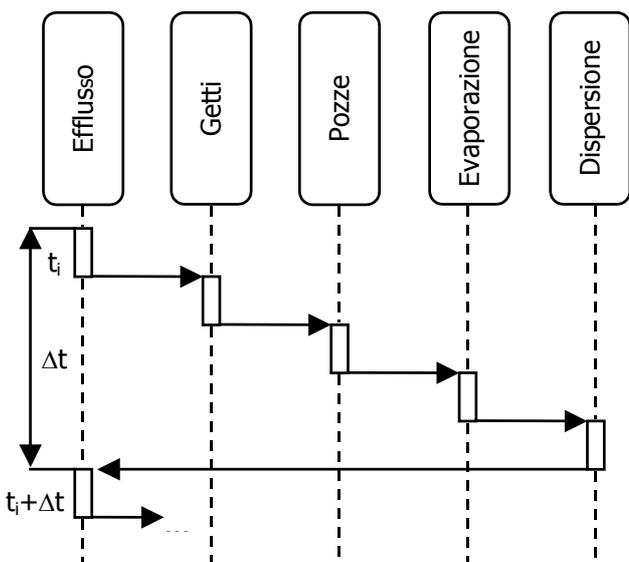


Figura 2: Diagramma UML di una sequenza di modelli: l'output di un modello è l'input del modello successivo

Nella Figura 2 l'esempio riguarda la tipica fuga di una sostanza liquida. Per semplicità, in questo esempio non sono rappresentati modelli riguardanti il calcolo dei danni alle persone o alle cose, come tossicità, esplosione o irraggiamento termico. Il primo modello della serie nell'esempio è un modello di efflusso di liquido, che è attivato dal programma al momento dell'inizio dell'emergenza (vedi oltre per maggiori dettagli). Quando il modello di efflusso termina le sue elaborazioni, i risultati

vengono passati al modello successivo della serie, che calcola i parametri caratteristici di un getto turbolento. Gli output di quest'ultimo modello vengono passati come input al modello seguente, che calcola l'estensione della pozza di liquido caduto sul substrato. Dall'estensione della pozza il modello appropriato calcola la quantità di sostanza liquida che evapora; questo risultato è infine passato all'ultimo modello della serie, che ha il compito di calcolare la dispersione dei vapori rilasciati nell'atmosfera. Infine il modello di dispersione passa i suoi output, insieme a quelli dei modelli precedenti, al programma principale che visualizza lo stato globale dell'incidente come somma dei singoli effetti modellizzati nel ciclo di calcolo. Nell'esempio della Figura 2, la simulazione parte nell'istante t_i e richiede Δt per l'elaborazione dell'intera serie di modelli.

Al termine del calcolo della serie, il programma principale attiva nuovamente la successione di modelli. In questa nuova esecuzione, il parametro t in tutti i modelli dinamici utilizzati è incrementato di Δt ; questo incremento della variabile tempo è esattamente il tempo richiesto dal software per il calcolo del ciclo appena terminato. Durante l'esecuzione del nuovo ciclo la serie dei modelli dinamici calcola gli effetti dell'incidente con riferimento all'istante $t_{i+1} = t_i + \Delta t$. La simulazione continua con cicli di questo tipo fino a che l'utente decide di terminarla, forzando un blocco nell'elaborazione, o fino a che tutti gli effetti fisici modellizzati non sono più significativi, cioè quando l'efflusso di sostanza è terminato, non vi è più una pozza di liquido, ed il gas è completamente disperso nell'ambiente.

Due importanti caratteristiche meritano di essere evidenziate. In primo luogo, il tempo di elaborazione Δt è misurato al termine di ogni ciclo di calcoli, e può variare durante il corso della simulazione in funzione delle risorse del sistema e delle variazioni delle condizioni al contorno. Se la simulazione parte nello stesso istante in cui si verifica un incidente (ad esempio, se è attivata da un sensore che misura il rilascio di una sostanza nell'ambiente), allora la sincronizzazione tra il "tempo dell'incidente" ed il "tempo della simulazione" è mantenuto fino al termine dei calcoli.

Il secondo aspetto da segnalare è che un nuovo ciclo può essere diverso, come struttura di modelli, dal ciclo che lo ha preceduto, a causa di eventi fisici che hanno modificato l'evoluzione dell'incidente. Ad esempio, se la pozza di liquido trova un innesco, l'output del modello di allargamento della pozza viene passato ad un modello di irraggiamento.

Sebbene in letteratura sia possibile trovare una grande quantità di modelli matematici per il calcolo degli effetti che rappresentano i singoli sotto-eventi, non è stato semplice scegliere i modelli migliori per le esigenze del programma software sviluppato.

Una prima difficoltà è dettata dal fatto che i diversi modelli matematici sono spesso sviluppati e validati con l'applicazione di assunzioni talvolta semplicistiche, come terreno piano ed campo di vento uniforme. La maggior parte di queste assunzioni sono troppo forti per essere adottate tali e quali nell'ambiente reale di uno stabilimento

industriale. Per evitare di queste discrepanze, generalmente nei modelli sono inseriti parametri e coefficienti empirici, che tengono conto delle differenze tra le assunzioni utilizzate e la reale situazione ambientale, ma questi parametri sono spesso difficili da stimare, specialmente nel caso di una emergenza industriale.

Una seconda difficoltà nasce dalla sensibilità dei modelli alle condizioni al contorno, come le variabili meteorologiche. Per esempio, in ogni punto di uno stabilimento industriale è difficile valutare la velocità e l'intensità del vento, a causa della complessa forma degli impianti e dell'evoluzione spesso imprevedibile delle condizioni meteorologiche su piccola scala. Un altro esempio di condizione al contorno difficile da determinare è rappresentato dalla forma e dalle dimensioni di un foro da cui esce la sostanza. Questo parametro ha una grande influenza sui risultati della simulazione, specialmente nei primi istanti dell'incidente, ma generalmente non può essere determinato senza grandi margini di incertezza.

Per limitare l'impatto di questi problemi, sono stati adottati alcuni criteri che hanno guidato nella scelta dei modelli migliori da implementare nel sistema software. Tra i diversi modelli bibliografici, sono stati preferiti quelli con:

1. il minimo numero di condizioni al contorno necessarie come input, per evitare difficili stime di parametri incogniti;
2. il maggiore intervallo di applicabilità, per prevedere gli effetti di incidenti nel numero maggiore di condizioni ambientali;
3. una formulazione matematica derivata da una solida base teorica, con il minor numero possibile di parametri empirici;
4. una ridotta complessità, per essere eseguiti velocemente dal sistema;
5. una formulazione dinamica, cioè un uso esplicito della variabile tempo.

I modelli scelti ed implementati nel software sono descritti in [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29]. Questi modelli soddisfano le condizioni espresse e sono largamente accettati dalla comunità scientifica. In alcuni casi specifici, è stato necessario effettuare piccoli adattamenti per mantenere la corretta compatibilità tra gli output di un modello e gli input di un altro, al fine di poter integrare gli algoritmi all'interno delle serie logiche descritte in precedenza.

Identificazione dei centri di pericolo

All'interno di un impianto industriale moderno è possibile trovare una grande varietà di serbatoi, tubazioni, reattori, pompe ed apparecchiature utilizzati per il trasporto, lo stoccaggio e la trasformazione di sostanze chimiche pericolose. Ogni componente dell'impianto presenta un suo grado di rischio, che può essere quantificato tramite approcci statistici diretti o usando alberi di guasto. È possibile chiamare alcuni particolari componenti

dell'impianto, in cui il rischio di incidente è superiore di una certa soglia (ad esempio 10^{-6} eventi/anno) come *centri di pericolo*.

All'interno di un centro di pericolo è possibile che si sviluppino uno o più incidenti rilevanti come risultato di un guasto o di un'altra causa. Ogni tipo di incidente può essere descritto da una serie di attributi, che dipendono sia da parametri di processo dell'impianto che dalle proprietà della sostanza coinvolta nell'incidente. Esempi di parametri caratteristici del processo sono, ad esempio, la localizzazione e la forma del foro di fuoriuscita della sostanza e la presenza o assenza di valvole di emergenza. Esempi di parametri dipendenti dalla sostanza sono il suo stato fisico (liquido o gassoso), la temperatura e pressione di stoccaggio, ed altre proprietà chimiche e fisiche. Questi insiemi di variabili possono essere chiamati *scenari incidentali*.

Ogni scenario comprende pertanto un insieme di parametri, sia statici che dinamici, i quali rappresentano gli input per le serie di modelli matematici usati dalla simulazione; a tali input si sommano i dati rilevati dalle centraline meteorologiche che riguardano i parametri atmosferici.

ARCHITETTURA DEL SISTEMA

Il sistema software è sviluppato per piattaforme MS Windows® a 32 bit. Al fine di produrre un software facilmente manutenzionabile, l'architettura del sistema è stata separata in quattro moduli differenti:

1. una banca dati
2. una interfaccia utente
3. una interfaccia hardware – software con i sensori
4. un insieme di librerie di modelli matematici

Un esempio del sistema è mostrato in Figura 3, che rappresenta una delle possibili relazioni tra i moduli.

Il database contiene i dati che riguardano lo scenario selezionato e che rappresentano gli input per i modelli della libreria di simulazione. In maggiore dettaglio, all'interno della banca dati sono memorizzati:

- i collegamenti ai file in formato *Autocad* o *DXF*, che indicano il *layout* dell'impianto in formato grafico vettoriale;
- il tipo, la posizione e la descrizione, in ogni mappa, dei centri di pericolo;
- la descrizione ed i parametri di tutti i possibili scenari dei centri di pericolo;
- la descrizione e le proprietà fisico-chimiche delle sostanze pericolose che possono essere coinvolte in uno scenario;
- i dati meteorologici acquisiti dai sensori;
- i dati meteorologici ricavati da dati storici, che possono essere usati nel caso in cui i sensori siano guasti.

L'interfaccia utente del sistema è sviluppata su base grafica (GUI) e agisce da collante per collegare i dati contenuti nel database e passarli alle librerie di modelli matematici. L'interfaccia grafica mostra sullo schermo la mappa dell'impianto ed i risultati della simulazione, utilizzando routine grafiche vettoriali. L'implementazione delle classiche funzionalità tipiche degli ambienti CAD permette all'utente di effettuare *zoom* e panoramiche di particolari aree dell'impianto, al fine di monitorare con maggiore dettaglio l'evoluzione dell'incidente.

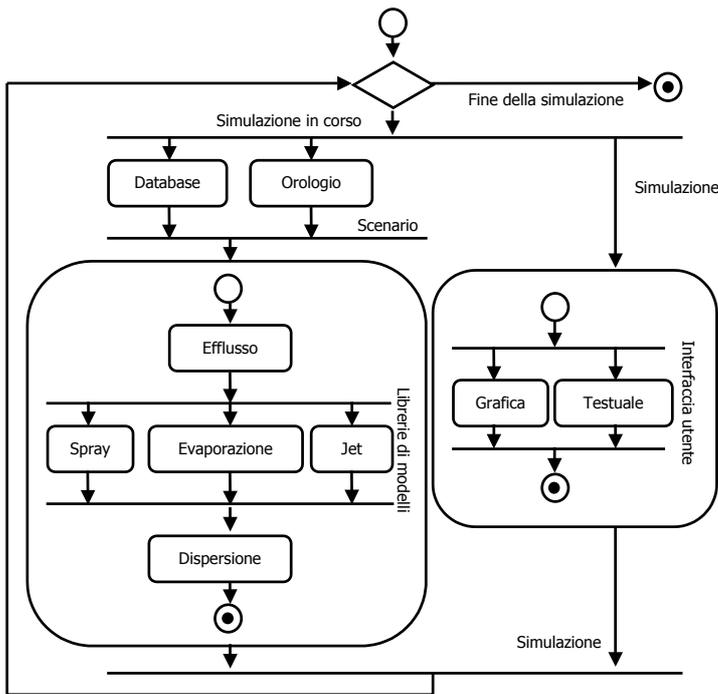


Figura 3: diagramma UML di una possibile architettura del sistema

Le centraline meteorologiche sono localizzate nell'area dell'impianto; all'inizio di ogni ciclo di calcolo i dati acquisiti dai sensori (velocità e direzione del vento, temperatura dell'aria, pressione atmosferica, umidità relativa) sono letti dal sistema e memorizzati nella banca dati. I dati più recenti vengono passati ai modelli di simulazione.

L'ultimo modulo del sistema è rappresentato dalla libreria di modelli matematici. Ogni modello calcola i risultati di un singolo sotto-evento che compone l'incidente, come descritto nel paragrafo precedente; quando il sistema termina un ciclo di calcoli, i risultati vengono passati all'interfaccia utente per la rappresentazione su schermo, i dati dello scenario vengono aggiornati e viene lanciato un nuovo ciclo di calcoli.

UNA APPLICAZIONE: FUORIUSCITA DI FOSGENE

Come esempio di applicazione del sistema sviluppato, consideriamo ad esempio un rilascio di fosgene (COCl_2) da

una tubazione che si innesta su un reattore. Il fosgene è un gas estremamente tossico, potenzialmente pericoloso per le persone localizzate sia dentro che all'esterno dell'impianto.

L'incidente mostrato nell'esempio simula la fuoriuscita attraverso un foro del diametro di 1 cm su una tubazione da 5 cm, in cui il fosgene è trasportato in fase liquida in quanto sottoposto ad alte pressioni (436000 Pa) e basse temperature (-20 °C).

Non appena si verifica la rottura, il fosgene fuoriesce dal foro e forma una pozza all'interno del bacino di contenimento localizzato intorno al reattore. Il liquido, sottoposto a condizioni ambientali normali, immediatamente va in ebollizione sottraendo calore dal substrato e dall'aria. I vapori generati, che rappresentano l'effetto più pericoloso per le persone, vengono quindi dispersi nell'ambiente in una direzione che è funzione della quantità di moto iniziale della nube e della direzione del vento.

La Figura 4 mostra il pennacchio dei vapori, in verde, che ha avuto origine dall'incidente, un minuto dopo la fuoriuscita. Le aree dell'impianto all'interno del pennacchio sono soggette ad una concentrazione di sostanza superiore a 2 ppm, ovvero al valore IDLH del fosgene.

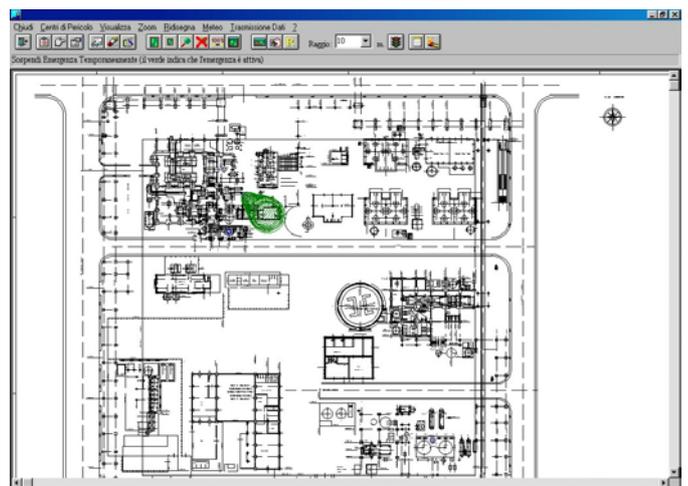


Figura 4: situazione dell'incidente dopo 1 minuto, con condizioni meteorologiche stazionarie. Il pennacchio di fosgene, in verde, mostra le aree in cui la concentrazione è maggiore di 2 ppm (IDLH della sostanza)

La Figura 5 mostra l'evoluzione dell'incidente quattro minuti dopo che si è verificata la fuoriuscita. In questo caso abbiamo assunto che ogni parametro meteorologico sia costante durante questo intervallo di tempo; pertanto il pennacchio di fosgene presenta un asse rettilineo e punta nella direzione del vento, che soffia ad una velocità di 2.5 m/s.

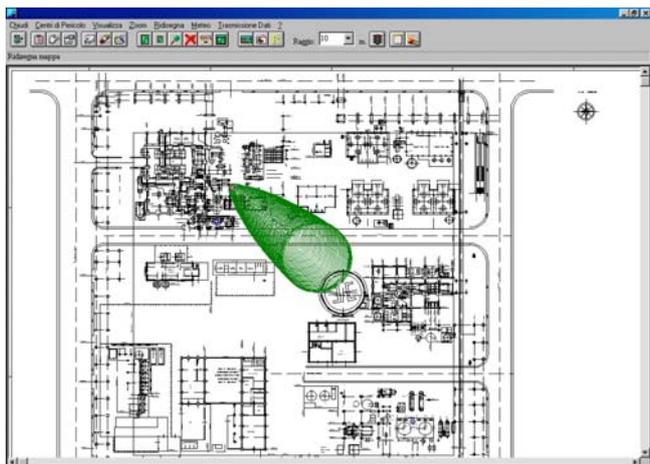


Figura 5: situazione dell'incidente dopo 4 minuti

Dopo quattro minuti, assumiamo che le centraline collegate al sistema registrino che la velocità del vento sia cresciuta a 2.7 m/s e che la sua direzione sia cambiata di 20° in senso orario. Il pennacchio di fosgene ora si disperde seguendo le nuove condizioni meteorologiche. Se un nuovo cambiamento viene registrato dopo 195 secondi dalla fuoriuscita, con la velocità del vento che ritorna al valore iniziale di 2.5 m/s e la sua direzione che ruota di 15° in senso antiorario, l'asse del pennacchio diventa simile ad una spezzata, e la nube assomiglia ad una "S" allungata.

La Figura 6 mostra come il sistema reagisce ai cambiamenti dei parametri meteorologici, visualizzando la forma del pennacchio dopo 10 minuti.

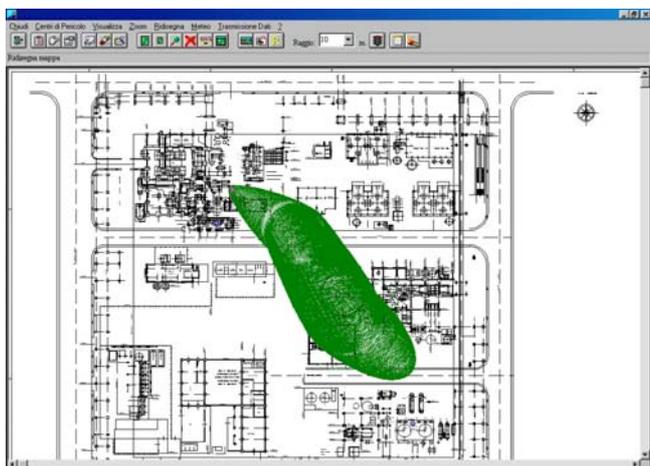


Figura 6: situazione dell'incidente dopo 10 minuti

I risultati della simulazione mostrati sono in accordo con il comportamento predetto da modelli bibliografici [3, 23, 27].

Durante l'esecuzione di questo esempio, durata 10 minuti, il sistema ha risolto i modelli di simulazione, visualizzato risultati parziali ed aggiornato la banca dati 584 volte,

ovvero circa 1 volta al secondo. La simulazione è stata eseguita su un computer con un processore Pentium III ® 500 MHz e con una memoria RAM di 128 Mb, funzionante con un sistema operativo Windows ® 2000.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il sistema descritto presenta diverse caratteristiche che lo rendono uno strumento molto utile per l'analisi del rischio e per la gestione delle emergenze, che possono essere così riassunte:

1. sincronizzazione e reattività ad eventi esterni, che rendono il sistema adatto alla gestione in tempo reale delle emergenze industriali;
2. uso di modelli dinamici, per simulare eventi fortemente dipendenti dal tempo;
3. alto grado di automazione, ovvero i singoli modelli ed i sensori atmosferici possono dialogare direttamente senza bisogno di una interazione da parte dell'utente;
4. alta modularità, che rende il sistema facilmente installabile, manutenzionabile ed ulteriormente sviluppabile.

Queste caratteristiche permettono al sistema software di essere usato per due scopi principali. In primo luogo la simulazione può essere usata come strumento per una classica analisi degli effetti *a priori* di un incidente, e può fornire utili indicazioni sulle migliori soluzioni impiantistiche di sicurezza da adottare e sulla localizzazione ottimale dei presidi di sicurezza. In secondo luogo il sistema può essere usato per monitorare in tempo reale vere emergenze industriali, evidenziando le aree che devono essere evacuate per prime, le migliori vie di fuga e le direzioni preferenziali per i mezzi di pronto intervento.

Ulteriori sviluppi del sistema possono includere l'implementazione di nuovi modelli per simulare gli effetti di un incidente in modo maggiormente accurato o per stimare conseguenze istantanee, come UVCE o lanci di proiettili. Un'altra interessante caratteristica da implementare nel sistema è rappresentata dalla capacità di *prevedere* l'evoluzione dell'incidente mentre viene mostrato lo stato dell'emergenza in modo sincronizzato con la realtà simulata. Questo obiettivo può essere raggiunto implementando algoritmi statistici per l'estrapolazione delle condizioni meteorologiche, calcolando le conseguenze dell'incidente con l'esecuzione di modelli molto veloci e mostrando gli output in una finestra separata.

Inoltre, allo stato attuale il sistema è privo di sistemi di *fault tolerance*, cioè se un guasto interessa il sistema stesso o il computer su cui il simulatore è in esecuzione, l'esecuzione del programma termina istantaneamente, come avviene per le normali applicazioni. Questo effetto non è auspicabile, in special modo per un software la cui caratteristica primaria è la visualizzazione in tempo reale delle conseguenze pericolose di un incidente industriale. Usando tecniche note in grado di limitare questi effetti, il sistema può essere sviluppato con la capacità di allertare gli addetti nei reparti

dell'impianto o le squadre di soccorso in modo automatico, qualora si verifici un incidente con effetti di alta magnitudo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] U.S. Coast Guard, A critical technical review of six hazard assessment model. technical report, 1980.
- [2] U.S. National Fire Protection Association Liquefied petroleum gases handbook., 1989.
- [3] TNO, "Methods for the determination of possible damage", 1989.
- [4] Cook J., Bahrami Z., Whitehouse R. J., "A comprehensive program for calculation of flame radiation levels", *Journal of Loss Prevention*, vol. 3 (Jan.) 1990: 150 – 155.
- [5] Cramer & Warner Ltd, Risk analysis of six potentially hazardous industrial objects. Reidel Publishing, 1981.
- [6] Davis B. C., Bagster D. F., "Computation of view factors of fire models", in *Journal of Loss Prevention*, vol. 3 (June) 1989: 327–329.
- [7] Doury, A., "A design basis for the operational modeling of atmospheric dispersion", in *Journal of Loss Prevention*, vol. 1 (July) 1988: 156–163.
- [8] Drysdale D., *An introduction to fire dynamics*. Wiley and Sons, 1985.
- [9] Duijm N. J., Webber D. M., "Dispersion in the presence of buildings", in *Journal of Loss Prevention*, vol. 7 (Feb.) 1994: 118–123.
- [10] Ertugrul A., Zelensky M. J., "Risk quantification for meteorology-dependent hazards due to point and linear sources", in *Journal of Loss Prevention*, vol. 9 (May), 1996: 135 – 145.
- [11] Fanelop T. K., *Fluid mechanics for industrial safety and environmental protection*. Elsevier, 1994.
- [12] Hardee, Lee, "Expansion of clouds from pressurized liquids", in *Accidental analysis*, vol. 7, 1975: 91-102.
- [13] Hirano T., "A theoretical approach to hazard assessment", in *Journal of Loss Prevention*, vol. 3 (July), 1990: -321 – 326.
- [14] Jaluria Y., *Natural convection and heat transfer*. Pergamon, 1980
- [15] Kletz T. A., *What went wrong? Case histories of process plant disasters*. Gulf Publishing, 1986.
- [16] Molak V., *Fundamentals of risk analysis and risk management*. Lewis Publishers, 1996.
- [17] Nelms C. R., "Computerized hazard analysis", in *Journal of Loss Prevention*, vol. 1 (July), 1988: 168 – 172.
- [18] Nieuwstadt F. T., Van Dop H., *Atmospheric turbulence and air pollution modelling*. Reidel, 1982.
- [19] Owens K. A., Hazeldean J. A., "Fires, explosions and related incidents at work", in *Journal of Loss Prevention*, vol. 8 (May) 1993: 291 – 297.
- [20] Pasman H. J., Duxbury H. A., Bjordal E. N., "Major hazards in the process industries: achievements and challenges in loss prevention", in *Journal of hazardous materials*, 1992: 1 – 38.
- [21] Pasquill F., Smith B., *Atmospheric diffusion*. Ellis Horwood, 1983.
- [22] Perry J. H., *Chemical Engineers' Handbook*. Mc Graw Hill.
- [23] Picknett, *Field experiments on the behaviour of dense gas clouds*. Porton, 1978, report PTN/il 1154/78/1.
- [24] Ricou F. P., Spalding B. D., "Measurement of entrainment by axisymmetrical turbulent jets", in *Journal of Fluid Dynamics*, n. 11, 1961: 21-32.
- [25] Seaton W. H., Harrison B. K., "A new general method for estimation of heats of combustion for hazard evaluation", in *Journal of Loss Prevention*, vol. 3 (July): 1990: 311 – 319.
- [26] Spalding D., *Heat transfer and turbulent buoyant convection*. Mc Graw Hill, 1988.
- [27] Taylor J. R., *Risk analysis for process plant, pipelines and transport*. Taylor Associates, 1991.
- [28] Thomas, "The size of flames from natural fires", in 9th symposium on combustion, Academic Press, 1963.
- [29] Turner J. S., *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge University Press, 1979.
- [30] UK Health and Safety Executive *The Canvey study*, 1978.
- [31] Virtanen K., Kakko R., "TOXFIRE: a quick decision software", in *Journal of Loss Prevention*, vol.10 (Jan) 1997: 1-6.
- [32] Young M. J., *Windows animation programming*. AP professional, 1994.
- [33] Ziomas I. C., Zerefos C. S., Bias A. F., "Design of a system for real-time modelling of the dispersion of hazardous gas releases in industrial plants", in *Journal of Loss Prevention*, 2.