

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA,
AMBIENTALE E DEI MATERIALI – DICAM*

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CHIMICA
E DI PROCESSO*

TESI DI LAUREA

In

SICUREZZA OCCUPAZIONALE E IGIENE INDUSTRIALE M

TITOLO

Analisi del rischio incendio in un'autorimessa attraverso
l'approccio prestazionale: confronto tra veicoli alimentati a batterie
agli ioni di litio e a LNG

CANDIDATO
Stefano Balzamo

RELATORE
Prof. Giordano Emrys
Scarponi

CORRELATORI
Ing. Andrea Bartolini
Ing. Francesco Cassani

Anno Accademico 2024/25

Sessione V

SOMMARIO

| | |
|--|-----------|
| SOMMARIO | I |
| 1. INTRODUZIONE | 4 |
| 1.1. LNG | 5 |
| 1.1.1. LIQUEFAZIONE, STOCCAGGIO E RIGASSIFICAZIONE | 8 |
| 1.2. VEICOLI ELETTRICI | 9 |
| Batterie agli ioni di Litio | 9 |
| 1.3. Obiettivi della tesi | 13 |
| 2. METODOLOGIA | 15 |
| 2.1. Fenomenologia degli incendi | 15 |
| 2.2. Codice di prevenzione incendi | 18 |
| 2.2.1. Approccio ingegneristico – FSE | 22 |
| 2.2.2. FDS | 32 |
| 2.2.3. PyroSim | 37 |
| 3. CASO STUDIO | 40 |
| 3.1. GEOMETRIA E CONTESTO | 41 |
| 3.2. Auto Elettriche | 43 |
| 3.2.1. Modellazione del caso studio | 46 |
| 3.3. Auto LNG | 57 |
| 3.3.1. Pool Fire LNG..... | 59 |
| 3.3.2. Modellazione caso studio..... | 60 |
| 3.4. DEFINIZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO | 66 |
| 4. RISULTATI E DISCUSSIONE | 69 |
| 4.1. Veicoli Elettrici | 71 |
| 4.1.1. HRR | 71 |
| 4.1.2. DEVICES..... | 72 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 4.2. | Veicoli LNG..... | 83 |
| 4.2.1. | HRR | 84 |
| 4.2.2. | DEVICES..... | 84 |
| 4.3. | Confronto | 90 |
| 5. | <i>CONCLUSIONI</i>..... | 93 |
| 6. | <i>APPENDICI</i>..... | 96 |
| 6.1. | Appendice A: Codice FDS Veicoli elettrici..... | 96 |
| 6.2. | Appendice B: Codice FDS Veicoli a LNG | 105 |
| 6.3. | Appendice C: Esempio di codice MATLAB per la mappatura dei devices 113 | |
| 7. | <i>BIBLIOGRAFIA</i>..... | 117 |

ABSTRACT

Negli ultimi anni, la **necessità di ridurre la dipendenza** dai combustibili fossili come risorsa energetica primaria sta guidando un crescente impiego di fonti alternative, tra cui, **principalmente**, la corrente elettrica.

Attualmente, la soluzione più diffusa è rappresentata dalle **batterie agli ioni di litio**, le quali rispondono efficacemente alle esigenze di sostenibilità ambientale. Parallelamente, sta guadagnando rilevanza il **Gas Naturale Liquefatto (GNL)**, considerato una fonte **transitoria più pulita** rispetto ai combustibili tradizionalmente impiegati.

L'utilizzo di qualsiasi fonte energetica, incluse le batterie e il GNL, comporta dei **rischi per la sicurezza** che devono essere gestiti, sia durante le operazioni standard sia in scenari di malfunzionamento o avaria.

Mediante l'analisi approfondita delle **reazioni chimiche** coinvolte, delle **emissioni** e della **potenza termica irraggiata**, è stata condotta una simulazione di incendio su larga scala, utilizzando un **modello CFD (Computational Fluid Dynamics)**, per veicoli alimentati rispettivamente a batteria e a GNL.

I risultati di questa modellazione sono stati successivamente analizzati con l'obiettivo di **evidenziare le maggiori criticità** associate a ciascun scenario e di proporre **soluzioni e misure di mitigazione** implementabili.

1. INTRODUZIONE

La maggiore sfida che l'umanità si trova ad affrontare nel contesto contemporaneo è rappresentata dal **cambiamento climatico**. L'accumulo di emissioni di carbonio e di gas serra nell'atmosfera terrestre sta causando un riscaldamento globale che procede a un ritmo allarmante.

L'**Unione Europea (UE)** ha identificato il **settore dei trasporti** come responsabile di circa un quarto delle emissioni totali di CO₂ in Europa, con il **71,7%** di tali emissioni attribuibili specificamente al **trasporto stradale**, secondo i dati forniti dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (**EEA - European Environment Agency**) [1].

Nel tentativo di mitigare le emissioni di CO₂, l'UE ha fissato obiettivi ambiziosi:

- **Obiettivo 2030:** Ridurre le emissioni dei trasporti del **60%** rispetto ai livelli del 1990.
- **Obiettivo 2050:** Raggiungere una riduzione del **90%** delle emissioni di gas serra dovute ai trasporti rispetto ai livelli del 1990, con l'obiettivo ultimo di conseguire la neutralità climatica entro il 2050.

Nonostante questi impegni, il settore dei trasporti è stato l'unico a registrare un aumento delle emissioni di gas serra negli ultimi tre decenni, con una crescita del **33,5%** tra il 1990 e il 2019[2].

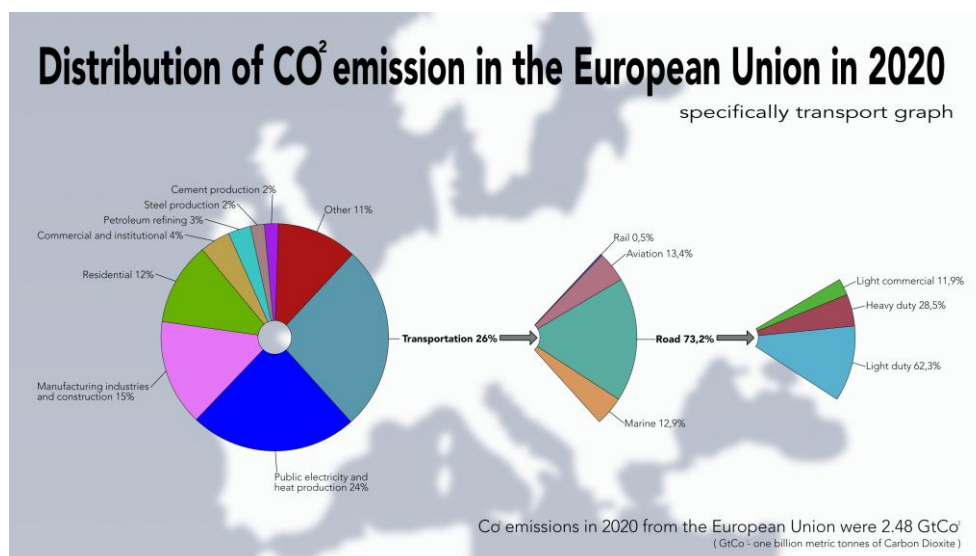


Figura 1. Distribuzione della CO₂ emesse in UE nel 2020 a causa dei trasporti

Le emissioni di CO₂ nel trasporto passeggeri variano in base alla modalità di trasporto (stradale, ferroviario, aereo e marittimo). Riguardo al trasporto su strada in Europa, le **autovetture** si distinguono come tra i mezzi più inquinanti, generando il **60,7%** del totale delle emissioni stradali (Fig. 1).

Esistono due approcci principali per la riduzione delle emissioni di CO₂ derivanti dalle automobili: l'incremento dell'efficienza dei veicoli esistenti o la sostituzione del tipo di alimentazione. Storicamente, la maggior parte del trasporto stradale in Europa nel 2019 era alimentata a diesel (66,7%) seguito dalla benzina (24,55%). In questa ottica di transizione energetica, stanno acquisendo crescente rilevanza i veicoli alimentati a **Gas Naturale Liquefatto (GNL)**, noto internazionalmente con l'acronimo **LNG** (*Liquefied Natural Gas*), e le auto dotate di accumulatori a **ioni di litio (Li-Ion)**[3].

1.1.LNG

Il **GNL** sta emergendo come una delle alternative più promettenti ai combustibili fossili tradizionali. Nell'ambito dei carburanti per autotrazione, l'impiego del **GNL** offre vantaggi significativi sia in termini di sostenibilità ambientale sia di efficienza operativa:

- **Riduzione delle Emissioni:** Emette fino al **20% in meno di CO₂** rispetto al diesel e alla benzina, oltre a ridurre drasticamente le emissioni di ossidi di azoto (NO_x), particolato e altri inquinanti atmosferici[4].
- **Costi:** Presenta un costo per unità energetica generalmente inferiore rispetto ai carburanti tradizionali.
- **Sicurezza Intrinseca:** Il **GNL** è intrinsecamente meno infiammabile e, in caso di rilascio accidentale, evapora rapidamente, riducendo la persistenza e il rischio di incendio[5].

Benché il gas naturale sia una miscela di gas leggeri principalmente costituita da **metano**, etano e propano, la sua composizione può variare leggermente purché rispetti i limiti imposti da opportuni standard. In Tabella 3 si può notare come, in funzione del luogo di estrazione, la composizione è **fortemente variabile**.

| Componente (% mole) | Nigeria | Arun | Brunei | Oman | Atlantic | Kenai |
|--------------------------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|--------------|
| Metano | 87.9 | 88.48 | 89.4 | 90 | 95 | 99.8 |
| Etano | 5.5 | 8.36 | 6.3 | 6.35 | 4.6 | 0.01 |
| Propano | 4 | 1.56 | 2.8 | 0.15 | 0.38 | 0 |
| Butano | 2.5 | 1.56 | 1.3 | 2.5 | 0 | 0 |
| Azoto | 0.1 | 0.04 | 0.2 | 1 | 0.02 | 0.1 |

Tabella 1. Composizione Gas Naturale per area geografica[6]

Il gas naturale consiste di una miscela di idrocarburi con netta prevalenza di metano fino anche al 99.8% (Kenai) con presenza di parti rilevanti di etano e rilevanti o meno di propano, butano ed azoto.

Dunque, possiamo interfacciare **le proprietà** di LNG a quelle del metano (Tabella x,y), data la sua netta prevalenza all'interno della miscela.

| Proprietà | Valore | Unità di misura |
|---|---------------|------------------------|
| Peso molecolare | 16.043 | kg/kmol |
| Temperatura critica | 190.6 | K |
| Pressione critica | 4.64E+06 | Pa |
| Temperatura di bolla a pressione atmosferica | 111.6 | K |
| Temperatura di congelamento | 91 | K |
| Densità del liquido al punto di bolla (Metano puro) | 422.6 | kg/m ³ |
| Densità del liquido al punto di bolla (LNG commerciale) | 450 | kg/m ³ |

| | | |
|--------------------------------------|------|-------------------|
| Densità del vapore al punto di bolla | 1.82 | kg/m ³ |
|--------------------------------------|------|-------------------|

Tabella 2. Proprietà del metano[7]

L'LNG è un liquido criogenico incolore, inodore e non corrosivo a pressione atmosferica. Con la giusta concentrazione di aria arriva facilmente a **combustione** e la sua combustione non produce ossidi di zolfo o ossidi di azoto e produce basse emissioni di carbonio. In funzione della composizione cambiano le proprietà **densità e temperatura di bolla** che si aggirano in media, rispettivamente, sui **450 kg/m³ e -160°C**.

L'LNG (ovvero al di sotto dei -160°C) è più pesante dell'aria ma, non appena messo in contatto con l'ambiente, successivamente al suo riscaldamento, il vapore si disperde nell'ambiente spingendo l'aria; quanto scritto porta a rischio di asfissia in caso di ambiente chiuso.

Un ulteriore rischio è rappresentato dalla **miscela LNG-aria** che si crea poiché il gas potrebbe arrivare a combustione.

Dunque, sono stati studiati i limiti di infiammabilità in volume d'aria. I limiti di infiammabilità si aggirano sul **5% (inferiore) e 15% (superiore)** quindi, l'obiettivo, è quello di oltrepassare il limite superiore affinché l'LNG non abbia sufficiente ossigeno per andare a combustione[8]. Questo è promosso dall'utilizzo di serbatoi di stoccaggio chiusi in cui la percentuale di componenti all'interno di tali serbatoi è di **100% LNG**.

L'LNG risponde a comportamenti di fase ed equilibri multifase termodinamici complessi derivanti dal fatto che il gas naturale (e quindi l'LNG) è formato da una miscela di idrocarburi multicomponente con gas inorganici.

Le nuove tecnologie sviluppate per la produzione, la liquefazione, il trasporto, la rigassificazione e la commercializzazione del gas naturale hanno dato un input innovativo al mercato mondiale del gas.

Il gas naturale, una volta estratto, subisce un trattamento per eliminare acqua, azoto, anidride carbonica ed altre impurità. Viene quindi pompato, attraverso gasdotti sotterranei o sottomarini, verso i terminali di liquefazione. Questi si trovano tradizionalmente in riva al mare, in prossimità di banchine per il trasporto via nave, ma sono già in produzione i primi impianti interamente **FLNG** galleggianti, ovvero

impianti galleggianti per la purificazione, il trattamento e lo stoccaggio di gas naturale liquefatto[9].

1.1.1. LIQUEFAZIONE, STOCCAGGIO E RIGASSIFICAZIONE

La **liquefazione** è il primo processo chiave: il gas viene progressivamente raffreddato fino a meno di $-161.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e subisce un cambiamento di stato fisico passando alla forma liquida. Questo permette di compattare in un solo metro cubo ben $620\text{-}630\text{ m}^3$ di gas naturale. Questo cambiamento di stato avviene in impianti di liquefazione che comprendono sezioni di preraffreddamento, estrazione e frazionamento di residui di componenti pesanti. Una volta liquefatto, il gas viene stoccato in grossi serbatoi dotati di un efficiente sistema di isolamento termico che permetta al gas immagazzinato di essere mantenuto al di sotto della sua temperatura di evaporazione per un tempo indefinito.

Lo **stoccaggio** è il processo di immagazzinamento del gas naturale in forma liquida, ad una temperatura che va da circa -160°C ad una atmosfera, a -110°C a 20 atmosfere. Riducendo il volume del gas diventa più semplice trasportarlo e, appunto, stoccarlo.

I serbatoi utilizzati sono isolati e mantengono il GNL al di sotto della sua temperatura di liquefazione. Possono avere dimensioni e capacità differenti a seconda delle diverse esigenze di stoccaggio. Risultano essere economicamente più vantaggiosi quelli criogenici sferici ed il più grandi possibile perché minimizzano la superficie di scambio termico rispetto al volume del serbatoio stesso.

Il GNL viene quindi pompato a bordo di speciali navi metaniere dotate di serbatoi e di impianti criogenici che permettono di mantenere il necessario isolamento termico per tutto il viaggio successivo.

Una volta che la nave metaniera è giunta a destinazione, il gas, sempre liquefatto, viene trasferito dalla nave ad un serbatoio di stoccaggio all'interno del **rigassificatore**, dove mantiene le medesime condizioni fisiche di trasporto.

Quest'ultimo, il secondo elemento chiave della tecnologia, è un impianto industriale che permette di riportare il prodotto dallo stato liquido utilizzato nel trasporto marittimo a quello gassoso utile per il trasporto terrestre ed il consumo finale.

All'interno del rigassificatore, il GNL viene inviato ad un vaporizzatore che aumentandone la temperatura provoca il cambiamento di stato inverso con l'espansione del gas, che torna al suo stato fisico naturale.

1.2.VEICOLI ELETTRICI

Il **veicolo elettrico (EV)** utilizza l'energia fornita dalle batterie a ioni di litio (*Li-Ion*) installate a bordo. Sebbene la popolarità degli EV sia in forte crescita (rappresentando il 17,8% delle autovetture immatricolate nel 2021, in notevole aumento rispetto al 10,7% del 2020), il loro contributo ambientale è significativo in termini di:

- **Riduzione delle Emissioni Locali:** Gli EV consentono una riduzione delle emissioni di CO₂ nell'intero ciclo di vita pari al **40-45%** rispetto alle analoghe versioni a benzina e tra il **22-40%** rispetto a quelle a diesel.
- **Inquinamento Acustico:** Sono marcatamente più silenziosi, contribuendo al miglioramento della qualità acustica dell'ambiente urbano[10].

Sebbene la fase di produzione e smaltimento degli EV e delle relative batterie sollevi problematiche ambientali, in una valutazione complessiva del ciclo di vita, i veicoli elettrici si dimostrano più ecologici rispetto ai veicoli a combustione interna alimentati a benzina o diesel.

Batterie agli ioni di Litio

L'accumulatore agli ioni di litio (*Lithium-Ion*, Li-Ion) è un tipo di batteria ricaricabile il cui funzionamento si basa sulla **riduzione e ossidazione reversibile degli ioni di litio** per l'immagazzinamento e il rilascio di energia elettrica. Sebbene

il concetto risalga agli anni '70, la prima versione commercialmente valida è stata introdotta nel 1991[11].

Le batterie Li-Ion sono costituite da un insieme di celle singole, internamente identiche e composte dai seguenti elementi fondamentali:

- **Elettrodo Positivo (Catodo):** Composto da un **ossido metallico di litio** (come LiCoO_2 o LiMn_2O_4), il quale può contenere quantità variabili di metalli di transizione come **nichel, manganese e cobalto** (NMC).
- **Elettrodo Negativo (Anodo):** È prevalentemente realizzato in **grafite**.
- **Elettrolita:** Al fine di consentire agli ioni di litio di muoversi come portatori di carica all'interno della cella, si impiega un elettrolita **anidro**. In esso, sali come l'**esafluorofosfato di litio** (LiPF_6) sono disciolti in un solvente aprotico, tipicamente il dietilcarbonato. Nelle **batterie ai polimeri di litio** (*Li-Po*), l'elettrolita liquido è sostituito da un polimero, come il polivinilidenefluoruro[12].
- **Separatore:** Costituito da fogli di polimero, ha la funzione cruciale di impedire cortocircuiti tra gli elettrodi. Il separatore è permeabile agli ioni di litio e deve essere in grado di assorbire grandi quantità di ioni stessi[11].

Le diverse varianti delle batterie Li-Ion derivano dalla specifica chimica del catodo impiegata, che rende possibile lo spostamento del litio ionizzato tra gli elettrodi. L'uso di differenti metalli di transizione ne influenza direttamente la **densità energetica**, la **tensione di cella**, la **sensibilità termica**, la capacità e la corrente di carica/scarica. Le categorie principali includono:

- **Batterie ai Polimeri di Litio (*Li-Po*):** Utilizzano una pellicola a base di polimeri con consistenza gelatinosa come elettrolita. Questa tecnica costruttiva consente di realizzare batterie estremamente sottili (spessore inferiore a 0,1mm) e di forme personalizzate. Offrono una densità energetica massima elevata (fino a 180Wh/kg), ma risultano più sensibili a stress meccanici, elettrici e termici.
- **Batterie al Litio-Ossido di Cobalto (LiCoO_2):** L'elettrodo positivo è composto da diossido di litio-cobalto, mentre l'anodo è in grafite. Queste

batterie sono note per essere suscettibili al **thermal runaway** in caso di sovraccarico.

- **Batterie al Litio Titanato (LTO):** In questo caso, l'anodo è realizzato in litio titanato anziché in grafite. Questo conferisce capacità di **ricarica estremamente rapida** e prestazioni eccellenti a basse temperature (fino a -40 °C). Il catodo è composto da litio-ossido di titanio.
- **Batterie al Litio-Ferro-Fosfato (LFP):** Ciascuna cella dispone di un catodo in litio-ferro-fosfato, spesso con elettrolita in formato solido. Le LFP presentano una densità energetica inferiore (massimo 110Wh/kg) e maggiore sensibilità ai danni meccanici. Tuttavia, il vantaggio fondamentale risiede nella loro **intrinseca resistenza al thermal runaway**. La curva di tensione di scarica di queste batterie può portare a un effetto memoria, sebbene sia molto meno pronunciato rispetto alle vecchie batterie al nichel-cadmio (NiCd)[11].

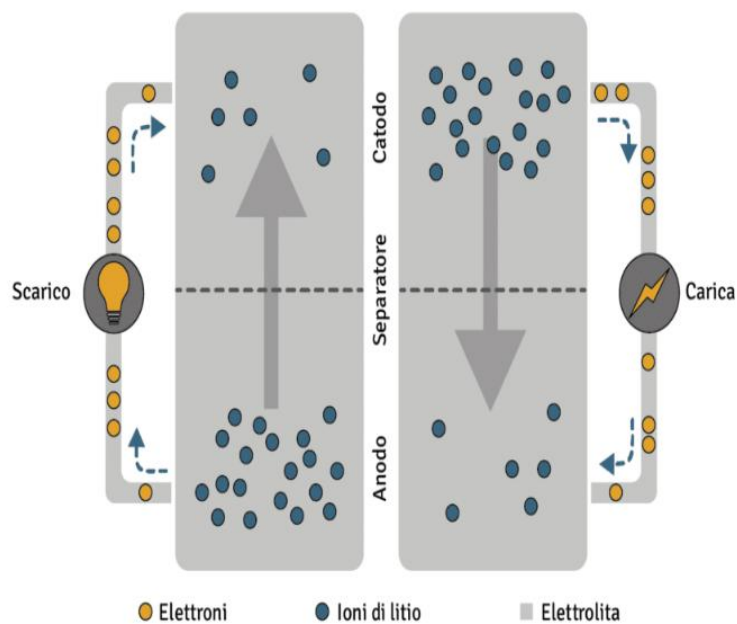


Figura 2. Funzionamento di una batteria a ioni di litio

Il funzionamento si basa sul movimento costante di ioni di litio (Figura 2) tra i due elettrodi, un flusso che bilancia il flusso di corrente esterno e mantiene la neutralità elettrica degli elettrodi:

- **Scarica:** Durante la scarica (quando la batteria alimenta un dispositivo), ogni atomo di litio all'anodo rilascia un elettrone nel circuito esterno, mentre

gli ioni di litio migrano attraverso l'elettrolita e il separatore dall'anodo al catodo. Al catodo, gli ioni di litio sono inglobati (intercalati) e gli elettroni rientrano nel circuito interno, grazie alla presenza degli ioni in metallo di transizione che accettano elettroni e cambiano il loro stato di ossidazione. (Gli ioni in metallo di transizione, a differenza degli ioni di litio, non sono mobili).

- **Ricarica:** Durante la ricarica, la corrente esterna spinge gli elettroni verso l'anodo. Contemporaneamente, gli ioni di litio disintercalano dal catodo e si muovono attraverso il separatore verso l'anodo, dove vengono **immagazzinati** tra gli strati di grafite. Questo processo è noto come **intercalazione**. La fase di ricarica avviene solitamente a corrente costante fino al raggiungimento della tensione nominale desiderata, momento in cui la tensione viene mantenuta costante e il flusso di corrente diminuisce progressivamente[13].

SICUREZZA

Il crescente impiego di queste fonti energetiche alternative rende fondamentale lo studio della loro sicurezza operativa, in particolare nell'ambito della **prevenzione incendi**, che è cruciale per la salvaguardia dell'incolumità delle persone, dei beni e dell'ambiente.

- **Rischio LNG:** Il LNG è in grado di generare vapori infiammabili che, in caso di rilascio, possono portare a scenari incidentali indesiderati come *pool fire* o *jet fire*.
- **Rischio Batterie Li-Ion:** Le batterie a ioni di litio, in caso di avaria (meccanica, termica o elettrica), possono innescare reazioni chimiche interne. Questo può portare all'incendio della singola cella e alla successiva propagazione termica all'intero pacco batteria, sfociando nel fenomeno esotermico incontrollabile noto come **Thermal Runaway**.

1.3.Obiettivi della tesi

L'obiettivo primario di questa tesi è condurre un'analisi approfondita degli scenari d'incendio innescati da due differenti fonti energetiche alternative in ambito veicolare: un **incendio causato dal *thermal runaway* di una batteria agli ioni di litio** e un **incendio generato dall'innescò di una pozza di LNG (*Liquefied Natural Gas*)**.

Il contesto di studio è rappresentato da una situazione realistica, ovvero un'ampia autorimessa, all'interno della quale l'avaria o il malfunzionamento di un veicolo parcheggiato può potenzialmente evolvere in un incendio.

Per caratterizzare le criticità derivanti dall'impiego di queste fonti di energia nel trasporto convenzionale, lo studio verrà condotto attraverso la **modellazione numerica**. Verranno impiegati il codice **FDS (*Fire Dynamics Simulator*)** e la sua interfaccia grafica **PyroSim**, affiancati da un'analisi critica della letteratura tecnica esistente.

Gli scopi specifici della modellazione si articolano come segue:

1. **Analisi della Propagazione Termica:** La ricerca si focalizzerà sulla quantificazione della propagazione termica, in particolare il **calore emesso per irraggiamento**, e la sua incidenza sulle strutture adiacenti (travi, pilastri, veicoli vicini).
2. **Caratterizzazione dei Prodotti di Combustione:** Verrà analizzata la natura e la distribuzione dei fumi e dei gas di combustione rilasciati. Ciò include la quantificazione di particolato e di gas specifici (tossici, irritanti, ecc.), che rappresentano il rischio primario per l'incolumità umana.
3. **Valutazione del Rischio e Soluzioni di Mitigazione:** Sulla base della normativa antincendio italiana vigente (Codice di Prevenzione Incendi), l'analisi mirerà a individuare i **parametri soglia** critici relativi alle emissioni e al flusso di calore. Tali risultati saranno utilizzati per definire e suggerire **possibili soluzioni e accorgimenti** di progettazione antincendio e di gestione della sicurezza.

2. METODOLOGIA

2.1. Fenomenologia degli incendi

Per **incendio** si intende una **reazione di combustione incontrollata** o indesiderata. Affinché la combustione possa autosostenersi e manifestarsi come fiamma, sono necessari tre elementi chiave: il **combustibile** (la sostanza infiammabile), l'**ossidante** (generalmente l'ossigeno atmosferico) e una fonte di **innesco** (energia termica). Questa relazione è nota come **triangolo del fuoco**[14] (Fig. 3).

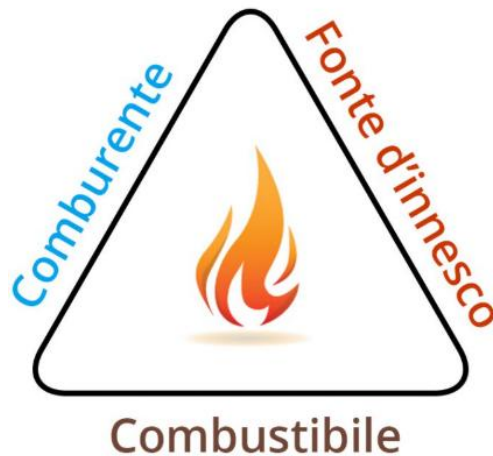


Figura 3. Triangolo del fuoco

Nota di precisione: Le fiamme o le reazioni in cui manca l'ossidante (combustione autogena o decomposizione) o l'innesco (autoaccensione) sono da considerarsi **eccezioni** o casi specifici che esulano dalla definizione classica ma che sono rilevanti in contesti ingegneristici avanzati come quello dei componenti ad alta energia.

CLASSIFICAZIONE

Gli incendi vengono convenzionalmente classificati in base alla natura chimica e allo stato fisico del combustibile secondo la normativa di riferimento (Fig. 4) (ad esempio, UNI EN 2 o EN 3-7):

- **Classe A:** Materiali solidi (esclusi i metalli), come legno, carta, tessuti.

- **Classe B:** Liquidi infiammabili o solidi che liquefano per effetto del calore (es. benzina, oli, cere).
- **Classe C:** Gas infiammabili (es. metano, propano, idrogeno, GNL).
- **Classe D:** Metalli combustibili (es. potassio, sodio, magnesio).
- **Classe E/F:** La classe E, che un tempo includeva le apparecchiature sotto tensione, è **obsoleta** secondo gli standard moderni e sostituita, in alcune normative, dalla **Classe F** per oli e grassi da cottura (rilevante nel settore domestico/commerciale). Nello specifico contesto di veicoli elettrici o apparecchiature industriali, il rischio elettrico viene gestito come una potenziale fonte di innesco per incendi di Classe A o B[14].







| | | | |
|---|---|---|--|
|  | classe A - incendi che interessano solidi, in genere di natura organica |  | classe D - incendi che interessano metalli |
|  | classe B - incendi che interessano liquidi |  | L'elettricità è sorgente di innesco e può alimentare l'incendio finché non è rimossa. Non costituisce una classe a sé. |
|  | classe C - incendi che interessano gas |  | classe F - incendi che interessano ingredienti per cucinare come oli e grassi animali o vegetali |

Figura 4. Classificazione degli incendi

PROPRIETA' LEGATE ALL'INFIAMMABILITA' DI UNA SOSTANZA

La pericolosità di una sostanza combustibile è definita da diverse proprietà termodinamiche e cinetiche:

- **Temperatura di *Flash Point*:** La **minima temperatura** alla quale un liquido rilascia vapori in quantità sufficiente affinché, in presenza di un innesco, si generi una **breve e transitoria fiamma** sulla superficie del liquido[14].

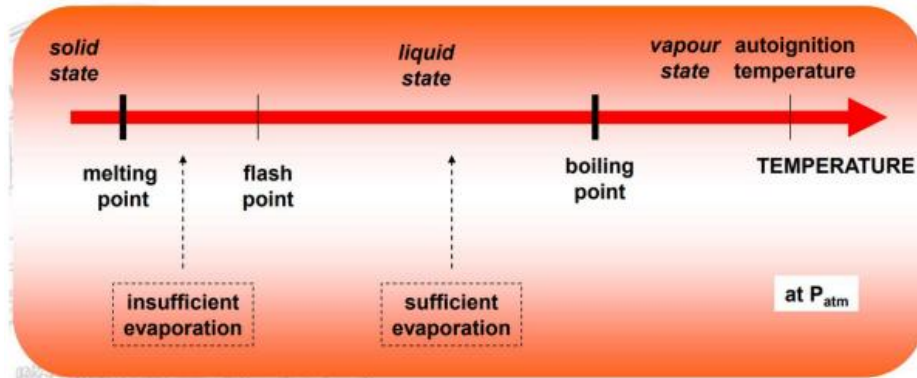


Figura 5. Individuazione qualitativa della temperatura di flash point

- **Temperatura di Auto-Ignizione (o Auto-Innesco):** La **minima temperatura** richiesta affinché una miscela combustibile/ossidante (generalmente in aria) inizi a bruciare **autonomamente**, senza la necessità di un innesco esterno.
- **Campo di Infiammabilità (o di Esplosività):** Intervallo di concentrazione del combustibile in un ossidante (espresso tipicamente in volume percentuale) all'interno del quale la miscela è in grado di propagare una fiamma in presenza di innesco.
- **Limiti di Infiammabilità:** È delimitato dal **Limite Inferiore di Infiammabilità/Esplosività** (LFL o LEL) e dal **Limite Superiore di Infiammabilità/Esplosività** (UFL o UEL). Il LFL rappresenta la minima concentrazione di combustibile, mentre l'UFL la massima, per cui la miscela aria/combustibile è infiammabile.
- **Energia Minima di Innesco (MEI):** Il **minimo quantitativo di energia** (tipicamente misurato in mJ) necessario per innescare la combustione di una miscela infiammabile/aria, a specifiche condizioni di composizione, pressione e temperatura. Per molti gas, la MEI è estremamente bassa[14].

PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE

I prodotti della combustione comprendono **fiamme, fumi e gas**.

- **Fiamme:** Sono il risultato visibile di reazioni chimiche **altamente esotermiche** tra combustibile e comburente. Generano **calore intenso** e raggiungono temperature elevate.

- **Trasferimento di Calore:** L'energia termica sviluppata da un incendio si propaga attraverso tre meccanismi: **conduzione**, **convezione** e **irraggiamento**.
 - La **convezione** veicola gran parte (circa i 2/3) della potenza termica rilasciata verso l'alto tramite i gas caldi.
 - L'**irraggiamento** (la restante porzione, circa 1/3) è il meccanismo primario di trasferimento di calore a distanza e rappresenta il **rischio termico** principale per i bersagli non a contatto diretto con le fiamme[14].
- **Fumi e Gas di Combustione:** I **fumi** sono particelle solide e liquide sospese. **Riducono drasticamente la visibilità**, ostacolando l'esodo e aumentando il panico, e possono contribuire all'aumento del consumo di ossigeno. I **gas aggregati** (es. CO, CO₂, NO_x) sono prodotti della reazione chimica e possono essere **letali** anche a concentrazioni relativamente basse a causa della loro tossicità.

È cruciale che l'analisi ingegneristica si basi su un **riferimento tecnico normativo** solido per la gestione del rischio incendio.

2.2. Codice di prevenzione incendi

La prevenzione incendi è definita come l'insieme delle misure volte a garantire la salvaguardia dell'incolumità delle persone, la tutela dei beni e la protezione dell'ambiente dai danni derivanti dal fuoco. La normativa (Fig. 6 e 7) stabilisce criteri precisi e vincolanti nell'interesse della collettività[15].



Testo coordinato dell'allegato I del DM 3 agosto 2015 Codice di prevenzione incendi

Testo coordinato con le modifiche introdotte dalle seguenti disposizioni normative:

- DM 8/6/2016: nuovo capitolo V.4 "Uffici".
- DM 9/8/2016: nuovo capitolo V.5 "Attività ricettive turistico - alberghiere".
- DM 21/2/2017: nuovo capitolo V.6 "Attività di autorimessa".
- DM 7/8/2017: nuovo capitolo V.7 "Attività scolastiche".
- DM 23/11/2018: nuovo capitolo V.8 "Attività commerciali".
- DM 18/10/2019: aggiornamento di tutti i capitoli ad esclusione di V.4-V.8.
- DM 14/02/2020: aggiornamento dei capitoli V.4, V.5, V.6, V.7, V.8.
- DM 06/04/2020: nuovo capitolo V.9 "Asili nido" (in vigore dal 29/04/2020), correzione refusi nei paragrafi V.4.2, V.7.2 e tabella V.5-2.
- DM 15/05/2020: aggiornamento capitolo V.6 "Attività di autorimessa" (in vigore dal 19/11/2020).
- DM 10/07/2020: nuovo capitolo V.10 "Musei, gallerie, esposizioni, mostre, biblioteche e archivi in edifici tutelati" (in vigore dal 21/08/2020).
- DM 29/03/2021: nuovo capitolo V.11 "Strutture sanitarie" (in vigore dal 9/05/2021).
- DM 14/10/2021: nuovo capitolo V.12 "Altre attività in edifici tutelati" (in vigore dal 25/11/2021).
- DM 24/11/2021: errata corrige e integrazione per locali molto affollati (in vigore dal 1/01/2022).
- DM 30/03/2022: nuovo capitolo V.13 "Chiusure d'ambito degli edifici civili" (in vigore dal 7/7/2022).
- DM 19/05/2022: nuovo capitolo V.14 "Edifici di civile abitazione" (in vigore dal 29/6/2022).
- DM 14/10/2022: aggiornamento tabelle capitolo S.1 (in vigore dal 27/10/2022).
- DM 22/11/2022: nuovo capitolo V.15 "Attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico" (in vigore dal 1/01/2023).

Figura 6. DM 03 agosto 2015: Codice di prevenzione Incendi

Struttura del documento

| |
|---|
| Sezione G Generalità |
| Capitolo G.1 Termini, definizioni e simboli grafici |
| Capitolo G.2 Progettazione per la sicurezza antincendio |
| Capitolo G.3 Determinazione dei profili di rischio delle attività |
| Sezione S Strategia antincendio |
| Capitolo S.1 Reazione al fuoco |
| Capitolo S.2 Resistenza al fuoco |
| Capitolo S.3 Compartimentazione |
| Capitolo S.4 Esodo |
| Capitolo S.5 Gestione della sicurezza antincendio |
| Capitolo S.6 Controllo dell'incendio |
| Capitolo S.7 Rivelazione ed allarme |
| Capitolo S.8 Controllo di fumi e calore |
| Capitolo S.9 Operatività antincendio |
| Capitolo S.10 Sicurezza degli impianti tecnologici e di servizio |
| Sezione V Regole tecniche verticali |
| Capitolo V.1 Aree a rischio specifico |
| Capitolo V.2 Aree a rischio per atmosfere esplosive |
| Capitolo V.3 Vani degli ascensori |
| Capitolo V.4 Uffici |
| Capitolo V.5 Attività ricettive turistico-alberghiere |
| Capitolo V.6 Autorimesse |
| Capitolo V.7 Attività scolastiche |
| Capitolo V.8 Attività commerciali |
| Capitolo V.9 Asili nido |
| Capitolo V.10 Musei, gallerie, esposizioni, mostre, biblioteche e archivi in edifici tutelati |
| Capitolo V.11 Strutture sanitarie |
| Capitolo V.12 Altre attività in edifici tutelati |
| Capitolo V.13 Chiusure d'ambito degli edifici civili |
| Capitolo V.14 Edifici di civile abitazione |
| Capitolo V.15 Attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico |
| Sezione M Metodi |
| Capitolo M.1 Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio |
| Capitolo M.2 Scenari di incendio per la progettazione prestazionale |
| Capitolo M.3 Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale |

Figura 7. Struttura del Codice di Prevenzione Incendi

Nell'ambito della **progettazione antincendio** in Italia, il riferimento normativo fondamentale è il Codice di Prevenzione Incendi, costituito dal Testo coordinato dell'Allegato I del Decreto Ministeriale 3 agosto 2015 e sue successive modifiche. Il documento si articola in quattro sezioni principali, volte a disciplinare l'applicazione delle norme tecniche di prevenzione incendi:

- **Sezione G – Generalità:** Contiene i principi base della progettazione antincendio, definizioni, ipotesi, simboli grafici e metodologie. Definisce la prevenzione incendi come funzione di interesse pubblico volta a garantire la sicurezza della vita umana, la protezione di beni e ambiente, e la prevenzione dell'insorgere di incendi.
- **Sezione S – Strategia Antincendio:** Descrive le **Regole Tecniche Orizzontali (RTO)**, ovvero le misure antincendio di prevenzione, protezione e gestionali applicabili in modo trasversale a tutte le attività per mitigare il rischio d'incendio.
- **Sezione V – Regole Tecniche Verticali (RTV):** Fornisce prescrizioni specifiche che integrano, completano o sostituiscono le misure della Sezione S per particolari tipologie d'attività o specifiche applicazioni tecniche.
- **Sezione M – Metodi:** Contiene la descrizione delle metodologie progettuali, in particolare quelle quantitative, per la verifica e la progettazione delle misure antincendio.

Una delle innovazioni più significative introdotte dal Codice è la possibilità di adottare un **approccio prestazionale** in alternativa all'approccio **prescrittivo** tradizionale. Questo metodo conferisce al progettista la flessibilità di sviluppare soluzioni personalizzate, purché sia dimostrato il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza stabiliti.

Le sue caratteristiche distintive includono:

- **Soluzioni Conformi e Alternative:** Il progettista può scegliere soluzioni standard (conformi) o proporre soluzioni alternative, dimostrando che quest'ultime garantiscano un livello di sicurezza equivalente[16].

- **Uso della *Fire Safety Engineering* (FSE):** Impiego di tecniche avanzate di modellazione e simulazione per valutare quantitativamente l'efficacia delle soluzioni adottate[16].
- **Parametri di Valutazione:** La progettazione considera elementi specifici del contesto, come la tipologia degli occupanti (es. stato di veglia/sonno) e la velocità di propagazione dell'incendio.

La metodologia generale, applicabile a tutte le attività, prevede che la progettazione antincendio sia un processo **iterativo** (come in figura 8).



Figura 8. Progettazione Antincendio: Metodologia Generale

Tra i concetti chiave si annoverano:

- **Valutazione del Rischio Incendio:** Individuazione dei pericoli, analisi del contesto, tipologia e quantità degli occupanti, beni esposti e determinazione delle conseguenze, con identificazione delle misure preventive.
- **Determinazione dei Profili di Rischio:** Classificazione del rischio per la vita umana (R_{vita}), per i beni (R_{beni}) e per l'ambiente ($R_{ambiente}$).
- **Livelli di Prestazione:** Ogni misura antincendio è classificata in livelli graduati (I, II, III, ...) in funzione della complessità e dell'efficacia[16].

Nella sezione S invece si entra nel merito di ciò che è stato descritto prima attraverso i criteri di attribuzione del livello di prestazione, resistenza al fuoco dei materiali, soluzioni progettuali (conformi, alternative), calcolo del carico di incendio, compartimentazione, esodo ed altre, come riassunte in tabella 1.

| Codice | Strategia | Obiettivo |
|--------|--------------------------------------|--|
| S.1 | Relazione al fuoco | Limitare la propagazione iniziale |
| S.2 | Resistenza al fuoco | Stabilità strutturale in caso di incendio |
| S.3 | Compartimentazione | Limitare la propagazione tra le diverse aree |
| S.4 | Esodo | Garantire delle vie di fuga sicure |
| S.5 | Gestione della sicurezza antincendio | Organizzazione, formazione ed emergenze |
| S.6 | Controllo dei fumi e del calore | Favorire la visibilità e il raffreddamento |
| S.7 | Operatività antincendio | Facilitare l'intervento dei soccorritori |
| S.8 | Sicurezza impianti tecnologici | Prevenzione incendi da impianti |
| S.9 | Controllo dell'incendio | Sistemi automatici |
| S.10 | Rilevazione e allarme | Attivazione tempestiva dei soccorritori |

Tabella 3. Sezione S del Codice di Prevenzione Incendi

2.2.1. Approccio ingegneristico – FSE

L'approccio prestazionale (detto anche approccio ingegneristico) introdotto dal Codice di Prevenzione Incendi ha favorito l'adozione della **Fire Safety Engineering (FSE)**. La FSE rappresenta l'insieme di metodologie basate sull'approccio ingegneristico che consentono lo studio quantitativo dell'evoluzione di un incendio, della movimentazione dei suoi prodotti e dei relativi effetti sui bersagli.

L'uso della FSE è esteso, oltre che per le richieste di deroga, alla **dimostrazione** che le soluzioni alternative proposte raggiungano i livelli di prestazione richiesti dal Codice[16].

Le normative di riferimento sono, in contesto italiano, il **DM 09/05/2007** e, nel Codice, i capitoli della Sezione M (Metodi):

- **M.1:** Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio.

- **M.2:** Scenari di incendio per la progettazione prestazionale.
- **M.3:** Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale.

Secondo il paragrafo G.2.7 del Codice (Metodi di progettazione della sicurezza antincendio), l'approccio ingegneristico può essere utilizzato per la verifica delle soluzioni alternative al fine di dimostrare il raggiungimento del collegato livello di prestazione (paragrafo G.2.6.5.2) oppure per la verifica del livello di prestazione attribuito alle misure antincendio al fine di dimostrare il raggiungimento dei pertinenti obiettivi di sicurezza antincendio (paragrafo G.2.6.4). La FSE può essere applicata secondo (Tabella G.2-1) procedure, ipotesi e limiti indicati nei capitoli M.1, M.2 e M.3 oppure secondo principi tecnico-scientifici riconosciuti a livello nazionale e internazionale.

Si riportano di seguito alcune delle definizioni del capitolo G.2 del Codice:

- **Scenario d'incendio:** descrizione completa ed univoca dell'evoluzione dell'incendio in relazione ai suoi tre aspetti fondamentali: focolare, attività ed occupanti.
- **Scenario d'incendio di progetto:** specifico scenario d'incendio in relazione al quale viene condotta l'applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio.
- **ASET (available safe escape time):** intervallo di tempo calcolato tra l'innesco dell'incendio ed il momento in cui le condizioni ambientali nell'attività a diventano tali da rendere gli occupanti incapaci di porsi in salvo raggiungendo o permanendo in un luogo sicuro.
- **RSET (required safe escape time):** intervallo di tempo calcolato tra l'innesco dell'incendio ed il momento in cui gli occupanti dell'attività raggiungono un luogo sicuro e $RSET < ASET$.
- **PTAT (pre-travel activity time):** tempo impiegato dagli occupanti per attività svolte prima di avviare il movimento d'esodo.

METODI
**Capitolo M.1 Metodologia per l'ingegneria
della sicurezza antincendio**

Premessa
Fasi della metodologia
Prima fase: analisi preliminare
Definizione del progetto
Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio
Definizione delle soglie di prestazione
Individuazione degli scenari di incendio di progetto
Seconda fase: analisi quantitativa
Elaborazione delle soluzioni progettuali
Valutazione delle soluzioni progettuali
Selezione delle soluzioni progettuali idonee
Documentazione di progetto
Sommaro tecnico
Relazione tecnica
Requisiti aggiuntivi per la gestione della sicurezza antincendio
Criteri di scelta e d'uso dei modelli e dei codici di calcolo
Riferimenti

Figura 9. Capitolo M.1: Metodologia per l'ingegneria della sicurezza antincendio

Il capitolo M1 della RTO (Fig. 9) stabilisce che il progettista definisce lo scopo della progettazione; quindi, specifica gli obiettivi di sicurezza antincendio che intende garantire e li traduce in soglie di prestazione quantitative. Successivamente identifica gli scenari d'incendio di progetto, i più gravosi eventi che possono ragionevolmente verificarsi nell'attività.

Dopodiché, grazie a strumenti di modellazione, descrive o calcola gli effetti degli scenari d'incendio di progetto in relazione alla soluzione progettuale ipotizzata per l'attività. Se gli effetti così calcolati conservano un adeguato margine di sicurezza rispetto alle soglie di prestazione precedentemente stabilite, allora la soluzione progettuale analizzata è considerata accettabile. Allo stato attuale i modelli più frequentemente utilizzati sono:

- **Modelli analitici** (ad esempio, le correlazioni per i modelli di incendio localizzati o fire plumes di Zukoski, Heskestad, McCaffrey, Thomas, Hasemi e Nishiata, Alpert;
- **Modelli numerici** tra cui: modelli di simulazione dell'incendio a zone per ambienti confinati, modelli di simulazione dell'incendio di campo, modelli di simulazione dell'esodo, modelli di analisi termostrutturale.

La progettazione FSE si compone di due fasi: l'analisi preliminare e l'analisi quantitativa.

- 1) **Analisi preliminare:** La fase di analisi preliminare si compone delle seguenti **sotto-fasi** necessarie per definire i rischi da contrastare e, di conseguenza, i criteri oggettivi di quantificazione degli stessi necessari per la successiva analisi numerica.
 - a) Definizione del progetto
 - b) Identificazione degli obiettivi di sicurezza antincendio
 - c) Definizione delle soglie di prestazione
 - d) Individuazione degli scenari di incendio di progetto
- 2) **Analisi quantitativa:**
 - a) Elaborazione delle soluzioni progettuali
 - b) Valutazione delle soluzioni progettuali
 - c) Selezione delle soluzioni progettuali idonee

Per ogni fase andrà prodotta la **documentazione opportuna**.

Con l'applicazione della **metodologia prestazionale** il professionista antincendio basa l'individuazione delle misure di prevenzione e protezione di progetto su **specifiche ipotesi e limitazioni d'esercizio**: devono pertanto essere previste specifiche misure di gestione della sicurezza antincendio (capitolo S.5) affinché non possa verificarsi la riduzione del livello di sicurezza assicurato inizialmente.

Le specifiche misure gestionali devono riguardare gli aspetti trattati nella FSE che rappresentano i parametri di input della progettazione.

Devono pertanto riferirsi alle specifiche soluzioni progettuali, alle misure antincendio di prevenzione e protezione adottate e al **mantenimento delle condizioni di esercizio**[16].

Nel loro campo di applicazione, i modelli analitici garantiscono stime accurate di effetti specifici dell'incendio (es. il calcolo del tempo di flashover in un locale).

Per analisi più complesse che coinvolgano interazioni dipendenti dal tempo di più processi di tipo fisico e chimico presenti nello sviluppo di un incendio **si ricorre generalmente ai modelli numerici**.

Per i parametri di input del modello più rilevanti deve essere svolta analisi di sensibilità dei risultati alla variazione del parametro di input. Ad esempio, i risultati

dell'analisi non devono essere significativamente dipendenti dalle dimensioni della griglia di calcolo.

È ammesso l'utilizzo contemporaneo di più tipologie di modelli[16]. Ad esempio, si possono usare modelli specifici per la valutazione del tempo di attivazione di un impianto di rivelazione o di spegnimento e della rottura di un vetro in funzione della temperatura, per poi inserire i dati ricavati in una modellazione effettuata con modelli di campo; si può utilizzare un modello a zone per valutare in una prima fase le condizioni di maggiore criticità del fenomeno, per poi approfondire la trattazione degli effetti con modelli di campo.

METODI
Capitolo M.2 Scenari di incendio
per la progettazione prestazionale

Premessa
Identificazione dei possibili scenari d'incendio
Selezione degli scenari d'incendio di progetto
Descrizione quantitativa degli scenari d'incendio di progetto
Attività
Occupanti
Incendio
Durata degli scenari d'incendio di progetto
Stima della curva RHR
Fase di propagazione dell'incendio
Effetto dei sistemi di protezione attiva antincendio
Fase dell'incendio stazionario
Fase di decadimento
Altre indicazioni
Focolare predefinito
Riferimenti

Figura 10. Capitolo M.2: Scenari di incendio per la progettazione prestazionale

Il capitolo M2 della RTO (scenari di incendio) (Fig. 10) descrive la procedura di identificazione, selezione e quantificazione degli scenari di incendio di progetto che sono **impiegati nell'analisi quantitativa**.

La procedura di **identificazione, selezione e quantificazione degli scenari di incendio** deve essere documentata secondo le indicazioni del Codice di Prevenzione Incendi ed in particolare, a seconda dell'obiettivo dell'analisi, la descrizione dell'incendio consiste nella caratterizzazione quantitativa del focolare, in quanto sorgente di energia termica e di prodotti della combustione, inoltre, deve essere descritta tutta la sequenza di evoluzione dell'incendio.

Per fare ciò occorre avere **una stima della curva RHR**.

La **curva RHR (Rate of Heat Release)** (Fig. 11), anche detta curva **HRR (Heat Release Rate)**, restituisce la potenza termica rilasciata dall'incendio ed è espressa in multipli del Watt (genericamente **kW o MW**).

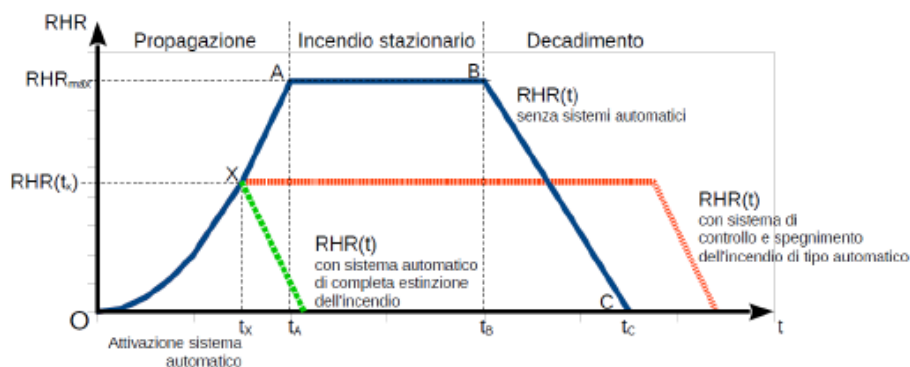


Figura 11. Andamento qualitativo della curva RHR (t)

L'area sottesa alla curva corrisponde all'energia totale rilasciata durante l'incendio dalla propagazione al decadimento.

L'energia di propagazione (area sottesa al primo tratto parabolico) e l'energia di incendio stazionario (area sottesa al tratto a potenza costante) costituiscono il 70% dell'energia totale. L'energia di decadimento (area sottesa all'ultimo tratto) costituisce il 30% dell'energia totale.

La presenza di **sistemi di controllo** dell'incendio di tipo automatico modifica l'andamento della potenza termica rilasciata, comportando il non raggiungimento del valore massimo. Risulta importante definire il **tempo t_x di attivazione dell'impianto**, sia esso a completa estinzione o di controllo e spegnimento.

Un sistema automatico a deplezione di ossigeno, ad oggi, non può essere considerato per la modifica dell'andamento della curva RHR(t).

La funzione del sistema è quella di **sottrarre il comburente**, e rappresenta più un **sistema di protezione passiva**, mantenendo un basso tenore di ossigeno nell'ambiente, pur consentendo l'ingresso di personale formato secondo precise misure gestionali relative alla sicurezza del lavoratore.

L'intervento manuale effettuato dalle squadre antincendio non può essere considerato in fase progettuale ai fini della modifica dell'andamento della curva RHR(t).

Il valore massimo della curva dipende dalla tipologia dell'incendio, ossia se l'incendio è **controllato dal combustibile** (all'aperto, ambienti con elevata ventilazione) oppure **controllato dalla ventilazione**, cioè dal comburente (edifici con ventilazione ordinaria).

Se l'incendio è controllato dal combustibile, la potenza termica massima rilasciata dipende dal valore massimo effettivamente disponibile dalla totalità del combustibile presente.

Se l'incendio risulta limitato dal valore della superficie di ventilazione, il valore massimo di RHR deve essere ridotto in conseguenza alla quantità di comburente disponibile.

Durante la fase di propagazione, la potenza termica rilasciata dall'incendio varia con andamento parabolico e può essere rappresentata dall'equazione:

$$RHR(t) = 1000 \left(\frac{t}{t\alpha} \right)^2 \text{ per } t < t\alpha \quad \text{Eq. 1}$$

Il tempo $t\alpha$ è il tempo necessario affinché la potenza termica rilasciata raggiunga il valore di 1000 kW, che definisce la velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio, parametro necessario per la valutazione del valore di $\delta\alpha$ associato alla determinazione del profilo di rischio vita.

Se nell'attività sono previsti sistemi di controllo dell'incendio di tipo automatico, come ad esempio un impianto sprinkler, l'andamento della curva non raggiunge il valore massimo. Il valore al tempo t_x , istante di entrata in funzione dell'impianto, viene assunto costante per tutta la durata di alimentazione prevista, tempo entro cui si presume che l'incendio venga definitivamente estinto con intervento manuale.

Se nell'attività sono invece previsti sistemi di estinzione completa il loro effetto è da valutarsi caso per caso in relazione alla loro efficacia ed affidabilità.

Nella maggioranza dei casi l'energia termica è sufficiente a produrre la **condizione di flashover** e si ipotizza che la curva continui a crescere con andamento parabolico fino al **tempo t_A** .

In assenza di impianti di controllo o di estinzione automatica, la potenza termica si stabilizza al **valore RHR_{max}** dal tempo t_A al tempo t_B .

La fase di incendio stazionario è quindi così descritta:

$$RHR(t) = RHR_{max} \text{ per } t_A \leq t < t_B \quad \text{Eq. 2}$$

Noto il valore RHR_{max} , il tempo t_A di inizio della fase di incendio stazionario

si calcola con la seguente:

$$RHRmax = \sqrt{RHRmax \frac{t\alpha^2}{1000}} \quad \text{Eq. 3}$$

L'energia rilasciata corrisponde all'area sottesa alla curva. **Per valutare l'energia rilasciata in fase di propagazione dell'incendio**, si deve calcolare l'integrale definito dall'istante 0 al tempo tA della funzione in foto sopra che descrive questa fase.

$$Q_{propagazione} = \frac{1}{3} * \left(\frac{1000}{t\alpha^2} \right) * tA^3 \quad \text{Eq. 4}$$

Durante la fase di decadimento, l'andamento della potenza prodotta è lineare con equazione:

$$RHR(t) = RHRmax \frac{tC - t}{tC - tB} \text{ per } tB \leq t < tC \quad \text{Eq. 5}$$

Il tempo tC, trascorso il quale la potenza termica rilasciata dall'incendio si annulla, viene calcolato considerando che nella fase di decadimento è consumato il restante 30% dell'energia termica inizialmente disponibile[16].

METODI
**Capitolo M.3 Salvaguardia della vita
con la progettazione prestazionale**

Premessa

Progettazione prestazionale per la salvaguardia della vita
 Criterio ideale
 Criterio di $ASET > RSET$

Calcolo di ASET
 Metodo di calcolo avanzato per ASET
 Metodo di calcolo semplificato per ASET
 Campo di applicabilità del metodo semplificato

Calcolo di RSET
 Tempo di rivelazione
 Tempo di allarme generale
 Tempo di attività pre-movimento
 Tempo di movimento

Soglie di prestazione per la salvaguardia della vita

Riferimenti

Figura 12. Capitolo M.3: Salvaguardia della vita con la progettazione prestazionale

Il capitolo M3 della RTO (salvaguardia della vita), in Figura 12, parla dell'obiettivo principale ovvero il raggiungimento o la permanenza in un luogo sicuro senza che ciò sia impedito da un'eccessiva esposizione agli effetti dell'incendio.

Il criterio ideale prevede che gli occupanti raggiungano un luogo sicuro senza mai incontrare gli effetti dell'incendio. Esistono situazioni ove tale criterio non è applicabile, in particolare per gli occupanti che si trovano nel compartimento di primo innesco dell'incendio.

Il **criterio $RSET < ASET$** prevede, invece, che gli occupanti raggiungano un luogo sicuro in sicurezza eventualmente venendo in contatto con gli effetti dell'incendio ma in quantità non incapacitanti.

Il tempo disponibile per l'esodo (ASET) dipende dalle interazioni nel sistema incendio-edificio-occupanti.

L'ASET globale, come stabilito dalla norma ISO 13571, è il minore tra gli ASET calcolati secondo quattro modelli diversi.

- **Modello gas tossici:** impiega il concetto di **dose inalata (exposure dose) e di FED (fractional effective dose)**. La exposure dose è definita come la misura della dose di un gas tossico disponibile per inalazione, cioè presente nell'aria inspirata, calcolata per integrazione della curva concentrazione-tempo della sostanza per il tempo di esposizione. La FED è il rapporto tra

la exposure dose e la dose del gas tossico che determina effetti incapacitanti sul soggetto medio esposto. Quando **FED = 1** si considera incapacitato il soggetto medio.

- **Modello gas irritanti:** impiega il concetto di **FEC, fractional effective concentration**, definita come il rapporto tra la concentrazione di un gas irritante disponibile per inalazione e la concentrazione dello stesso gas che determina effetti incapacitanti sul soggetto medio esposto.
- **Modello calore:** per il modello del calore irraggiato e convettivo la norma propone un approccio, basato sulla FED, simile a quello di gas tossici:

$$XFED = \sum_{t1}^{t2} \left(\frac{1}{t_{rad}} + \frac{1}{t_{conv}} \right) \Delta t \quad \text{Eq. 6}$$

- **Modello visibilità:** L'ISO/TR 16738 prevede la possibilità di utilizzare l'**ipotesi semplificativa** dell'esposizione zero impiegando le seguenti soglie di prestazione, molto conservative: altezza minima dei fumi stratificati dal piano di calpestio pari a **2 m**, al di sotto del quale permanga lo strato d'aria indisturbata; temperatura media dello strato di fumi caldi $\leq 200^{\circ}\text{C}$. Questi criteri permettono agli occupanti la fuga in aria indisturbata, non inquinata dai prodotti della combustione, ed un valore dell'irraggiamento dai fumi cui sono esposti inferiore a **2,5 kW/m²**.

Per quanto riguarda l'**RSET (Fig. 13)**, è calcolato tra l'innesco dell'incendio ed il momento in cui gli occupanti dell'edificio raggiungono un luogo sicuro. Anche RSET dipende dalle interazioni del sistema: la fuga degli occupanti è fortemente condizionata dalle geometrie dell'edificio ed è rallentata dagli effetti dell'incendio[16].

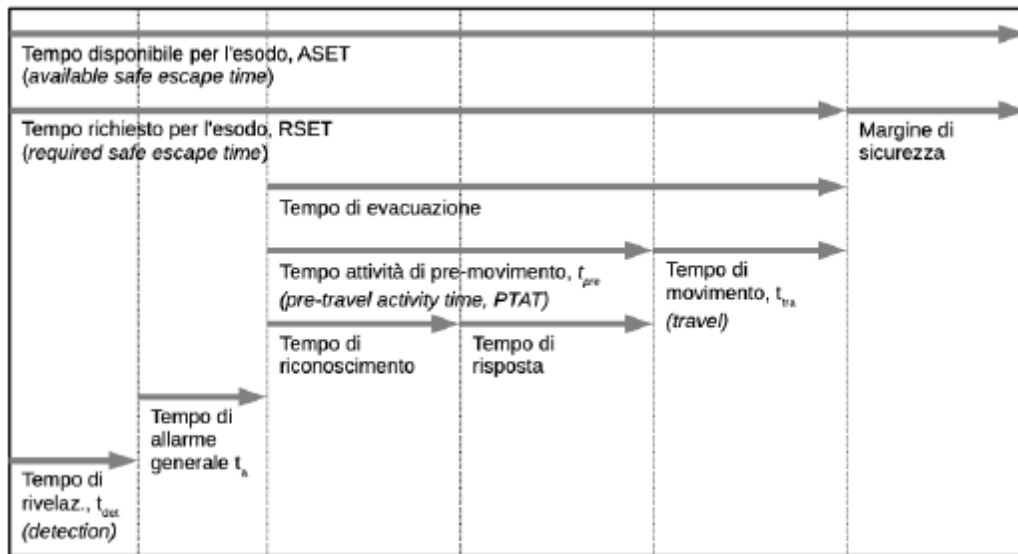


Figura 13. Metodo di valutazione dell'RSET e dell'ASET

2.2.2. FDS

Per l'approccio prestazionale, la metodologia di modellazione più frequentemente impiegata è l'uso di **FDS** (*Fire Dynamics Simulator*). FDS (Fig. 14) è un codice di simulazione di tipo **LES** (*Large-Eddy Simulation*) ideato per flussi a **bassa velocità**, con un focus specifico sul trasporto di fumi e calore generati dall'incendio. FDS è un modello di calcolo di **Fluidodinamica Computazionale (CFD)**, *open-source*, rilasciato dal **National Institute of Standards and Technology (NIST)**, che si propone di risolvere numericamente le equazioni di Navier-Stokes.

Come previsto dai software CFD, FDS permette al modellatore di definire una **geometria** il più fedele possibile al caso reale di studio e di caratterizzare il fenomeno dinamico attraverso un insieme di **condizioni al contorno e iniziali** (come temperature, flussi di materia e/o energia, forze, ecc.).

Tale geometria, che include strutture solide e/o spazi occupati da fluidi, viene discretizzata dal software in un insieme di **celle di volume finito**. Ciascuna cella è caratterizzata da un insieme di quantità assegnate alla totalità del volume e da un insieme di vettori con componenti assegnate alle facce e agli spigoli. Il software utilizza tale sistema per simulare nel tempo i fenomeni di **trasporto di materia**

(inclusa la turbolenza), **energia** (radiativo, convettivo e conduttivo) e **momento** da cella a cella.

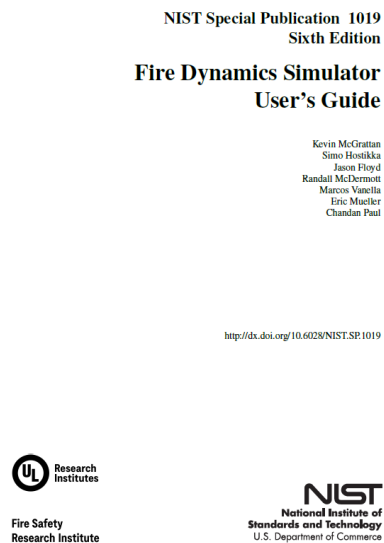


Figura 14. Guida all'uso di FDS

MODELLAZIONE DI PROCESSO

Inoltre, FDS consente di modellare i fenomeni di **combustione** simulando cinetiche di reazione. Il codice prevede la reazione tra ossigeno e un combustibile gassoso di composizione generica $C_xH_yN_zO_w$, che può provenire da:

- **Pirolisi** di solidi.
- **Evaporazione** di liquidi (entrambi i processi sono implementabili nel modello).
- **Gas** già presente nell'ambiente.

Le reazioni sono simulate come **controllate dalla temperatura** e dalla **miscelazione** dei reagenti. Il processo prevede la generazione di calore e di determinati prodotti (la cui stechiometria può essere definita dal modellatore).

- **Strumenti Aggiuntivi:** Numerosi altri strumenti sono integrati nel software, tra cui la modellazione di sistemi di spegnimento a pioggia (*sprinkler*), la modellazione di impianti aeraulici, di incendi boschivi, di fenomeni di condensazione e del moto di particelle. Tali strumenti, tuttavia, non sono rilevanti per questa specifica trattazione.

APPROSSIMAZIONI DEL MODELLO

FDS è stato sviluppato per operare in **regimi di moto subsonico**, richiedendo che il **Numero di Mach** (il rapporto tra la velocità del fluido e quella del suono nel fluido stesso) sia mantenuto **inferiore a 0,3**.

- **Ipotesi di Incompressibilità:** Il modello **trascura gli effetti di compressibilità** legati alla propagazione di onde di pressione.
- **Calcolo della Pressione:** La pressione (p) nelle varie celle fluide può essere calcolata come la somma di un termine di pressione di fondo $p_0(z, t)$ (ottenuto tramite la legge dei gas ideali, considerando la forza esercitata dal campo gravitazionale) e un termine perturbativo $p(x, y, z, t)$ derivante dal moto del fluido.

Il contributo della **turbolenza** sul campo di moto e sul trasporto di calore è modellato tramite l'approccio **LES** (*Large Eddy Simulation*).

- **LES:** Tale approccio consiste nel risolvere in modo diretto le fluttuazioni (vortici) del campo di moto aventi una dimensione caratteristica **maggiore** di quella della cella di calcolo.
- **Modello SGS:** Gli effetti dovuti ai vortici con dimensione caratteristica **inferiore** vengono modellati attraverso l'introduzione di un *Sub-Grid Scale model* (SGS).

Un'ulteriore approssimazione adottata consiste nel considerare i numeri adimensionali di **Schmidt e Prandtl turbolenti** come **costanti e pari a 0,5**. Tale assunzione deriva da risultati di prove sperimentali condotte su moti di prodotti di combustione.

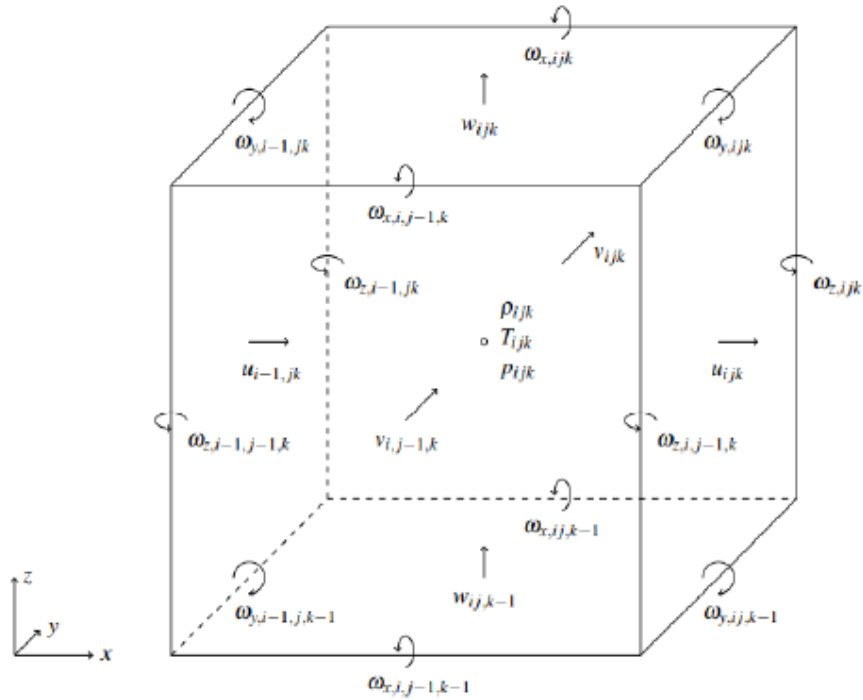


Figura 15. Esempio di posizionamento delle variabili per ogni cella su FDS [17]

Le equazioni di bilancio differenziali (considerando il posizionamento delle variabili per ogni cella come in Figura 15) impiegate da FDS nella risoluzione sono:

- **L'equazione di continuità (bilancio di materia)**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}'''_b \quad \text{Eq. 7}$$

in assenza di evaporazione o pirolisi di composti:

$$\dot{m}'''_b = 0 \quad \text{Eq. 8}$$

- **L'equazione di trasporto di massa del composto α**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho Z_\alpha) + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha \mathbf{u}) \\ = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}'''_\alpha + \dot{m}'''_{\{b, \alpha\}} \end{aligned} \quad \text{Eq. 9}$$

con $\dot{m}'''_{\{b, \alpha\}}$ composto generato per evaporazione di gocce in sospensione;

- **L'equazione di trasporto di energia**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) & \quad \text{Eq. 10} \\ & = D\bar{p}/Dt + \dot{q}''' + \dot{q}'''_b - \nabla \cdot \mathbf{q}'' \end{aligned}$$

Con

$$\mathbf{q}'' = -k\nabla T - \sum (h_{\{s, \alpha\}} \rho D_{\alpha} \nabla Z_{\alpha}) + \mathbf{q}''_r \quad \text{Eq. 11}$$

con \dot{q}'''_b calore scambiato da gocce evaporanti in sospensione;

- **L'equazione di trasporto della quantità di moto**

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{F} + \nabla H = 0 \rightarrow \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla H - \bar{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho}\right) & \quad \text{Eq. 12} \\ & = \left(\frac{1}{\rho}\right) [(\rho - \rho_0)\mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] \end{aligned}$$

Con

$$H \equiv \frac{|\mathbf{u}|^2}{2} + \frac{\bar{p}}{\rho} \quad \text{Eq. 13}$$

dal modello di viscosità di Deardorff, con \mathbf{f}_b forza di resistenza fluidodinamica esercitata dalle gocce in sospensione;

- **L'equazione di Poisson derivante dall'equazione di trasporto del momento**

$$\nabla^2 H = - \left[\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot \mathbf{F} \right] \quad \text{Eq. 14}$$

Al termine del calcolo e della simulazione, il modello FDS consente di ricavare le **distribuzioni spaziali e temporali** dei parametri fluidodinamici e termici chiave.

Questi parametri includono:

- **Temperature** (di gas e superfici solide).
- **Concentrazioni** (delle specie chimiche).
- **Flussi di calore** (per irraggiamento, convezione e conduzione).
- **Flussi di materia** (gas e fumi).
- **Calore generato** (in punti, superfici e/o volumi precedentemente definiti).

Tutti questi dati sono forniti in funzione del tempo trascorso dall'inizio della simulazione.

I parametri di *output* ottenuti sono **essenziali** per la successiva **valutazione del danno** e per la verifica del raggiungimento degli obiettivi di sicurezza antincendio, in particolare per la quantificazione delle grandezze di interesse (es. irraggiamento termico) sui bersagli sensibili.

2.2.3. PyroSim

Per la creazione e l'analisi dei modelli numerici basati sul codice FDS, è stato utilizzato **PyroSim (Fig. 16)**.

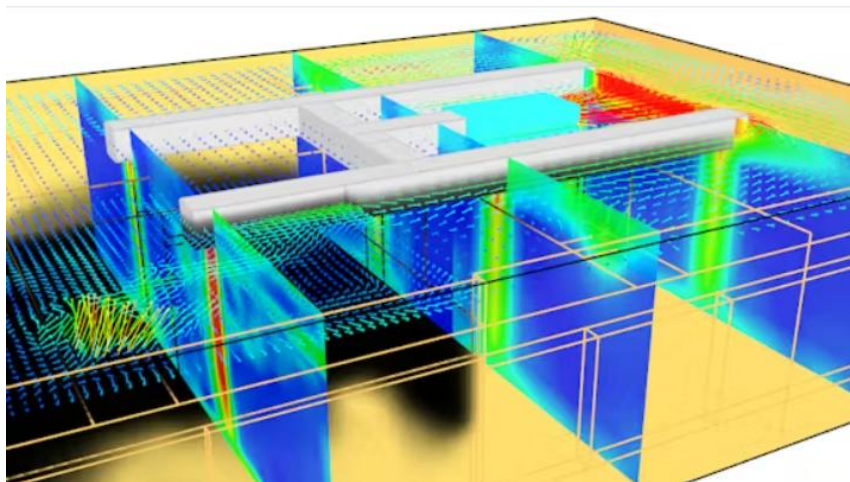


Figura 16. Visualizzazione output PyroSim

PyroSim è un software di pre- e post-processing sviluppato da **Thunderhead Engineering**. La sua funzione principale è quella di agire come **interfaccia grafica utente (GUI)** per facilitare l'impiego di FDS.

Funzioni Principali

Il software consente al modellatore di effettuare le seguenti operazioni chiave, semplificando la scrittura e la gestione del complesso codice di *input* di FDS:

- **Definizione della Geometria:** Permette la creazione intuitiva della geometria tridimensionale dell'ambiente di studio e l'importazione di modelli CAD esterni.
- **Gestione della Griglia (Mesh):** Facilita la definizione e la gestione delle griglie di calcolo (mesh), assicurando la corretta discretizzazione spaziale del dominio.
- **Definizione delle Condizioni:** Consente l'assegnazione rapida dei parametri di *input* fondamentali, quali le proprietà dei materiali, le condizioni iniziali e al contorno (es. *Rate of Heat Release* - RHR, aperture di ventilazione, sensori di misurazione).
- **Analisi dei Risultati:** Integra strumenti per la visualizzazione dei risultati (post-processing) direttamente dai file di *output* di FDS, permettendo l'analisi grafica dei dati simulati nello spazio e nel tempo.

L'impiego di PyroSim ha garantito una **maggiore efficienza** nella preparazione del modello, assicurando al contempo la piena aderenza ai principi di calcolo risolti dal codice di simulazione FDS.

3. CASO STUDIO

Nel presente lavoro di tesi sono stati analizzati in dettaglio due distinti **scenari incidentali** con l'obiettivo di valutare le rispettive criticità in termini di sicurezza antincendio e propagazione termica.

I due scenari sono i seguenti:

1. **Incendio di Veicolo Elettrico (batteria agli ioni di litio):** Questo scenario riguarda l'incendio di un'automobile alimentata elettricamente, causato da un'avaria o da un danno alla batteria che innesca il fenomeno di **propagazione termica interna (Thermal Runaway)**.
2. **Incendio da Rilascio di Gas Naturale Liquefatto (GNL):** Questo scenario simula l'incendio scaturito dall'accensione di una **pozza di LNG** (*Liquefied Natural Gas*), formatasi a causa di rottura o foratura del serbatoio criogenico del veicolo.

3.1.GEOMETRIA E CONTESTO

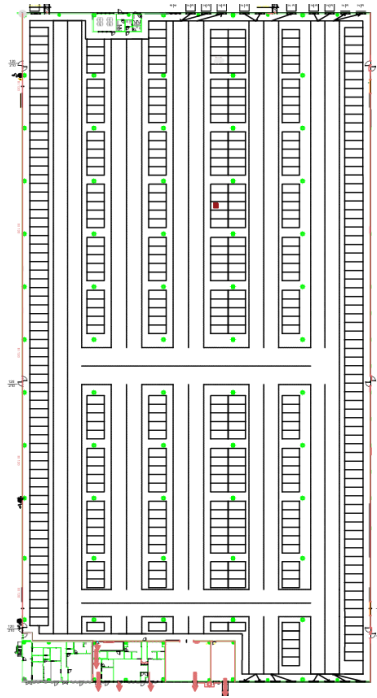


Figura 17. Layout dell'autorimessa

I veicoli oggetto di studio per la modellazione CFD sono stati virtualmente collocati all'interno di un'autorimessa (Fig. 17) di notevoli dimensioni. La geometria è stata fedelmente riprodotta con l'ausilio del software **AutoCAD**, impiegando planimetrie, sezioni, prospetti e *layer* predefiniti. Tale approccio ha garantito la necessaria **accuratezza geometrica**, fondamentale per l'affidabilità delle simulazioni fluidodinamiche successive.

La pianta AutoCAD è stata importata all'interno dell'interfaccia grafica di PyroSim per costruire l'intera geometria della struttura tramite gli strumenti "Walls" e "Slabs" della categoria "**Obstruction**".

La struttura è caratterizzata da dimensioni imponenti, con una larghezza approssimativa di 100m e una lunghezza di 195m, che si traducono in una superficie totale di **19.500m²**. L'autorimessa si sviluppa su un unico livello, essendo posta interamente al piano terra con **compartimentazione unica**, e presenta un'altezza libera variabile compresa tra 12,5m e 13,5m. La presenza di due fessure di circa 50m² l'una permette la corretta aerazione di tipo Sea (definizione da Codice di

Prevenzione Incendi). La configurazione spaziale è tale da conferire alla struttura una capacità di stoccaggio approssimativa di 400 veicoli.

La struttura è delimitata sui lati da attività adiacenti, dalle quali è rigorosamente separata mediante muri in calcestruzzo alleggerito con resistenza al fuoco classificata come **EI 120**. I muri di affaccio esterno sono realizzati in cemento. All'interno, locali di servizio, come le sale controllo (ad eccezione dei bagni), sono anch'essi segregati mediante muri in cemento armato e certificati EI 120. Questa scelta di materiali contribuisce attivamente alla **protezione passiva** e alla limitazione della propagazione dell'incendio. Dal punto di vista strutturale, i pilastri sono in cemento armato, le travi in acciaio, le saracinesche di ingresso/uscita veicolare sono in acciaio zincato, i lucernari in PVC ed il tetto in acciaio.

In PyroSim l'inserimento dei materiali passa dall'inserimento di questi ultimi nella sezione "Materials" (materiali che possono essere presenti nel database oppure che occorre implementarli) e dalla successiva creazione di una superficie "**Surface**" per l'applicazione all'oggetto designato.

La struttura è dotata di **17 aperture** complessive adibite al traffico veicolare, distribuite in modo dissimmetrico: otto sul lato Sud e nove sul lato Nord. Un'attenzione particolare è stata posta anche all'esodo pedonale: le vie di esodo sono posizionate lungo i fianchi dell'autorimessa e la loro larghezza eccede di circa 0,3/0,5m rispetto ai minimi dimensionali prescritti dalla normativa vigente[18].



Figura 18. Posizione auto incendio

In linea con le procedure di **Fire Safety Engineering (FSE)**, la modellazione mira a descrivere la **condizione di maggiore rischio** (*scenario conservativo*) possibile.

Per questo motivo, il focolare dell'incendio (quadrato rosso della Figura 18) è stato intenzionalmente posizionato nel **punto peggiore** all'interno dell'autorimessa. Questo punto critico è stato identificato in una delle zone centrali dell'autorimessa, fra due file adiacenti di veicoli, dove la prossimità strutturale fosse massima (immediata vicinanza a travi e pilastri portanti, in verde in Figura 18) e, contemporaneamente, si registrasse la **massima distanza possibile dalle vie di esodo**. Tale scelta massimizza le sollecitazioni termiche sulle strutture portanti e il potenziale rischio per l'esodo. Per quanto riguarda le condizioni al contorno, per simulare una ventilazione limitata e, quindi, una maggiore gravità dell'evento, solo **quattro saracinesche** sono state impostate come **aperte**, mantenendo tutte le altre aperture (incluse le porte e i lucernari) **chiuse** per l'intera durata della simulazione.

3.2.Auto Elettriche

Il test sull'incendio per il veicolo elettrico è stato condotto adottando una configurazione che rappresenta il **caso più conservativo** possibile: un'automobile elettrica di medie dimensioni, parcheggiata all'interno dell'autorimessa e con il **pacco batteria pienamente carico** e completamente in acciaio poiché il materiale che meglio approssima l'auto.

THERMAL RUNAWAY

Il **Thermal Runaway (TR)** o **Fuga Termica** rappresenta una delle principali preoccupazioni relative alla sicurezza delle batterie agli ioni di litio, in particolare per quelle impiegate nei veicoli elettrici.

Questo fenomeno è definito come un **processo di riscaldamento autoaccelerante e non controllabile**, caratterizzato da un accumulo esponenziale di calore all'interno della cella o del pacco batteria. Tale accumulo è dovuto a reazioni chimiche interne esotermiche che, una volta innescate, rilasciano energia più rapidamente di quanto la batteria sia in grado di dissiparla verso l'esterno.

Le conseguenze del TR sono estremamente gravi e includono: incendi, esplosioni e il rilascio massivo di **gas nocivi e infiammabili** (*off-gas*), che costituiscono un serio rischio per l'incolumità delle persone e la propagazione del fuoco[19].

I meccanismi che possono portare all'innescò del *thermal runaway* sono molteplici e coinvolgono stress di natura elettrica, meccanica o termica che compromettono l'integrità interna della cella[20]:

- **Sovraccarico Elettrico:** L'applicazione di una tensione di carica superiore a quella nominale (o il superamento della corrente di carica massima) può causare sovratemperature e la deposizione di litio metallico sull'anodo (*plating*), con conseguente danneggiamento e potenziale rottura del separatore.
- **Cortocircuito:** Un cortocircuito, sia esso interno (dovuto a difetti o danneggiamento del separatore) o esterno (causato da un guasto nel sistema elettrico), genera un **rilascio istantaneo e massivo di energia termica**, fungendo da innesco primario per la reazione esotermica incontrollata.
- **Danni Fisici:** Impatti meccanici, schiacciamenti o penetrazioni possono compromettere l'integrità strutturale del *pack* o della singola cella. Questo può provocare la rottura fisica del separatore, innescando un cortocircuito interno diretto e il conseguente rilascio di energia.
- **Difetti di Fabbricazione:** Le anomalie residue derivanti dal processo di produzione (come impurità o posizionamento errato degli elettrodi) possono creare zone localizzate di resistenza termica o elettrica che aumentano la probabilità di innesco del *thermal runaway* durante il normale ciclo di vita della batteria.

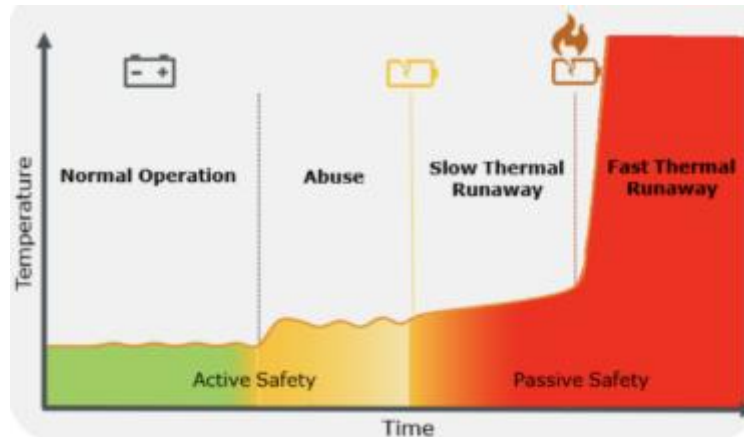


Figura 19. Fasi dell'incendio di una batteria e la thermal runaway

Il fenomeno del *Thermal Runaway* (Fig. 19) non si manifesta istantaneamente, ma progredisce attraverso una sequenza di tre fasi distinte che portano all'incendio e alla propagazione:

- **Venting:**

Questa fase iniziale è caratterizzata dall'aumento della temperatura interna (circa 100°C o poco più) che porta alla **degradazione dei componenti** e all'inizio della reazione esotermica. L'accumulo di gas all'interno della cella (dovuto principalmente alla decomposizione dell'elettrolita e alla reazione del litio) provoca un rapido aumento della pressione interna. La cella rilascia questa pressione e i gas attraverso una valvola di sicurezza o tramite la rottura del contenitore (*venting*). Questi gas, noti come *off-gas*, sono spesso tossici e altamente infiammabili.

- **Thermal Runaway:**

Questa è la fase critica di **instabilità termica incontrollabile**. Superata la temperatura critica di innesco (spesso intorno ai 300°C)[21], l'aumento di temperatura e pressione innesca una reazione a catena autoaccelerante all'interno della cella. L'energia chimica immagazzinata viene rilasciata in modo improvviso, generando *hot-spot* con temperature che possono raggiungere rapidamente circa 400°C e oltre. A questo punto, la cella tipicamente **erutta** in un incendio.

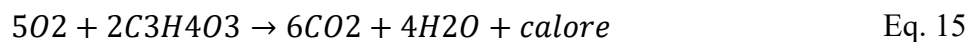
- **Propagazione:**

Una volta che il *thermal runaway* è avviato in una cella, il rilascio massivo di calore e la violenta emissione di fiamma/materiale incandescente generano un **flusso**

termico sufficiente a innescare il TR nelle celle adiacenti. Questo meccanismo di trasferimento termico innesca una **reazione a catena** all'interno dell'intero pacco batteria, portando alla sua completa distruzione. La temperatura di fiamma generata da un incendio di veicolo elettrico in *thermal runaway* si aggira tipicamente tra i **700°C e i 1.000°C**[22].

In sintesi, il fenomeno comporta il rilascio incontrollato di energia immagazzinata, con la creazione di temperature elevatissime e lo scoppio di un incendio che risulta **estremamente difficile da estinguere** con i mezzi convenzionali, data la sua natura chimico-energetica.

Tra le reazioni chimiche che coinvolgono la singola cella e che caratterizzeranno i gas emessi vi sono quelle di **completa combustione del solvente** (spesso carbonato di etilene, EC) e la **decomposizione dell'LiPF₆**[23]:



3.2.1. Modellazione del caso studio

Le reazioni chimiche che avvengono durante l'incendio di una batteria agli ioni di litio sono estremamente complesse. **L'energia e la quantità di gas prodotti** dall'incendio di una singola cella o modulo **non sono direttamente scalabili** per prevedere il comportamento di un intero pacco batteria di un veicolo.

Pertanto, per la modellazione CFD e per l'analisi dei prodotti di combustione, si è fatto riferimento ai risultati di un **test su scala reale**. Nello specifico, si è utilizzato lo studio condotto dall'**INERIS** (*National Institute of industrial Environment and*

Risks) intitolato "Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle"[23].

Questo test ha fornito dati cruciali, ottenuti mediante l'incendio controllato di un autoveicolo dotato di batterie completamente cariche e l'utilizzo di strumentazione avanzata per l'analisi dei gas emessi. Tali misurazioni hanno permesso di quantificare la massa e la tipologia dei **gas tossici di combustione** e di decomposizione rilasciati durante l'evento.

I risultati quantitativi ottenuti da questo test, che saranno impiegati come *input* per la modellazione FDS dello scenario di *Thermal Runaway*, sono riassunti nella tabella 2.

| | |
|----------------------------|----------|
| Valore | EV |
| Voltaggio Nominale (V) | 355V |
| Capacità (Ah) | 66,6 Ah |
| Energia (kWh) | 23,5 kWh |
| Massa (kg) | 1501 kg |
| Massa persa (kg) | 278,5 kg |
| Massa persa (%) | 18,6 % |
| CO ₂ (g) | 618490 g |
| CO (g) | 11700 g |
| THC (g) | 2860 g |
| NO (g) | 770 g |
| NO ₂ (g) | 349 g |
| HF (g) | 1470 g |
| HCl (g) | 1930 g |
| HCN (g) | 148 g |
| HRR Massimo (MW) | 4,7 MW |
| Calore di Combustione (MJ) | 8540 MJ |

Tabella 4. Risultati quantitativi del test condotto dall'INERIS[23]

Nel contesto di questa analisi, la sigla **THC** si riferisce ai **Total HydroCarbons (Idrocarburi Totali)**, che rappresentano una componente significativa dei gas infiammabili rilasciati durante la decomposizione termica delle batterie.

A partire dai dati sperimentali ottenuti dal test INERIS, è stato possibile **estrapolare la curva HRR** in funzione del tempo. Questa estrapolazione è stata condotta mediante l'impiego di un software di **modellazione e analisi di immagini**, consentendo di digitalizzare e quantificare l'andamento del rilascio termico.

La curva RHR(t) così ottenuta è **fondamentale** in quanto fornisce l'input di calore necessario per la simulazione dell'incendio con il codice **FDS** (*Fire Dynamics Simulator*), caratterizzando in modo realistico la sorgente di energia termica all'interno del dominio di calcolo.

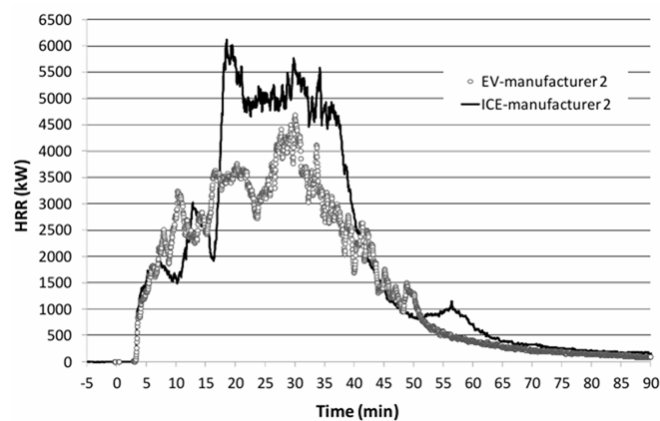


Figura 20. HRR(t) misurata dall'INERIS[19]

Dall'analisi dei dati sperimentali INERIS, si evince che il test di incendio, della durata complessiva di circa **90 minuti (Fig 20)**, segue una dinamica termica ben definita. L'andamento della curva **RHR** (*Rate of Heat Release*) mostra una **fase crescente** che raggiunge il picco massimo intorno al **minuto 35**, per poi entrare nella fase di decadimento e terminare con lo spegnimento completo dell'incendio. È di fondamentale importanza descrivere e quantificare i **prodotti della combustione**, in quanto il loro rilascio nell'ambiente, se superiore a determinate soglie di concentrazione, può causare **danni severi o letali alle persone**[23].

I gas emessi in seguito al *thermal runaway* e alla combustione dei materiali della batteria e del veicolo sono tipicamente tossici e irritanti.

Disponendo dell'andamento completo della curva HRR(t) e del suo valore massimo estrapolato dai dati sperimentali, è stato possibile implementare questi parametri nel codice di simulazione attraverso l'interfaccia **PyroSim**.

L'impostazione del focolare (Burner) è stata eseguita nella sezione "Edit Surfaces" di PyroSim, dove è stata definita una superficie di tipo "Burner" (visibile in Figura 21) per simulare l'incendio della batteria[24].



Figura 21. Superfici adottate nel modello

Tasso di Rilascio di Calore per Unità di Area (HRRPUA) (Fig. 22): Il valore di HRRPUA (*Heat Release Rate Per Unit Area*) è stato calcolato assumendo che la superficie della batteria interessata dall'incendio fosse pari all'area della base del veicolo, quantificata in $5,25\text{m}^2$.

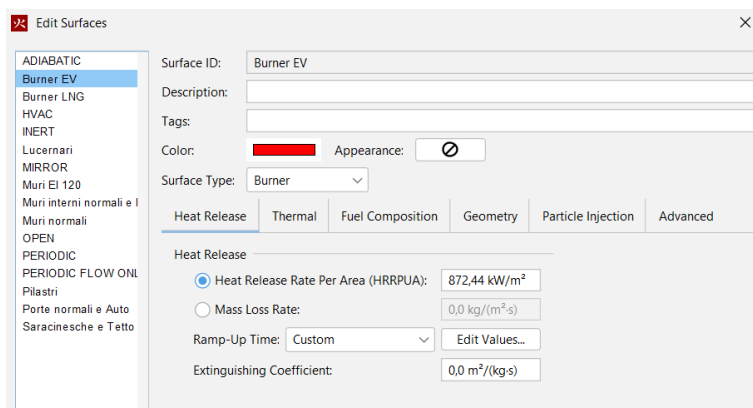
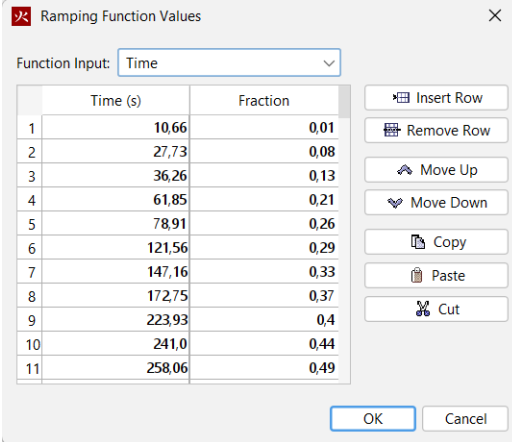


Figura 22. Impostazione dell'HRR

Tempo di Ramp-Up (Fig. 23): Per descrivere l'andamento dinamico della curva HRR(t), si è utilizzato il parametro **Ramp-Up Time**[24]. L'inserimento è stato effettuato frazionando i valori di HRRPUA in funzione del massimo, partendo da

un HRRPUA nullo (valore 0) fino al raggiungimento del HRRPUA massimo (valore 1), seguendo l'andamento estrapolato dalla fonte INERIS.



| | Time (s) | Fraction |
|----|----------|----------|
| 1 | 10,66 | 0,01 |
| 2 | 27,73 | 0,08 |
| 3 | 36,26 | 0,13 |
| 4 | 61,85 | 0,21 |
| 5 | 78,91 | 0,26 |
| 6 | 121,56 | 0,29 |
| 7 | 147,16 | 0,33 |
| 8 | 172,75 | 0,37 |
| 9 | 223,93 | 0,4 |
| 10 | 241,0 | 0,44 |
| 11 | 258,06 | 0,49 |

Figura 23. Impostazione del Ramp-UP Time

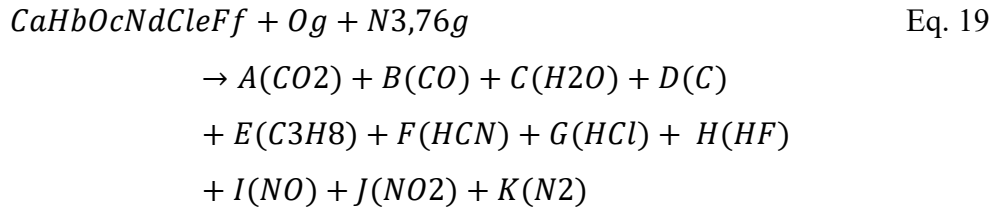
MODELLAZIONE DELLA CHIMICA DI COMBUSTIONE

L'aspetto della reazione chimica è il più complesso da gestire in FDS per la modellazione di incendi complessi. Per impostazione predefinita, FDS ragiona in modalità "**Simple Chemistry**" (Chimica Semplice), in cui si assume che il combustibile si trasformi interamente in CO₂ e H₂O.

Per poter tenere conto dei prodotti tossici emessi nel TR e passare dalla "Simple Chemistry" alla modellazione di tipo "**Complex Stoichiometric**" (Chimica Stechiometrica Complessa), è necessario seguire una procedura rigorosa:

1. **Definizione della Reazione:** Determinare la formula chimica bruta del combustibile (il reagente principale).
2. **Calcolo dei Coefficienti Stechiometrici:** Bilanciare la reazione per tutti i prodotti emessi (inclusi CO, HCN, HF, ecc.) utilizzando i dati ottenuti dal test INERIS.

La reazione chimica di decomposizione e combustione verrà pertanto espressa nella forma generale:



Per passare dalla *Simple Chemistry* alla *Complex Stoichiometric*, è indispensabile eseguire un rigoroso **bilancio stechiometrico** che tenga conto di tutti i prodotti di decomposizione e combustione.

Dai dati quantitativi dei gas emessi (raccolti nella Tabella x.y, derivante dal test INERIS), è possibile ricavare le moli totali e per ciascun componente della reazione. Attraverso l'applicazione di ipotesi semplificative, si è poi in grado di determinare i coefficienti stechiometrici del reagente equivalente.

Ipotesi Semplificative per la Modellazione

Per definire la formula chimica bruta equivalente della batteria e bilanciare la reazione, sono state adottate diverse ipotesi, essenziali per la trattazione FSE e per l'implementazione in FDS:

1. **Trattamento della Fuliggine (Soot):** Secondo la guida utente di FDS, la frazione di fuliggine prodotta è approssimabile a **carbonio monoatomico (C)**. Per quantificare il carbonio rimanente sotto forma di *soot*, si è partiti dalla massa totale persa durante il test e si è sottratta la quantità di carbonio emessa sotto forma di gas. La quantità di carbonio effettivamente convertita in *soot* è stata stimata assumendo che la sua frazione di massa sia compresa nell'intervallo accettato tra 0,85 e 0,95.
2. **Composizione Bruta del Reagente Equivalente: Il Codice di Prevenzione Incendi** suggerisce ipotesi semplificative per la composizione del combustibile equivalente:
 - La quantità di **Ossigeno** presente nel reagente è considerata pari alla metà della quantità di **Carbonio** presente nello stesso reagente.
 - La quantità di **Idrogeno** presente è considerata pari a due volte la quantità di Carbonio.
3. **Fonte dell'Azoto (N₂):** Tutto l'azoto presente nei prodotti di combustione è considerato provenire dall'aria. Contrariamente alle impostazioni

predefinite di FDS, la composizione dell'aria è qui specificata come 21% di Ossigeno e 79% di Azoto.

4. **Trattamento dei THC:** La componente di Idrocarburi Totali è stata trattata con l'ipotesi di essere equivalente a **propano (C₃H₈)**, in accordo con la metodologia semplificativa suggerita dall'articolo INERIS precedentemente citato.

Attraverso l'applicazione di queste ipotesi e del bilancio di massa, si ottiene la seguente formula bruta del reagente equivalente:

$$\begin{aligned} &C0,9983H1,93666O0,48916N0,0021Cl0,0029F0,004 + O2,01647 \quad \text{Eq. 20} \\ &+ N7,5950872 \\ &\rightarrow 0,765(CO_2) + 0,0227(CO) + 0,95073(H_2O) \\ &+ 0,1998(C) + 0,0035(C_3H_8) + 0,0003(HCN) \\ &+ 0,0029(HCl) + 0,004(HF) + 0,0014(NO) \\ &+ 0,0004(NO_2) + 3,7975436(N_2) \end{aligned}$$

Una volta definita la formula bruta del reagente equivalente attraverso il bilancio stechiometrico, è stato possibile procedere alla sua implementazione nel modello FDS.

DEFINIZIONE DELLA REAZIONE

- **Specie (Fig. 24):** È stata creata una nuova **Specie chimica** denominata "EV_Fuel", alla quale è stata associata la formula chimica bruta del reagente equivalente calcolato.

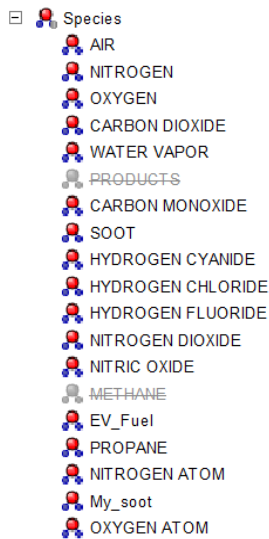


Figura 24. Specie inserite

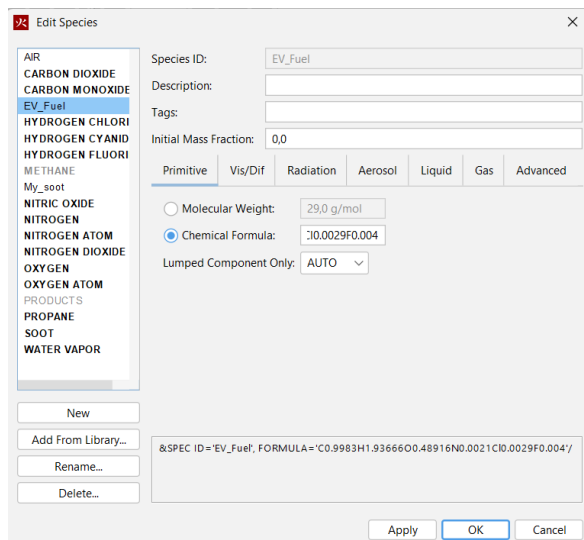


Figura 25. Formula chimica delle emissioni dall'EV

- **Reazione (Fig. 25):** Successivamente, è stata introdotta la **Reazione** denominata "**EV_Combustion**", impostando il modello di reazione su "**Complex Stoichiometry**". In questa sezione di *input* sono stati inseriti i coefficienti stechiometrici calcolati per il reagente (EV_Fuel) e per tutti i prodotti di combustione (Fig 26).

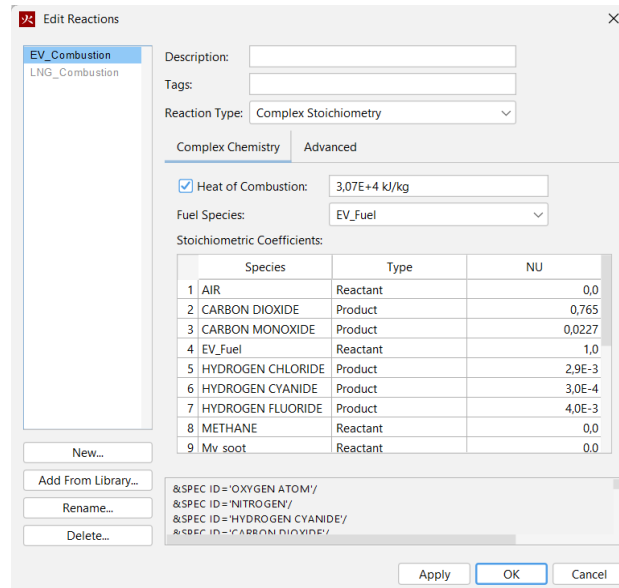


Figura 26. Impostazione delle specie partecipanti alla reazione

È importante sottolineare che, a causa di alcune limitazioni funzionali dell'interfaccia grafica di **PyroSim**, si è reso necessario intervenire direttamente sul **codice FDS** (*input file* generato dal software).

In particolare, il modello FDS prevede di *default* una composizione standard dell'aria. Poiché la metodologia adottata prevedeva l'utilizzo di una composizione aria specifica per coerenza con le ipotesi di bilancio, si è dovuta aggiungere manualmente la porzione di codice necessaria per sovrascrivere la composizione dell'aria di default del programma (come in Figura 27).

```
&SPEC ID='AIR', BACKGROUND=T
SPEC_ID(1)='OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)=0.209797,
SPEC_ID(2)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)=0.790203 /
```

Figura 27. Creazione della specie "ARIA"[25]

Questa operazione ha assicurato che le simulazioni venissero eseguite con le condizioni al contorno coerenti con l'analisi stechiometrica e le ipotesi semplificative adottate.

DEVICES

Affinché il software di simulazione (*FDS*) restituisca risultati quantitativi che permettano una valutazione del rischio basata sui criteri della Fire Safety

Engineering (FSE), è indispensabile applicare specifici **dispositivi di misurazione (Devices)** all'interno del dominio geometrico come mostrato in Figura 29 e 30.

I dispositivi selezionati per l'analisi dello scenario d'incendio in autorimessa sono:

- **Fractional Effective Dose (FED) e Fractional Irritant Concentration (FIC):** Metriche fondamentali per la verifica della **sicurezza della vita umana** (Rvita).

La **FED** è utilizzata per quantificare la dose cumulativa limite di gas tossici da combustione che può essere tollerata da un essere umano prima di raggiungere una soglia di incapacità o letalità.

La **FIC** rappresenta la valutazione degli effetti tossici derivanti specificamente dalla concentrazione di gas irritanti (come HCl e HF).

- **Adiabatic Surface Temperature (AST):** L'AST esprime l'esposizione termica di una superficie solida in gradi Celsius.

Questo parametro è cruciale per valutare il **danno strutturale** e la propagazione del fuoco ai materiali adiacenti (strutture portanti e veicoli) derivante dal flusso di calore convettivo e radiativo.

- **Incident Heat Flux (IHF):** L'IHF (o *Flusso di Calore Incidente*) quantifica l'esposizione termica delle superfici solide in kW/m². L'IHF misura l'energia termica radiante e convettiva che colpisce una superficie, ed è essenziale per la verifica dei criteri di integrità e isolamento strutturale e per la valutazione del rischio di innesco per i materiali non infiammanti.

- **Visibility (Visibilità):** Questo dispositivo quantifica il **livello di visibilità** nel punto di misurazione, tipicamente espresso in metri. La visibilità è un parametro critico per la valutazione dell'esodo, in quanto la sua riduzione (dovuta alla densità dei fumi) ostacola l'orientamento e l'evacuazione degli occupanti.

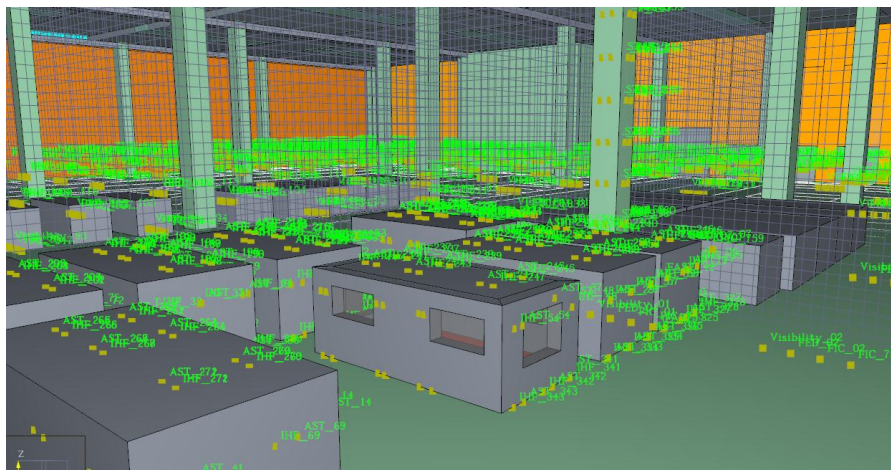


Figura 28. Posizionamento di alcuni devices

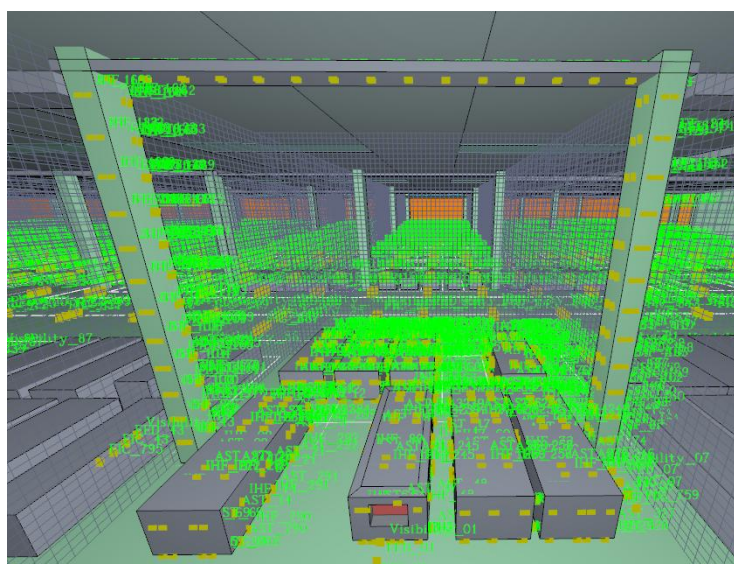


Figura 29. Posizionamento di alcuni devices lungo la campata coinvolta

- **2D Slice (Sezione Bidimensionale, Fig. 30):** Le *Slices* sono strumenti di visualizzazione che, pur non essendo *Devices* in senso stretto, consentono di osservare l'andamento nel tempo e la distribuzione spaziale (su un piano bidimensionale) di quantità chiave come temperature, velocità, concentrazioni di gas e visibilità. Forniscono un **valore semi-quantitativo e qualitativo**, indispensabile per l'analisi complessiva e la comprensione della dinamica del fenomeno.

L'impiego di questi dispositivi permette di trasformare i risultati fluidodinamici in **metriche di rischio** direttamente confrontabili con i limiti normativi di sicurezza.

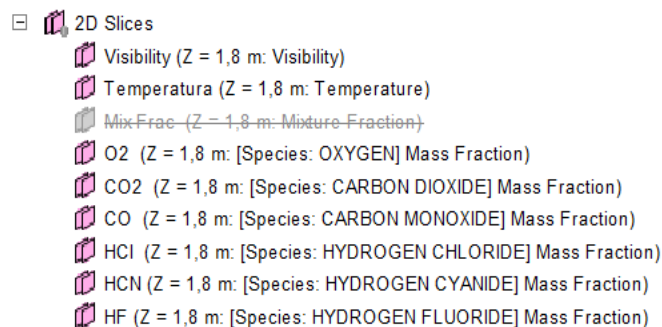


Figura 30. Slices impiegate

3.3.Auto LNG

Il secondo scenario incidentale analizzato in questa tesi riguarda l'incendio di un veicolo alimentato a **Gas Naturale Liquefatto (LNG)**. Ai fini della modellazione, si è ipotizzata un'automobile la cui struttura è interamente in acciaio e con il serbatoio del GNL pienamente carico, in linea con l'approccio conservativo già adottato.

Lo studio simula l'incendio di una pozza di GNL (**Pool Fire**), innescato dal rilascio del metano allo stato liquido a causa di una **rottura o forazione accidentale del serbatoio del veicolo**.

L'LNG E I CARBURANTI CONVENZIONALI

Nonostante la crescente pressione globale verso l'abbandono dei combustibili fossili, il **Gas Naturale Liquefatto** è destinato a svolgere un ruolo chiave e transitorio nel percorso di decarbonizzazione di numerosi settori. Si prevede che la produzione globale di GNL continuerà ad aumentare nei prossimi anni.

Le stime indicano che la domanda globale di GNL raggiungerà un volume compreso tra **625 e 685 milioni di tonnellate all'anno entro il 2040**, un incremento superiore al 50% rispetto ai 404 milioni di tonnellate registrati nel 2023. Si prevede che questa maggiore domanda sarà guidata da diversi settori, in particolare

l'industria manifatturiera, l'industria pesante, la produzione di energia elettrica e il settore dei trasporti.[26]

Sebbene il GNL sia intrinsecamente un carburante di origine fossile, esso presenta un impatto ambientale notevolmente inferiore rispetto ad altri combustibili fossili ad alta intensità di carbonio, come il carbone e il petrolio.

Le emissioni di CO₂ generate per unità di energia dal GNL sono significativamente inferiori a quelle del carbone, sia nella fase pre-combustione che durante il processo di combustione. Ciò consente, nel breve termine, una netta riduzione delle emissioni complessive, posizionando il GNL come un'alternativa *più pulita* rispetto ai combustibili tradizionali.

Per tale motivo, la società di consulenza globale McKinsey & Company ritiene che il gas naturale (e, per estensione, il GNL) dimostrerà una maggiore resilienza rispetto ad altri carburanti fossili nei prossimi cinque-dieci anni, prevedendone la sostituzione in un momento successivo.

L'adozione del GNL nel settore dei trasporti pesanti sta assumendo un'importanza crescente. Ad esempio, diversi produttori hanno calcolato che i camion alimentati a gas rilasciano dal **15% al 20% in meno di emissioni di CO₂** rispetto ai motori diesel equivalenti.[27]

Nonostante l'elettrico a batteria (BEV) offra potenziali riduzioni di emissioni superiori, le limitazioni attuali in termini di autonomia operativa e la rete di ricarica ancora insufficiente lo rendono una soluzione non immediatamente applicabile per molte società di trasporto merci. I camion alimentati a GNL, al contrario, offrono **autonomia e prestazioni analoghe** a quelle dei motori diesel.

Di conseguenza, la rete di rifornimento per i camion a GNL sta crescendo rapidamente in tutta Europa, annoverando attualmente **786 stazioni di rifornimento**.

La transizione è accelerata da politiche mirate in grandi economie: la **Cina**, responsabile di gran parte della domanda globale, sta sovvenzionando il passaggio dal carbone al GNL per migliorare la qualità dell'aria urbana, mentre l'**India** punta a convertire circa un terzo della sua flotta di veicoli pesanti a GNL entro i prossimi 5-7 anni[28].

Sebbene l'uso del LNG rappresenti un passo significativo verso la riduzione delle emissioni, il vero impatto ambientale a lungo termine sarà guidato dalla transizione al **Bio-LNG**. Il Bio-LNG è un carburante rinnovabile non fossile, ottenuto dalla lavorazione di rifiuti organici. A seconda delle specifiche modalità di produzione, il Bio-LNG ha il potenziale di generare emissioni di CO₂ che possono raggiungere valori **negativi fino al 200%** nella valutazione *well-to-wheel* (dal sito di produzione al veicolo)[29].

3.3.1. Pool Fire LNG

In caso di fuoriuscita di LNG dal serbatoio, a causa della forte differenza di temperatura con l'ambiente, esso **vaporizzerebbe rapidamente** nella prima fase (*flash vaporization*) mentre, con la formazione di una pozza, vaporizza più lentamente[30]. Un elemento fondamentale è che, come tipicamente per liquidi infiammabili, la fase liquida non esplode e non brucia. L'LNG deve essere **vaporizzato e miscelato con aria** affinché si venga a formare la nuvola di vapore di LNG, con concentrazione **tra il 4% ed il 15%**, la quale potrebbe esplodere o essere innescata. La creazione della nuvola di vapore è momentanea, non appena il gas sarà arrivato ad una temperatura superiore di -110°C allora inizierà a disperdersi e cesserà di essere visibile. Il Gas naturale ha una temperatura di autoaccensione di 540°C, superiore alla maggior parte degli altri combustibili. Se acceso, l'LNG presenta quattro scenari di rischio: vapor cloud flash fire, jet fire, **pool fire**, vapor cloud explosion[14].

Osservando il fenomeno della fuoriuscita di LNG, il vapore dal serbatoio forma un aerosol che risale in verticale trascinandosi con sé l'aria mentre il liquido formerà una pozza a terra capace di avvolgere gli ostacoli espandendosi.

Una volta **innescata la combustione**, se la pozza è in un'area confinata allora continuerà a bruciare finché il carburante non sarà completamente esaurito. La combustione di una pozza di metano liquido prende il nome di "pool fire" (Figura 31).



Figura 31. LNG Pool Fire[31]

Il fenomeno del pool fire visibile in Figura 31, è lo scenario più plausibile se si parla di rilasci di LNG. Inoltre, è l'unico che può raggiungere uno stato pseudo-stazionario in grado di innescare il cosiddetto **effetto domino**, ossia uno scenario incidentale ulteriore da un oggetto limitrofo.

3.3.2. Modellazione caso studio

La modellazione per l'incendio della pozza di Gas Naturale Liquefatto formatasi a seguito della rottura del serbatoio del veicolo, è stata implementata utilizzando l'interfaccia grafica **PyroSim** (basata sul codice FDS)[32].

Per simulare il caso peggiore (*worst-case scenario*) possibile, è stato ipotizzato che il serbatoio del veicolo fosse **completamente pieno**, assumendo un volume di stoccaggio pari a **115L**. La fuoriuscita del LNG liquido avviene per forazione del serbatoio, portando alla formazione di una pozza di combustibile sul pavimento dell'autorimessa come rappresentato in Figura 32.

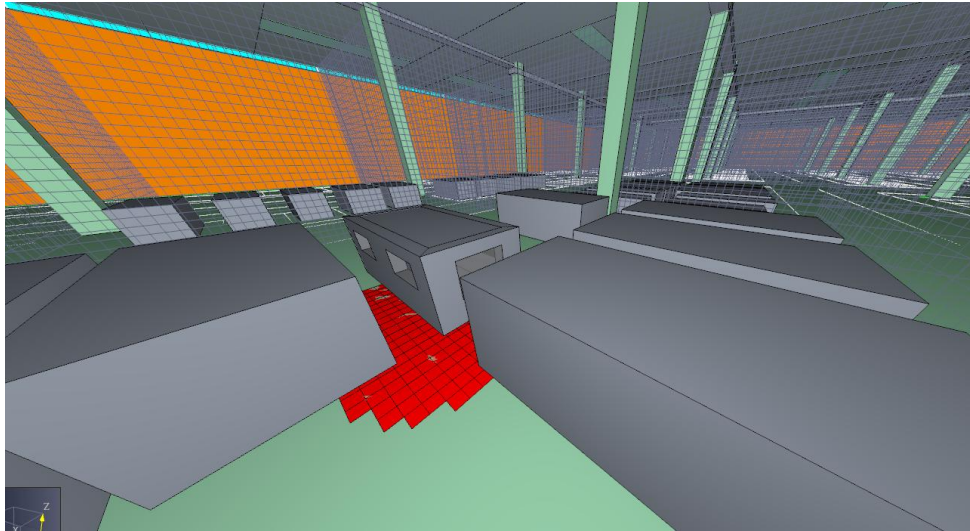


Figura 32. Modellazione PyroSim

L'analisi modellistica si concentra sul fenomeno del **Pool Fire** (Incendio di Pozza), ovvero la combustione del vapore generato da una pozza di sostanza infiammabile in seguito a un rilascio continuo. Per il calcolo del **HRR**, che definisce l'intensità termica del focolare, sono state considerate le seguenti condizioni specifiche che caratterizzano il GNL:

- **Sostanza a Basso Punto di Ebollizione:** Il GNL è un liquido criogenico con una temperatura di ebollizione normale ($T_{eb} = -162^{\circ}\text{C}$)[33] significativamente inferiore alla temperatura ambiente (T_{amb}).
- **Stato Criogenico:** La sostanza è un gas liquefatto criogenicamente.
- **Geometria della Pozza:** Si assume la formazione di una **pozza bollente e non confinata** sul pavimento.

In queste condizioni, la potenza termica massima di un *Pool Fire* di LNG non è limitata dall'ossigeno o dalla superficie del combustibile, ma dal **tasso di vaporizzazione** del liquido causato dal flusso di calore proveniente dal suolo o dall'ambiente circostante[5].

Pertanto, il calcolo dell'HRR si articola secondo le metodologie (Fig 33 e 34) specifiche per i liquidi criogenici come segue:

$$\text{Densità LNG} = \rho = 420 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} [34] \quad \text{Eq. 21}$$

$$\text{Volume del serbatoio} = V = 115 \text{ L} \quad \text{Eq. 22}$$

$$\text{Altezza della pozza} = h = 5 \text{ mm (cemento)} \quad \text{Eq. 23}$$

| Superficie | h_{min} (mm) |
|------------------|----------------|
| Acqua calma | 1.8 |
| Cemento, pietra | 5 |
| Ghiaia | 10 |
| Pascolo | 20 |
| Terreno sabbioso | 25 |

Figura 33. Esempi di h_{min} (mm)[14]

$$\text{massa della pozza} = m_{pozza} = \rho * \left(\frac{\pi}{4} * D^2\right) * h = 48,3 \text{ kg} \quad \text{Eq. 24}$$

$$\text{Diametro e raggio della pozza} = D = 5,4 \text{ m e } r = 2,7 \text{ m} \quad \text{Eq. 25}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocità di bruciamento} = m'' &= 78 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{s}} = 0,078 \frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{s}} \quad \text{Eq. 26} \\ &= 0,00019 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned}$$

| Material | \dot{m}'' (g/m ² s) |
|---|----------------------------------|
| H ₂ (liquid) | 169 |
| LNG (mostly CH ₄) | 78 |
| LPG (mostly C ₃ H ₈) | 99 |
| Butane | 78 |
| Hexane | 74 |
| Heptane | 101 |
| Methanol | 17 |
| Ethanol | 15 |
| Benzene | 85 |
| Xylenes | 90 |
| Acetone | 41 |
| Diethyl ether | 85 |
| Gasoline | 55 |
| Kerosene | 39 |
| JP- 4 | 51 |
| JP- 5 | 54 |
| Transformer oil (hydrocarbon) | 39 |
| Fuel oil (heavy) | 35 |
| Crude oil | 22-45 |

Figura 34. Valori tabulati di burning rate

$$\text{Tempo di combustione} = \frac{h}{v_{comb}} = 26,5 \text{ s} \quad \text{Eq. 27}$$

$$\text{Potere calorifico inferiore} = PCI = 50000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{Eq. 28}$$

$$\begin{aligned} \text{Velocità di bruciamento complessiva} &= m = m'' * A & \text{Eq. 29} \\ &= 1,785 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

$$HRR = PCI * m = 89000 \text{ kW} \quad \text{Eq. 30}$$

$$HRRPUA = 3898 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad \text{Eq. 31}$$

Con tale potenza (89000kW) ed **un'altezza della fiamma di circa 11.5m**, si prevede che il risultato sarà impattante a livello di sicurezza della struttura.

A differenza dello scenario con batteria, dove è stata modellata l'intera evoluzione dell'incendio (dalla fuga termica all'estinzione, circa 90 minuti), lo scenario GNL presenta una durata nettamente inferiore, stimata in circa **26,5 secondi**. Questa

significativa differenza è dovuta al fatto che l'analisi si concentra unicamente sulla fase critica dell'**incendio della pozza di GNL (Pool Fire)**, fenomeno rapido e confinato alla superficie di rilascio, escludendo l'eventuale propagazione successiva ad altri materiali del veicolo.

REAZIONE

Analogamente al primo scenario, la sorgente di fuoco è stata implementata in PyroSim creando una **Surface** di tipo "**Burner**".

- **Dati di Input:** L'**HRRPUA (Heat Release Rate Per Unit Area)** e il **Ramp-Up Time** sono stati inseriti frazionando i valori tra 0 e 1, come calcolati in precedenza utilizzando le formule specifiche per la vaporizzazione di liquidi criogenici (Fig. 35 e 36).

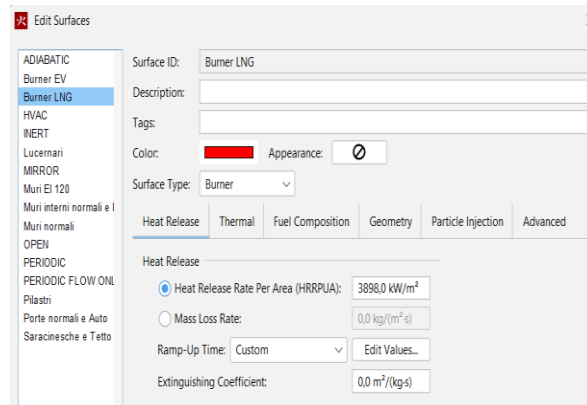


Figura 35. Impostazione dell'HRR

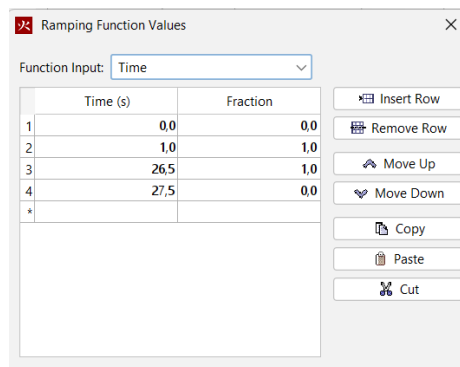
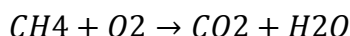


Figura 36. Impostazione del Ramp-Up Time

- **Chimica Semplice:** Essendo stata adottata l'ipotesi di **LNG puro (metano al 100%)**, la reazione chimica di combustione è stata considerata **semplice**.

È stata creata la **Specie "Metano"** e la reazione di combustione è stata impostata come "**Simple Chemistry**" (Fig. 37) in PyroSim, permettendo al software di riconoscere la trasformazione completa del reagente esclusivamente in CO₂ e H₂O.



Eq. 32

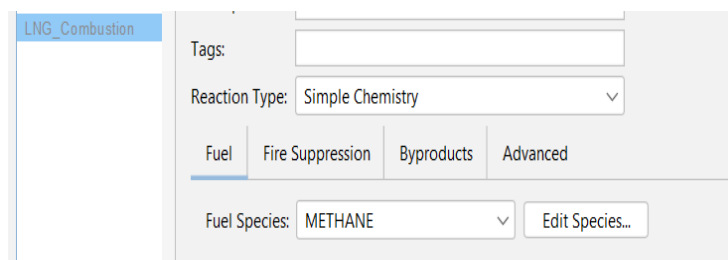


Figura 37. Impostazione della reazione

DEVICES

- **Devices:** Per l'impiego dei dispositivi di misurazione (*Devices*), si è deciso di non includere la **FIC** (*Fractional Irritant Concentration*) e altri dispositivi specifici per la tossicità irritante. Questa scelta è motivata dall'assenza di composti alogenati (come HCl e HF) nei prodotti della combustione del metano puro. Tuttavia, i dispositivi per l'esposizione termica (AST, IHF) e la FED tossica (per CO e CO₂) sono stati mantenuti, come alcune delle slices (Fig. 38).

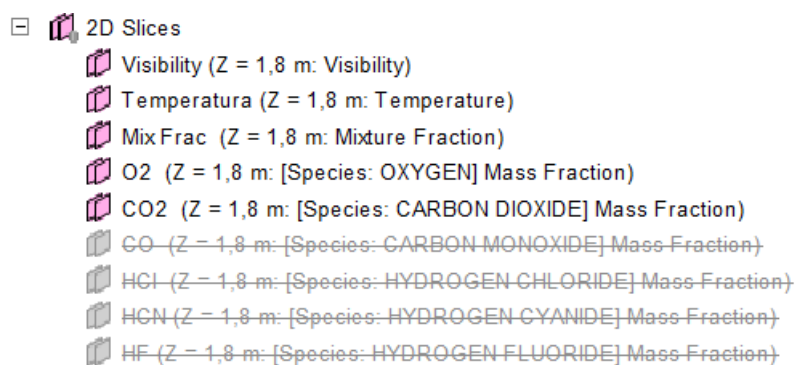


Figura 38. Slices impiegate

3.4.DEFINIZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO

L'ultimo elemento cruciale per la corretta esecuzione della simulazione è la scelta di una **griglia di calcolo (*mesh*) appropriata** in termini di dimensioni e risoluzione spaziale.

Considerando le dimensioni estese dell'autorimessa (circa 19.500m^2) e il numero elevato di veicoli, è necessario bilanciare l'accuratezza dei risultati con la sostenibilità computazionale.

La strategia di meshatura adottata è di tipo **adattivo e non uniforme**, focalizzata sulla risoluzione delle zone a maggiore gradiente termico e fluidodinamico. Poiché l'incendio è stato posizionato nel punto più sfavorevole (lontano dalle vie di esodo e vicino alle strutture portanti), le zone più vicine al focolare sono quelle a maggiore criticità e richiedono una risoluzione più elevata:

- **Zona Critica (Ad Alta Risoluzione):** Nelle immediate vicinanze del focolare (l'auto incendiata) e nei punti di maggiore interesse per l'analisi del danno strutturale, si è deciso di adottare una **maglia più stringente**. Per l'auto elettrica celle di dimensione pari a $0,25\text{m}$ (ovvero $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ se la mesh è uniforme su due dimensioni) mentre per auto ad LNG pari a $0,125\text{m}$. Questa risoluzione più fine assicura la corretta cattura dei dettagli del fenomeno (come i flussi di calore) e la raccolta di dati più precisi per la verifica delle soglie di rischio.
- **Zona Lontana (A Bassa Risoluzione):** Per tutto ciò che ricade al di fuori dei punti maggiormente critici, ovvero a una distanza superiore a circa $8\text{-}10\text{m}$ dall'auto in fiamme, è stata impiegata una maglia più grossolana con celle di dimensione pari a $0,50\text{m}$. Questa scelta rappresenta il **giusto compromesso** tra la velocità di calcolo e l'integrità dei risultati nelle regioni dove i fenomeni sono meno intensi.

La strategia di meshatura non uniforme è stata verificata tramite l'indice di risoluzione adimensionale $D^*/\Delta x$ (dove D^* è la lunghezza caratteristica del fuoco pari a $2,36\text{ m}$ e Δx è la dimensione della cella), garantendo che, **per l'auto elettrica**, la risoluzione spaziale adottata sia compatibile con i requisiti del modello LES di FDS raggiungendo un fattore di risoluzione di $9,44$ (valore che ricade

pienamente nell'intervallo accettabile tra 4 e 16 e si avvicina all'intervallo ideale compreso tra 10 e 12). Mentre si è calcolato il fattore di risoluzione adimensionale $D^*/\Delta x$ per l'auto ad LNG utilizzando il picco di potenza termica massima: $HRR_{max} = 89000kW$ ed esce fuori dal valore di risoluzione adatta; dunque, la cella non è sufficientemente adatta per risolvere in modo accurato la turbolenza del pennacchio di fiamma generato **ma mantiene comunque valida la quantificazione dell'irraggiamento termico.**

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Al termine dei calcoli, il codice di simulazione **FDS** genera diversi file di *output* essenziali per l'analisi dei risultati:

- **File SmokeView:** Utilizzato per l'analisi grafica e la visualizzazione tridimensionale (3D) dell'evoluzione dell'incendio, in termini di fumi, temperature e velocità.
- **File CSV (HRR):** Contiene i dati del **Rate of Heat Release (HRR)** nel tempo, permettendo la verifica dell'andamento termico.
- **File CSV (Devices):** Contiene i dati di campionamento dei diversi dispositivi di misurazione (*Devices*) installati, fondamentali per la valutazione quantitativa del rischio.

Tali dati verranno confrontati con i **parametri soglia di accettabilità** provenienti dal **Codice di Prevenzione Incendi** (D.M. 3 agosto 2015 s.m.i.) e correlati dalle ipotesi attuate per il caso specifico in esame.

RSET

Prima di procedere al confronto tra i risultati della simulazione e i parametri soglia, è necessario determinare l'**RSET** (*Required Safe Egress Time*), ovvero il tempo minimo richiesto agli occupanti per raggiungere un luogo sicuro. L'RSET sarà successivamente confrontato con l'**ASET** (*Available Safe Egress Time*), ricavato dalla simulazione FDS.

Per il calcolo dell'RSET è stata utilizzata la metodologia standardizzata definita dalla norma **ISO/TR 16738**, che scompone l'RSET nelle seguenti componenti:

- **Tempo di Rilevazione e Allarme**

Nel caso in studio non si disponevano di dati specifici riguardanti la presenza di eventuali dispositivi di rilevazione e allarme (ad esempio, rivelatori ottici di fumo). Pertanto, in via cautelativa e conservativa, si è assunto un tempo fisso di 5 minuti (300 secondi).

- **Tempo di Riconoscimento, Risposta e Movimento Iniziale**

Essendo l'autorimessa classificata come **pubblica**, essa rientra tipicamente in un'area in cui si prevede la presenza di occupanti:

- Categoria B: Occupanti "svegli" in un luogo "non familiare".
- Tipologia 2: Struttura contenente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo moderato all'incendio (altre auto adiacenti).

In base alla classificazione, si ritiene necessario il seguente tempo per l'elaborazione decisionale e l'inizio del movimento: 4,5 minuti (270 secondi).

- **Tempo di Movimento**

Il tempo di evacuazione è calcolato dividendo la distanza massima di esodo per la velocità media di camminamento. Per lo scenario in esame, il punto più sfavorevole (maggiore distanza in Figura 39) è stato identificato come il punto centrale dell'automobile.

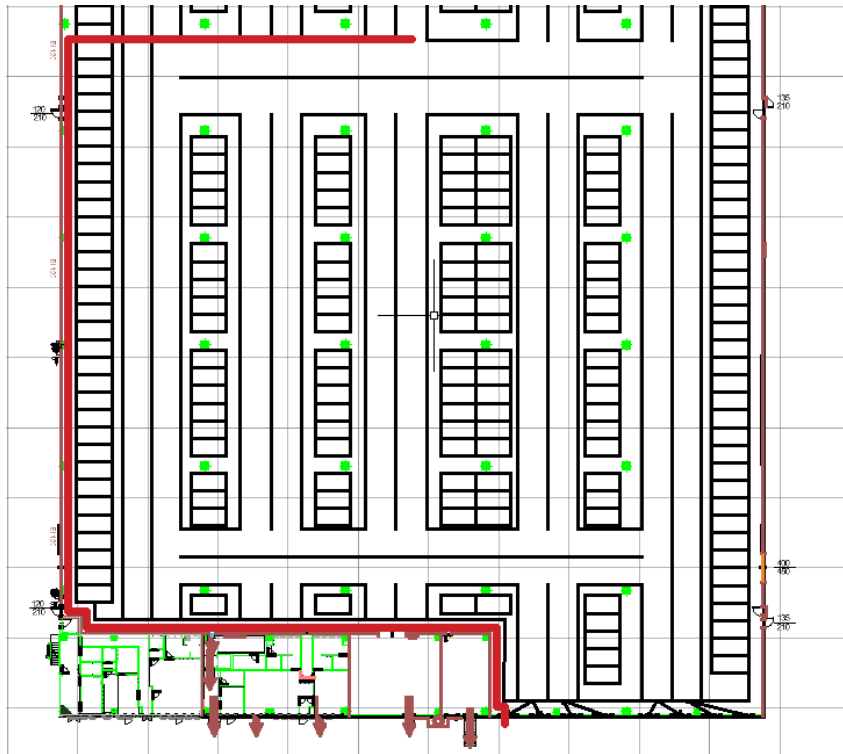


Figura 39. Via d'esodo critica

- **Distanza Massima:** 210m
- **Velocità Media:** 1m/s

Dunque, un tempo di movimento pari a 3,5 minuti (210 secondi).

Calcolo dell'RSET di progetto

Il Tempo di Esodo Sicuro Richiesto (RSET) di base è dato dalla somma delle tre componenti calcolate pari a 13 minuti (780 secondi).

Per assicurare la completa evacuazione e tenere conto di eventuali incertezze o ritardi non modellati, è stato aggiunto un margine di sicurezza pari al 10% del tempo totale calcolato.

- **Tempo Totale (con Margine):** 14 minuti e 18 secondi

Questo valore di rappresenta il **Tempo Obiettivo di Esodo Sicuro**. Conservativamente, si arrotonda all'eccesso per definire il **RSET di Progetto** (o *Design RSET*), che rappresenta il requisito minimo di tempo che l'autorimessa deve garantire per l'esodo.

- **RSET di Progetto:** 15 minuti (900 secondi)

Condizione di Verifica FSE:

Il modello FDS deve ora dimostrare che l'**ASET** (*Available Safe Egress Time*), ovvero il tempo disponibile prima che le condizioni ambientali diventino intollerabili (per temperatura, tossicità o visibilità), sia **maggiore** del RSET di Progetto

4.1. Veicoli Elettrici

La simulazione numerica relativa all'incendio del veicolo alimentato da una batteria agli ioni di litio è stata eseguita utilizzando l'input HRR(t) derivato dal test INERIS. Lo scenario ha avuto una durata totale di 5400 secondi. La simulazione è stata interrotta entro i 4700 secondi in quanto la curva del **HRR**, dopo aver superato la fase di picco, era entrata in una **fase stazionaria prossima allo zero**, indicando il quasi totale esaurimento del combustibile e l'estinzione dell'incendio stesso.

Di seguito vengono analizzati i risultati ottenuti in termini di tempi di sicurezza (ASET) e di impatto sulle strutture e persone.

4.1.1. HRR

Il primo passo nell'analisi dei risultati è la **validazione** della curva di rilascio di calore HRR ottenuta dal codice FDS. Questa verifica prevede il confronto tra:

1. La curva HRR(t) **simulata** (restituita dal *file CSV* di output del software).

2. La curva HRR(t) **teorica/sperimentale** (estrapolata dai dati INERIS e implementata come *input* del modello).

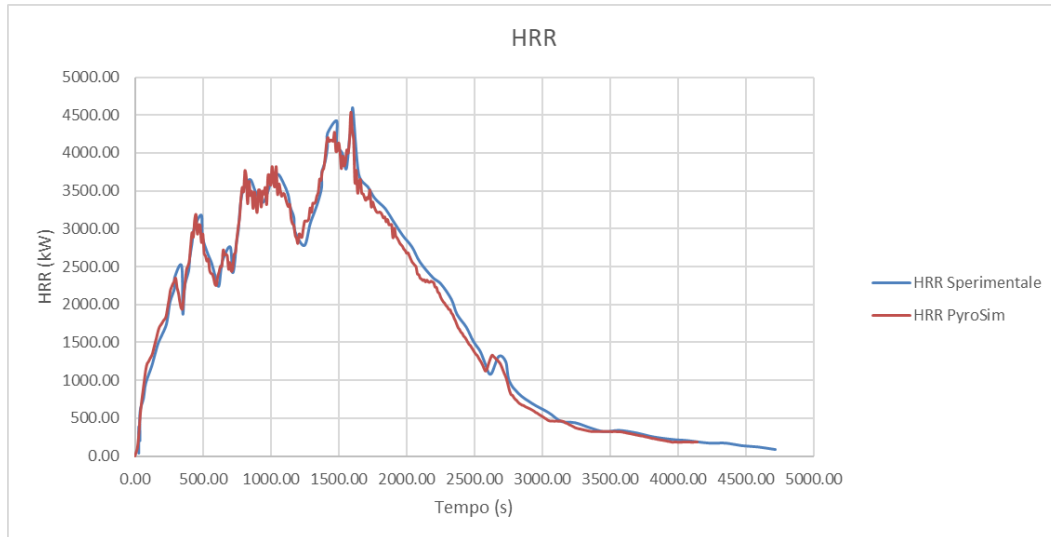


Figura 40. Confronto grafico dell'HRR sperimentale e da PyroSim

Come si evince dal confronto visuale tra i due andamenti in Figura 40, la curva elaborata da FDS **riproduce fedelmente** l'andamento sperimentale. Tale corrispondenza è cruciale, in quanto **deduce la consistenza e la robustezza** del risultato del software rispetto all'input modellato.

4.1.2. DEVICES

Un'analisi più approfondita, ai fini della valutazione del rischio, riguarda i dati ottenuti dai dispositivi di misurazione (*Devices*) installati nel dominio di calcolo. Questi dispositivi campionano le grandezze fisiche (come temperature, flussi di calore e concentrazioni di gas tossici) in specifici punti di interesse e ne restituiscono l'andamento nel tempo.

AST

L'analisi dell'**Adiabatic Surface Temperature** è essenziale per valutare l'esposizione termica a cui sono sottoposti i materiali strutturali (cemento armato, calcestruzzo, acciaio) e i veicoli adiacenti, al fine di stimare il rischio di collasso strutturale o di propagazione del fuoco.

- **Parametro Soglia Strutturale:** Assumendo le caratteristiche dei materiali da costruzione tipici (cemento armato e acciaio) e in linea con le procedure FSE, si è imposto un parametro strutturale soglia di 400 °C. Il superamento di questa soglia può indicare l'insorgenza di problemi legati al crollo o alla frattura dei materiali a causa della degradazione meccanica indotta dalla temperatura.
- **Risultati della Simulazione:** Analizzando i dispositivi AST posizionati sulle strutture e sui veicoli vicini, è emerso che i valori più significativi di temperatura si raggiungono esclusivamente sull'**auto più prossima** a quella incendiata. Tuttavia, anche in questo caso, i valori rimangono **al di sotto della soglia critica di 400 °C**.
- **Dati dei Campionamenti:** I 20 dispositivi AST che hanno registrato i valori massimi si collocano in un *range* compreso tra 399°C e 132°C.

L'andamento nel tempo degli AST più critici (i primi 3 dispositivi, Figura 41) e la boundary (Figura 42 e 43), con soglia in colore nero, illustrati nelle figure sottostanti, confermano che la soglia dei 400°C non viene mai raggiunta. Di conseguenza, il rischio di collasso strutturale o di propagazione immediata per irraggiamento alle strutture portanti e ai veicoli adiacenti è ritenuto **accettabile** per questo scenario.

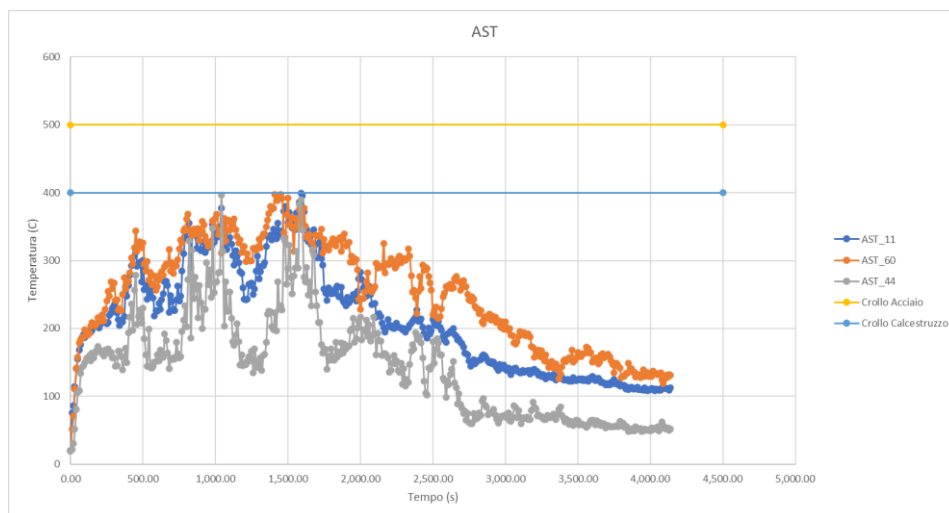


Figura 41. Andamento temporale dei valori degli AST critici

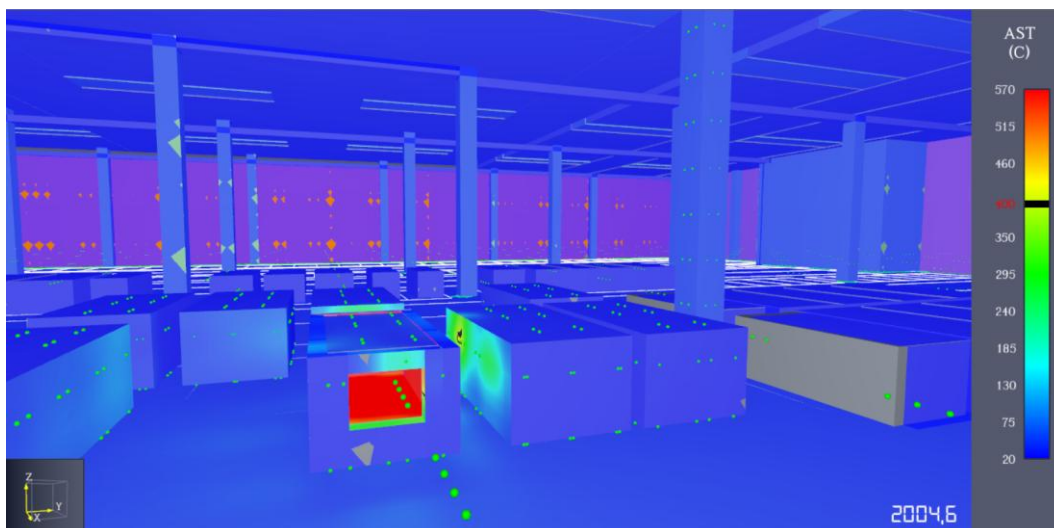


Figura 42. Boundary AST con soglia (in nero) per le strutture

L'analisi delle AST è stata impiegata anche per valutare l'esposizione termica diretta e indiretta degli occupanti durante l'esodo.

- **Parametro Soglia per l'Umano:** La soglia di temperatura critica per l'esposizione prolungata delle persone è fissata a 60°C.
- **Risultati e Analisi Temporale:** Diversi dispositivi hanno registrato il superamento di questo valore soglia; tuttavia, questo è avvenuto unicamente in un raggio limitato, a una distanza massima di circa **2 metri** dall'auto incendiata. Inoltre, il superamento è stato rilevato solo dopo un **tempo prolungato** dall'innesco dell'incendio, dunque, le persone si saranno già allontanate dall'area critica.

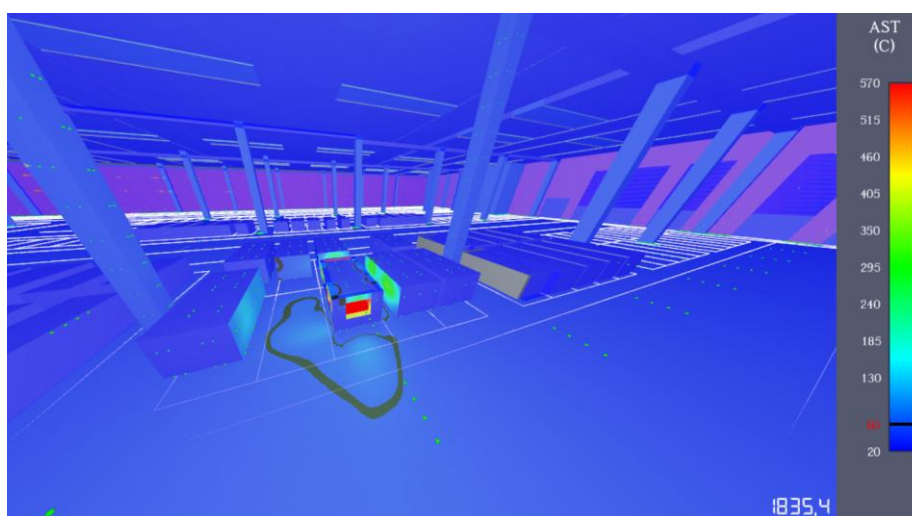


Figura 43. Boundary AST con soglia (in nero) per le persone

In conclusione, l'istante maggiormente critico relativo all'AST risulta essere a circa 1590 secondi (mostrato in Figura 44) quindi ben al di sopra del tempo necessario all'esodo degli occupanti.

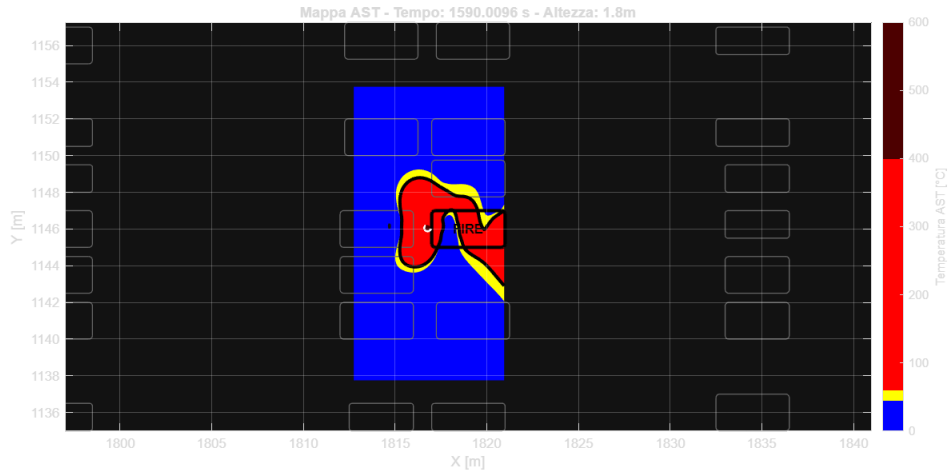


Figura 44. Mappa dell'andamento dei valori AST nell'istante critico

FIC

L'analisi della **Fractional Irritant Concentration** è fondamentale per valutare il rischio di incapacità o danni permanenti causati dall'inalazione di gas irritanti che sono caratteristici della decomposizione delle batterie agli ioni di litio.

- **Parametro Soglia Normativo:** Il criterio di accettabilità imposto dalla normativa (Codice di Prevenzione Incendi o letteratura FSE di riferimento) prevede che la FIC non superi il valore limite di 0.1.
- **Risultati della Simulazione:** I campionamenti effettuati dai *Devices* hanno mostrato che la concentrazione massima di irritanti toccano un valore massimo di 0.022 **in una posizione quasi adiacente al veicolo incendiato**.

Dato che il valore massimo simulato è **significativamente inferiore** al parametro soglia normativo, si deduce che i gas irritanti rilasciati non sono sufficienti a recare problemi di incapacità o danni gravi alle persone, neanche nelle immediate vicinanze del focolare.

L'andamento nel tempo dei 3 dispositivi che hanno registrato le concentrazioni più elevate (Fig. 45) e la slice relativa alla concentrazione di HF (Fig. 46) presente ad un'altezza di 1.8 metri, confermano questa conclusione, come mostrato nelle figure sottostanti.

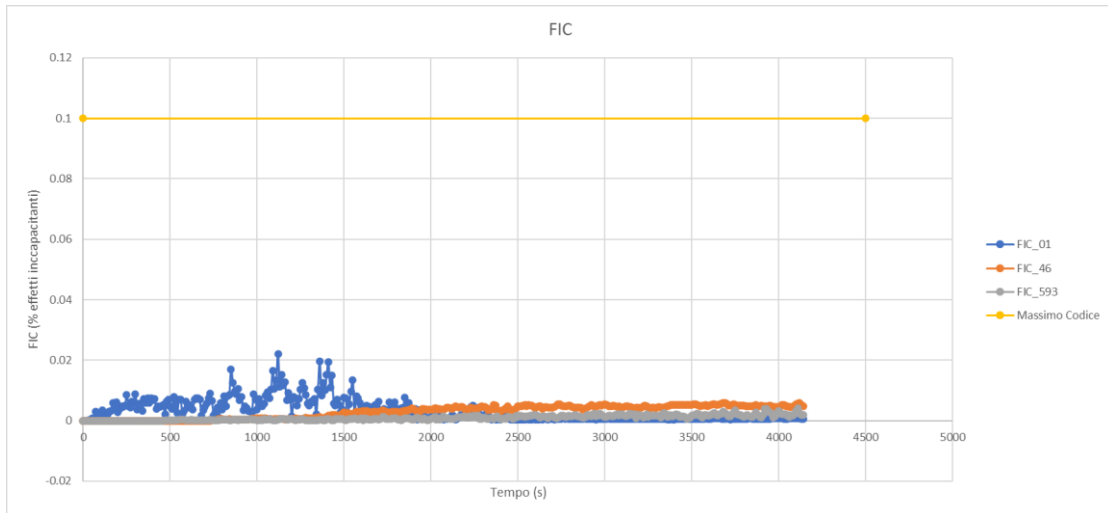


Figura 45. Andamento dei valori di FIC critici

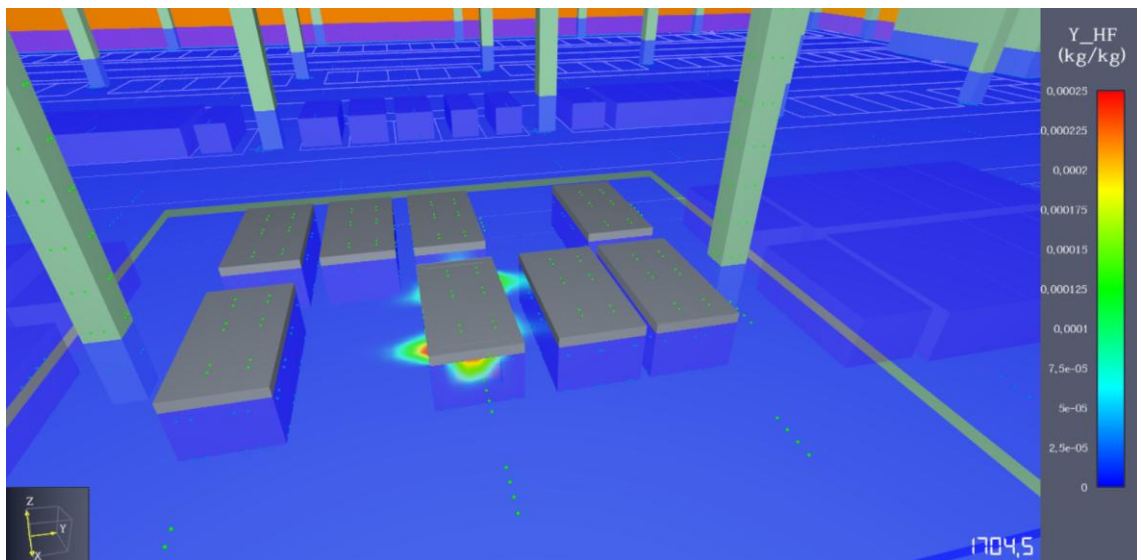


Figura 46. Slice dei valori FIC nell'istante critico

FED

L'analisi della **Fractional Effective Dose (FED)** è la misura più significativa per valutare il rischio di incapacità o morte dovuto all'inalazione di gas asfissianti, principalmente **monossido di carbonio** e, secondariamente, anidride carbonica.

- **Parametro Soglia Conservativo:** Ai fini di questa valutazione, si è adottato un criterio estremamente conservativo, imponendo il limite di $FED = 0.1$

come soglia critica per la sicurezza degli occupanti. Il superamento di questo valore definisce il potenziale ASET per la tossicità.

- **Risultati della Simulazione:** I dati di campionamento hanno rivelato che la maggior parte dei dispositivi FED installati all'interno dell'autorimessa rimane al di sotto della soglia. Tuttavia, **un solo dispositivo** (identificato come FED_01) ha registrato un valore superiore al limite imposto.
- **Dato Critico:** Il dispositivo FED_01, posizionato a una distanza di circa 1 metro dall'auto incendiata, ha raggiunto un valore massimo di 0.1598.

Dato che questo superamento avviene in una posizione estremamente prossima e non rappresentativa del percorso di esodo degli occupanti come mostrato in Figura 47, e considerando l'elevata cautela del criterio, si può concludere che il rischio di tossicità letale per la popolazione generale è contenuto.

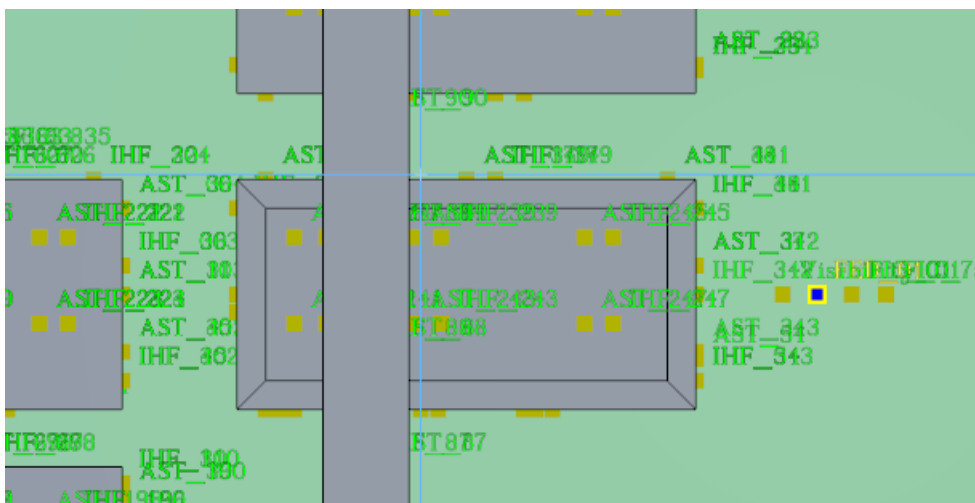


Figura 47. Posizione del FED_01

Il dispositivo FED_01 ha superato il criterio soglia conservativo di 0.1 in un tempo di 1360 secondi (Fig. 48 e 49).

Questo valore definisce l'ASET per lo scenario. Poiché l'ASET è significativamente **maggiore** dell'RSET di Progetto (900s), la condizione di verifica di sicurezza è pienamente soddisfatta per l'incendio della batteria.

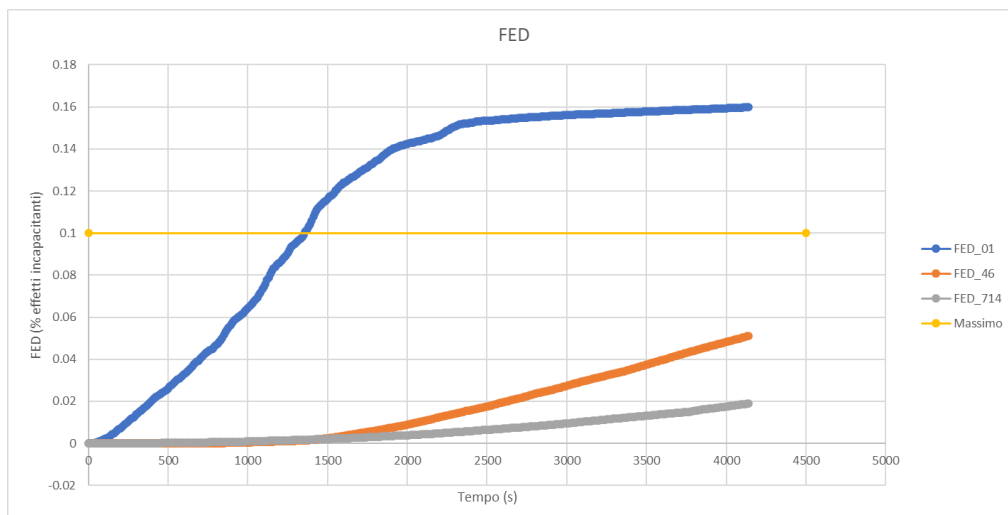


Figura 48. Andamento dei valori dei FED critici

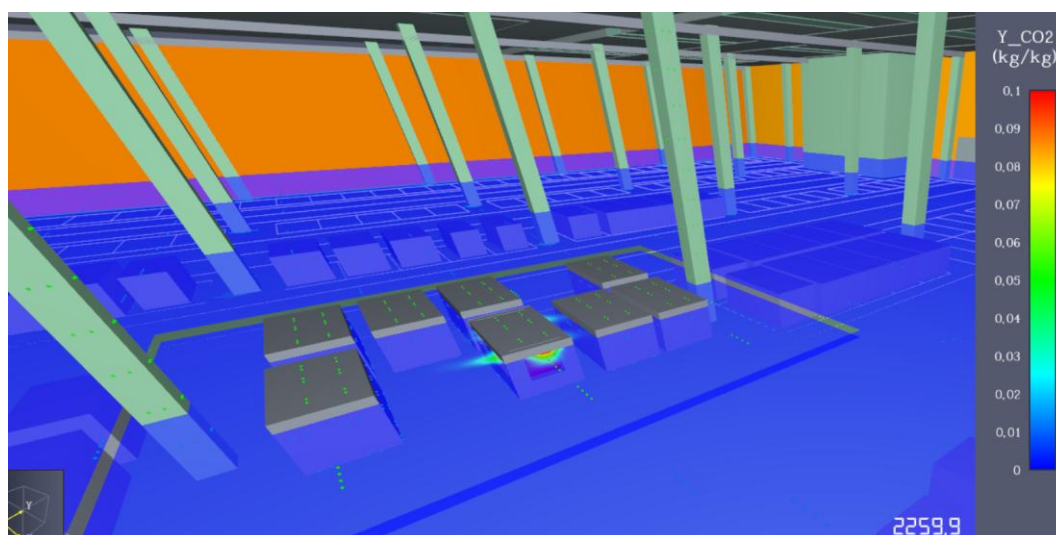


Figura 49. Slice dei FED all'istante critico

VISIBILITY

La visibilità è un parametro fondamentale per determinare la capacità degli occupanti di orientarsi e procedere verso le uscite in sicurezza. Il **Codice di Prevenzione Incendi** stabilisce i seguenti parametri soglia:

- **Esodo Occupanti:** Visibilità minima richiesta 10 metri.
- **Intervento Soccorritori (Vigili del Fuoco):** Visibilità minima richiesta 5 metri.

I dati di campionamento hanno mostrato il superamento dei parametri soglia in alcune aree, prevalentemente a causa dell'accumulo e della discesa dello strato di fumo.

- **Superamento Soglia Occupanti:** Sei dispositivi (*Visibility 46, 593, 715, 714, 595, 01*) hanno registrato una visibilità inferiore a 10m.
- **Superamento Soglia Soccorritori:** Solo un dispositivo (*Visibility 01*), posizionato a 1 metro dall'auto in fiamme, ha superato anche la soglia critica per i soccorritori.

Il dispositivo più critico (*Visibility 01*) riduce la visibilità a valori intollerabili dopo circa **30 secondi** dall'inizio dello scenario.

Tuttavia, gli altri dispositivi più rappresentativi, lungo i percorsi di esodo, registrano il superamento del parametro soglia solo a partire da 27 minuti.

Poiché l'ASET (1360 s) è antecedente al superamento generale della visibilità, la FED rimane il parametro limitante per l'ASET. La visibilità non rappresenta, pertanto, un ostacolo primario all'esodo degli occupanti prima che subentrino condizioni di tossicità critiche, valori interessanti si riscontrano dopo 850 secondi dall'evento incidentale (Fig. 50).

Analisi Visibilità (t = 850.001 s) - Vista Panoramica

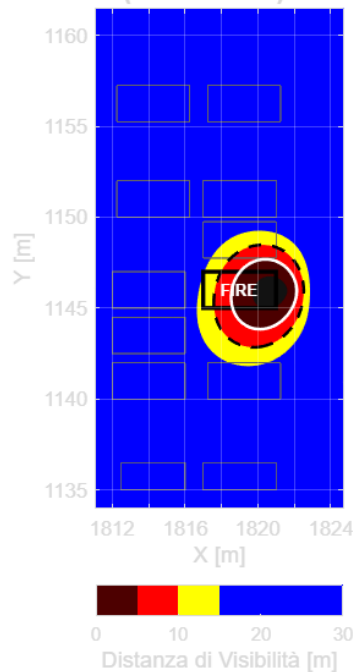


Figura 50. Mappa dei valori di Visibility all'istante critico

IHF

L'analisi dell'**Incident Heat Flux IHF** misura il flusso termico radiante che colpisce le superfici, valutando sia il rischio di propagazione dell'incendio ad altri oggetti/veicoli sia il rischio di ustioni per persone e soccorritori.

I valori limite proposti per l'irraggiamento termico sono i seguenti:

- **Oggetti e Strutture:** 12.6 kW/m² (per la propagazione del fuoco).
- **Soccorritori:** 3.0 kW/m² (soglia di sopportazione per un tempo limitato).
- **Persone (Esodo):** 2.5 kW/m² (soglia di tolleranza per ustioni di primo grado).

I dati registrati dai dispositivi mostrano che:

- **Rischio Strutture e Oggetti:** Si rilevano problemi a oggetti e strutture nelle due sonde più prossime al fuoco (IHF_79 e IHF_44).
- **Rischio Persone:** Nove sonde hanno superato la soglia critica per le persone, di cui otto anche per i soccorritori.

I massimi flussi di calore registrati e le relative soglie superate sono riassunti nella seguente tabella:

| Massimo IHF Raggiunto (kW/m²) | Dispositivo | Rischio Oggetti (≥12.6) | Rischio Soccorritori (≥3.0) | Rischio Persone (≥2.5) |
|---|--------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 17.85 | IHF_79 | Sì | Sì | Sì |
| 14.62 | IHF_44 | Sì | Sì | Sì |
| 12.09 | IHF_06 | No | Sì | Sì |
| 6.28 | IHF_60 | No | Sì | Sì |
| 5.99 | IHF_45 | No | Sì | Sì |
| 4.66 | IHF_303 | No | Sì | Sì |
| 4.65 | IHF_54 | No | Sì | Sì |
| 3.14 | IHF_339 | No | Sì | Sì |
| 2.93 | IHF_302 | No | No | Sì |

Tabella 5. Valori maggiormente critici degli IHF

L'analisi temporale è cruciale per discriminare gli effetti critici da quelli che non impattano l'esodo:

I dispositivi più vicini IHF_79 e IHF_44 raggiungono il valore soglia per le persone quasi istantaneamente (all'incirca dopo 20 secondi) e mantengono l'effetto fino alla fine dello scenario. Questo rende l'area a ridosso del fuoco **impraticabile** per l'esodo (Fig. 51).

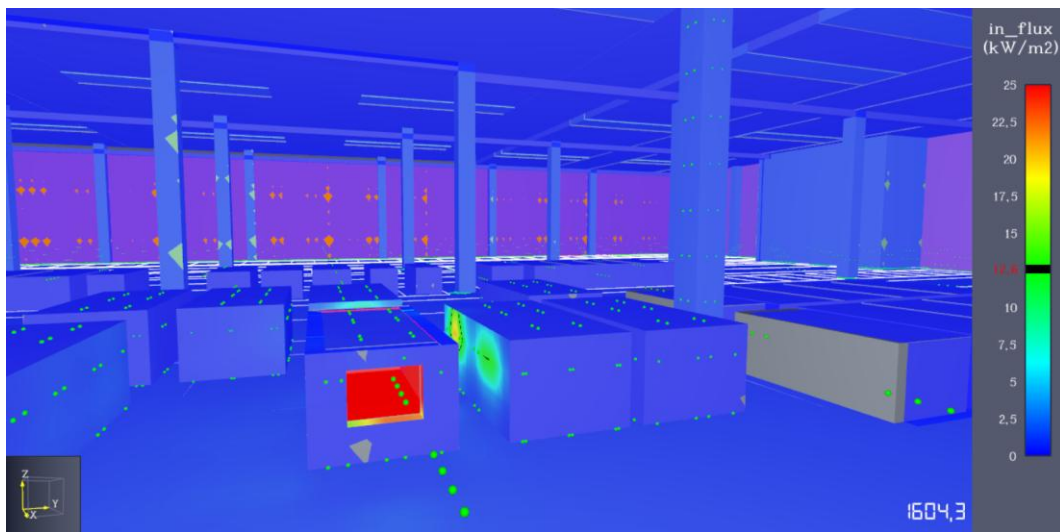


Figura 51. Boundary IHF nell'istante critico

Tuttavia, i dispositivi posti a distanze maggiori, comunque nell'intorno di 1 metro dall'auto incendiata, (IHF_54, 303, 59) mostrano effetti significativi sulle persone solo a partire dai 24 minuti in poi.

L'effetto sui materiali è localizzato e limitato nel tempo: per IHF_79 è compreso tra 23 e 28 minuti, mentre per IHF_44 la durata è di circa 10 secondi (Fig. 52 e 53).

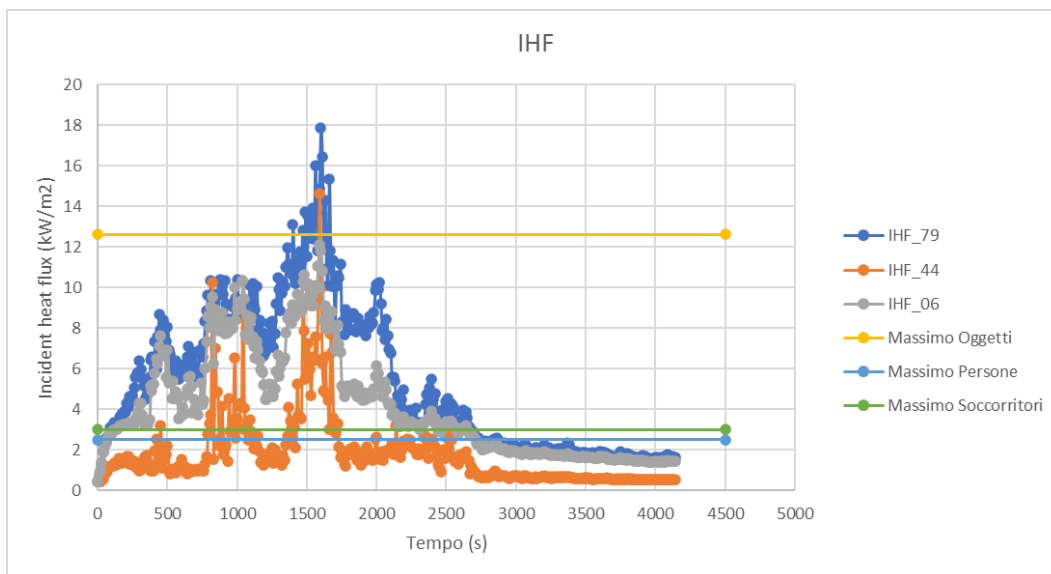


Figura 52. Andamento dei valori di IHF critici

È possibile riscontrare dal grafico come l'istante di maggiore criticità è all'incirca a 1590 secondi (Fig. 54) ma comunque ben al di sopra dell'ASET e dell'RSET di Progetto.

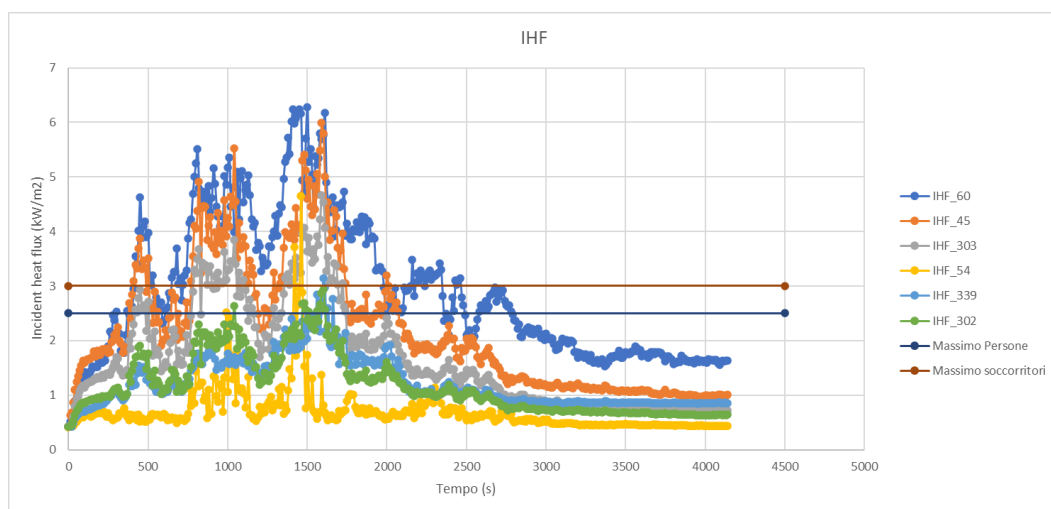


Figura 53. Andamento dei valori di IHF critici

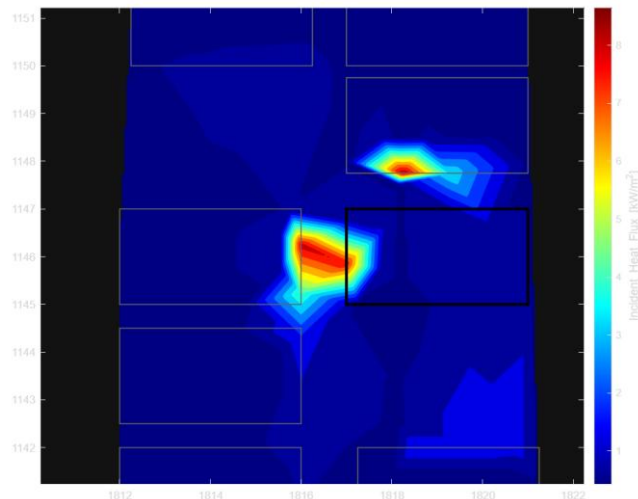


Figura 54. Mappa dei valori di IHF all'istante critico

Dunque, l'irraggiamento è critico solo nell'area immediatamente adiacente all'incendio, ma non limita l'ASET, che è stato precedentemente fissato a 1360 s dalla FED, un tempo ben antecedente agli effetti strutturali più diffusi.

I restanti dispositivi che hanno registrato superamenti del valore soglia per le persone a distanze leggermente maggiori (pur restando inferiori al metro) hanno raggiunto tali livelli critici circa 5-6 minuti dopo l'innesco dell'incendio. Considerando che le persone iniziano l'esodo quasi immediatamente, è lecito concludere che gli effetti termici pericolosi localizzati **non costituiscono un ostacolo reale** alla sicurezza della vita umana lungo i percorsi di esodo previsti.

4.2. Veicoli LNG

La simulazione del **pool fire dell'LNG**, seppur di brevissima durata (26.5 secondi), data la sua elevata potenza (89000 kW) avrà un **impatto** ben diverso dal caso descritto in precedenza.

Il processo di validazione per lo Scenario 2 (Incendio GNL) seguirà la stessa metodologia impiegata per lo Scenario 1.

4.2.1. HRR

Nel caso dell'LNG, la curva dell'HRR calcolata dai dati prelevati da FDS **non coincide** perfettamente con quella teorica, queste piccole differenze sono attribuibili alla natura numerica della simulazione e ai transitori di accensione e spegnimento.

Procedendo con il calcolo della media dei valori di HRR, considerando anche i valori minori di accensione e spegnimento, **il risultato coincide con il valore teorico atteso.**

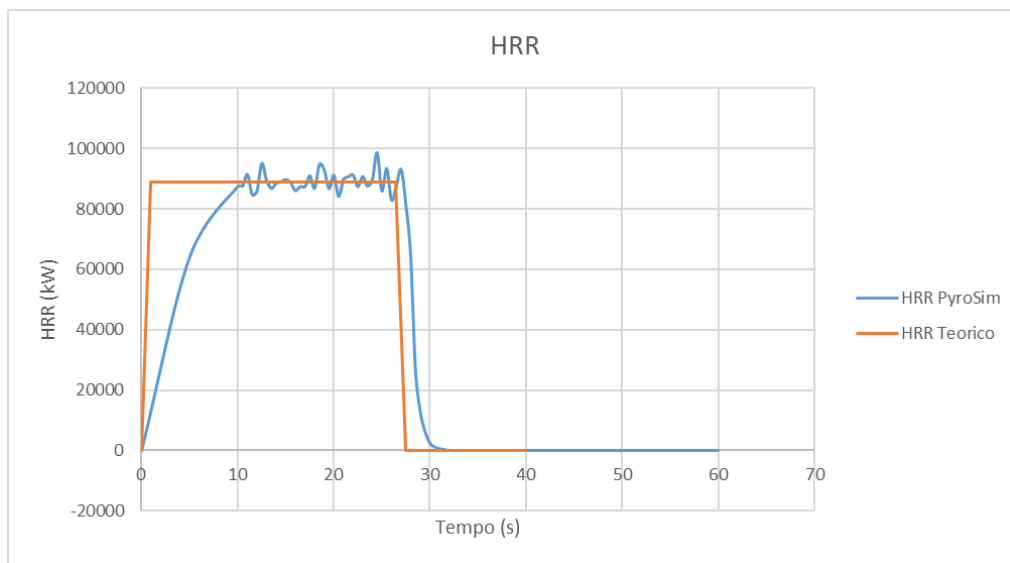


Figura 55. Confronto tra l'HRR teorico e PyroSim

4.2.2. DEVICES

AST

L'analisi dell'**Adiabatic Surface Temperature (AST)** per l'incendio GNL rivela un impatto termico estremamente severo, guidato dall'elevatissima potenza di picco. Le immagini seguenti mostrano la distribuzione delle temperature al tempo $t = 25.5$ s, istante di massima criticità del fenomeno mostrato in Figura 56 e 57.

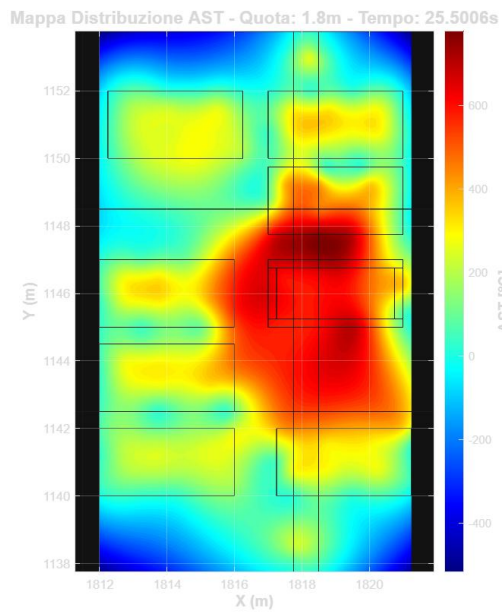


Figura 56. Mappa dei valori di AST all'istante critico, altezza uomo

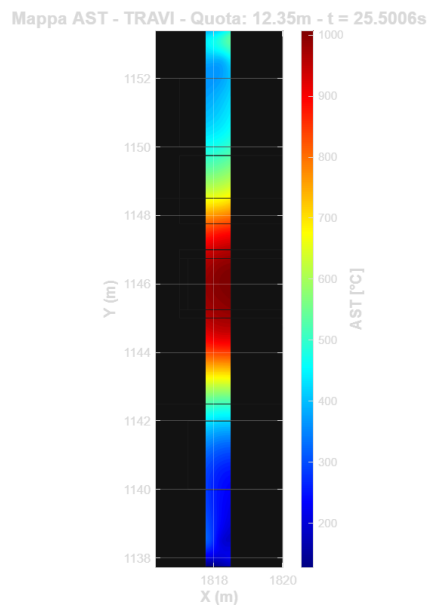


Figura 57. Mappa dei valori di AST all'istante critico, altezza trave

1. Rischio Strutturale e Propagazione del Fuoco

- **Distribuzione a Quota Uomo (1.8 m), Figura 56:** La mappa AST evidenzia come la soglia critica di 400°C per i materiali strutturali venga superata istantaneamente in un'area circolare molto vasta. Il picco termico raggiunge circa 1000°C in corrispondenza del focolare, coinvolgendo direttamente le auto adiacenti. Tale condizione pone un immediato pericolo

di *flashover* e propagazione rapida a causa della presenza di materiali combustibili meno resistenti (gomma e plastica).

- **Impatto sulle Strutture Superiori (12.35 m), Figura 57:** La mappa relativa alla quota delle travi mostra che l'impatto termico si estende verticalmente per l'intera altezza dell'autorimessa. La trave in acciaio posta direttamente sopra l'auto incendiata viene investita da temperature prossime ai **1000°C**. Sebbene l'evento abbia una durata limitata (26.5 s), l'intensità del calore su un'area così estesa (fino a **6.5 metri** di distanza per la soglia dei 400 °C) indica un rischio potenziale per la stabilità strutturale locale.

2. Rischio per la Vita Umana

- **Superamento Soglia:** La temperatura di **60°C**, limite di intollerabilità termica per gli occupanti, viene superata in pochi secondi.
- **Zona di Pericolo:** Dalla mappa di distribuzione a **1.8 metri**, si nota come l'area coinvolta da temperature pericolose sia estremamente ampia, estendendosi fino a **25 metri** dal punto di innesco.

Lo scenario GNL, a differenza di quello elettrico, è dominato dall'intensità termica immediata. Il superamento diffuso della soglia dei 60 °C fino a 25 m di distanza rende l'ambiente ostile all'esodo quasi istantaneamente, identificando il calore (e non la tossicità) come il principale fattore di rischio per la vita umana.

FIC, FED e VISIBILITY

In questo scenario, il combustibile primario è il metano, la cui reazione chimica produce principalmente CO₂ e vapore acqueo. Tuttavia, l'elevatissima potenza termica comporta il coinvolgimento immediato delle componenti plastiche e gommose dell'auto stessa e di quelle adiacenti, con la conseguente emissione di gas tossici e particolato (*soot*).

- **FED (Fractional Effective Dose) e FIC (Fractional Irritant Concentration):** Dall'analisi dei dispositivi emerge che i valori di **FED** e **FIC** rimangono ampiamente al di sotto delle soglie di sicurezza (0.1) per l'intera durata dell'evento. La brevità dell'incendio impedisce l'accumulo di concentrazioni letali o irritanti di CO o altri gas tossici, nonostante il

contributo dei materiali plastici delle auto coinvolte. La tossicità non costituisce quindi un fattore limitante per l'esodo in questo scenario.

- **Visibilità:**

A differenza dello scenario elettrico, dove il fumo era denso e persistente, qui la visibilità subisce probabilmente un crollo drastico solo nelle immediate vicinanze del focolare a causa del rilascio di fumo nero (*soot*) dalle componenti polimeriche dei veicoli.

- **Risultato:** La visibilità è destinata a scendere sotto i **10 metri** quasi istantaneamente, ma solo entro un raggio d'azione limitato.

Dato che l'evento termina in meno di 30 secondi, il fumo non ha il tempo di stratificare in modo uniforme in tutta l'autorimessa prima che l'incendio si estingua, permettendo una rapida ripresa delle condizioni di visibilità non appena i fumi iniziano a disperdersi.

Dunque, mentre per l'auto elettrica la **tossicità (FED)** era il parametro che determinava l'ASET (per via della durata), nello scenario GNL l'ASET è dettato esclusivamente dal **calore (AST/IHF)**, poiché le condizioni di tossicità e visibilità non diventano mai critiche su scala globale prima dello spegnimento del combustibile.

IHF

L'analisi dell'**Incident Heat Flux (IHF)** completa il quadro del rischio termico per lo scenario GNL, quantificando l'energia radiante emessa dal *pool fire*. Data l'elevata potenza termica di picco, i flussi radianti raggiungono valori estremi, seppur per una durata molto contenuta.

1. Mappe di Distribuzione Radiante all'Istante Critico (25.5 s)

Le mappe di distribuzione mostrano l'estensione del campo radiante nel momento di massima intensità dell'incendio:

- **Quota Uomo (1.8 m), Figura 58:** Il flusso radiante colpisce l'area circostante con valori che superano i **60 kW/m²** in prossimità del focolare. La zona di influenza critica per le persone (soglia $>2.5 \text{ kW/m}^2$) si estende fino a circa **6.5 metri** dall'auto incendiata.

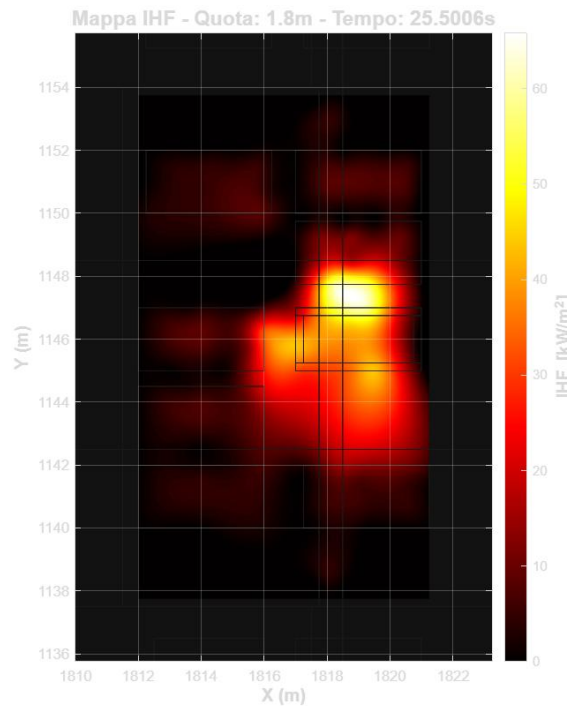


Figura 58. Mappa dei valori di IHF all'istante critico, altezza uomo

- **Quota Strutturale (12.35 m), Figura 59:** Sulla trave superiore, i valori di IHF sono ancora più severi a causa della vicinanza alla fiamma e del pennacchio termico, con picchi che superano i **150 kW/m²**. Questo irraggiamento estremo investe la struttura su tutta l'altezza della campata.

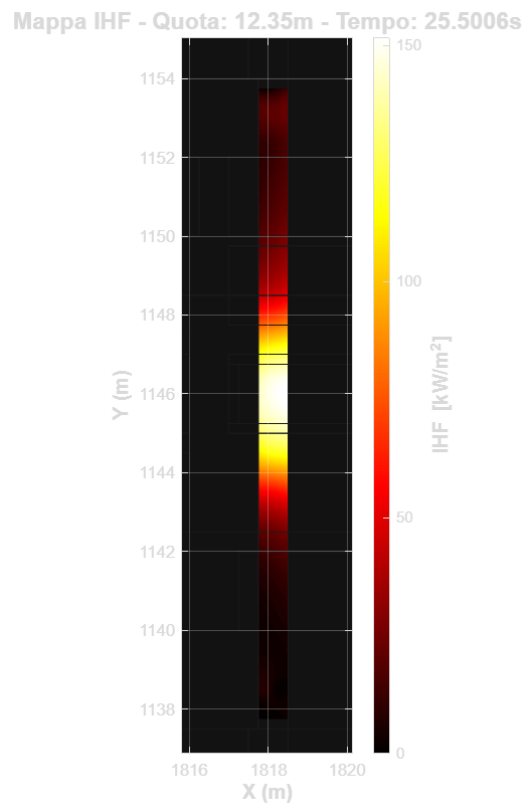


Figura 59. Mappa dei valori di IHF all'istante critico, altezza trave

2. Analisi dei Dispositivi Critici e Superamento Soglie

Dall'analisi dei dati estrapolati da FDS dei diversi devices e dei grafici di andamento temporale, si evince la severità dell'evento:

- **Rischio Oggetti e Strutture ($>12.6 \text{ kW/m}^2$), Figura 60:** Numerosissimi dispositivi superano questa soglia. I picchi massimi registrati sono estremi: **151.39 kW/m^2 (IHF_88)**, **145.50 kW/m^2 (IHF_89)** e **134.06 kW/m^2 (IHF_87)**. Tali valori indicano un potenziale danneggiamento immediato degli oggetti entro un raggio di circa **4 metri**.
- **Rischio Soccorritori e Persone (>3 e $>2.5 \text{ kW/m}^2$), Figura 60:** La quasi totalità dei sensori nell'area circostante rileva il superamento di questi limiti. Come evidenziato dal grafico IHF/Tempo, il picco radiante viene raggiunto tra i **15** e i **25 secondi**, per poi crollare quasi istantaneamente allo spegnimento del combustibile (26.5 s).

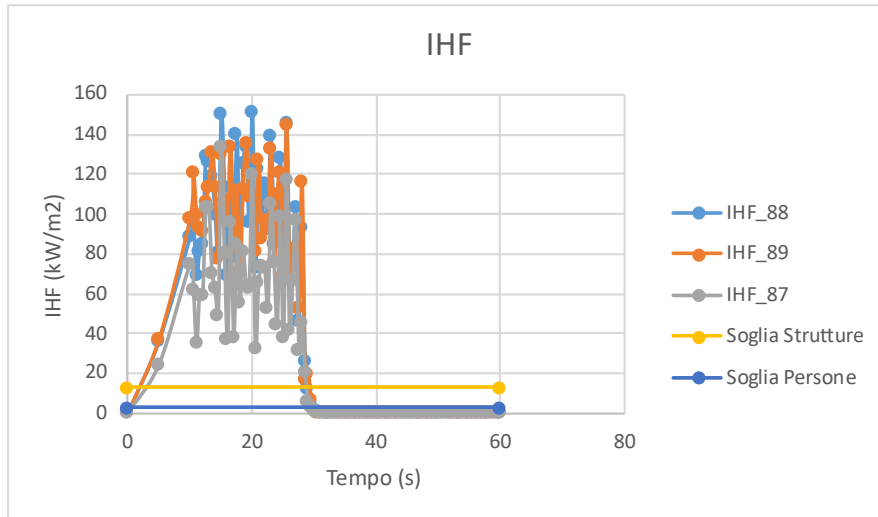


Figura 60. Andamento dei valori di IHF critici

3. Sintesi dell'Impatto

Nonostante la brevità del fenomeno, l'intensità radiante è tale da rendere l'area entro i **6.5 metri** assolutamente impraticabile per l'esodo e pericolosa per i soccorritori già dopo i primi **5 secondi** dall'innesco.

Lo scenario GNL conferma la sua natura di evento ad **alto impatto termico localizzato**.

4.3. Confronto

La differenza macroscopica dei due scenari risiede nel rilascio di energia. Lo scenario **LNG** è caratterizzato da un'intensità estrema ma breve come mostrato in Figura 55. Al contrario, lo scenario **EV** presenta una potenza di picco modesta ma una durata temporale ampia (**5000 secondi**) mostrato in Figura 40.

Dal punto di vista termico, lo scenario **LNG** è il più severo per le strutture. I valori di **IHF** e **AST** hanno evidenziato flussi radianti fino a **150 kW/m²** (Figura 58, 59 e 60) e temperature di **1000°C** sulle travi superiori (Figura 57). Tali valori, pur per pochi secondi, sono sufficienti a innescare potenziali danni strutturali e rendere l'area entro i 25 metri invivibile per l'uomo a causa del calore radiante. Nello scenario **EV**, invece, il calore rimane localizzato entro i 2 metri dal focolare (Figura

43), con temperature strutturali che non superano la soglia critica dei 400°C (Figura 41), rendendo il rischio di crollo o propagazione per irraggiamento molto più contenuto.

Per quanto riguarda l'analisi dell'ASET:

- **Scenario LNG:** Nonostante la potenza, non si registra un accumulo critico di gas tossici o un oscuramento della visibilità su larga scala. L'evento termina prima che i prodotti della combustione possano stratificare e saturare l'autorimessa. L'ASET per tossicità non viene mai raggiunto.
- **Scenario EV:** La durata prolungata permette alla **FED** di diventare il parametro limitante. La produzione costante di monossido di carbonio e irritanti porta al superamento della soglia di sicurezza a **1360 secondi (Figura 48)**.

5. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha permesso di analizzare e confrontare, mediante l'ausilio della fluidodinamica computazionale (software **FDS**), l'impatto sulla sicurezza antincendio di due tecnologie emergenti nel settore del trasporto privato: i veicoli elettrici con batterie agli **ioni di Litio (EV)** e i veicoli alimentati a **Gas Naturale Liquefatto (LNG)**. La sperimentazione numerica, condotta all'interno di un'autorimessa pubblica di riferimento, ha fornito dati quantitativi essenziali per valutare la compatibilità di tali veicoli con i parametri di sicurezza previsti dal **Codice di Prevenzione Incendi**.

La ricerca ha evidenziato la criticità di uno scenario emergenziale non è legata esclusivamente alla potenza termica massima sprigionata, ma dipende piuttosto alla combinazione tra natura dei prodotti della combustione e durata dell'evento.

- **Scenario LNG:** L'incendio da LNG è stato caratterizzato da una potenza termica di picco molto elevata (**76.5 MW**), ma con una durata estremamente contenuta (**< 30 secondi**). I risultati hanno dimostrato che il rischio primario è legato all'irraggiamento termico (**IHF**) e alla temperatura superficiale (**AST**). Con picchi di flusso radiante superiori a **150 kW/m²** e temperature locali di **1000°C**, lo scenario LNG rappresenta una minaccia severa per l'integrità strutturale locale (travi e solai) e per l'incolumità delle persone nel raggio di circa **25 metri**. Tuttavia, la brevità del fenomeno e la "pulizia" della combustione del metano hanno impedito l'accumulo di gas tossici, rendendo la tossicità un fattore trascurabile.
- **Scenario EV:** Al contrario, l'incendio della batteria agli ioni di Litio ha presentato una potenza decisamente inferiore (**~4.5 MW**), ma una durata prolungata di circa **5000 secondi**. In questo caso, il fattore limitante per l'esodo non è stato il calore, bensì l'accumulo sistematico di gas asfissianti e irritanti. La metrica **FED** (Fractional Effective Dose) è risultata essere il parametro determinante per il calcolo dell'**ASET**, raggiungendo la soglia critica di 0.1 dopo **1360 secondi**.

L'obiettivo principale della metodologia prestazionale (FSE) è garantire che il tempo disponibile per l'esodo sia superiore al tempo richiesto. Dalle analisi condotte è emerso che:

1. Per lo **scenario EV**, l'ASET di **1360 s** risulta superiore al **RSET di progetto di 900 s**. La sicurezza è dunque verificata, sebbene con un margine che viene progressivamente diminuito dalla persistenza dei fumi.
2. Per lo **scenario LNG**, nonostante l'intensità elevata, la durata dell'incendio è talmente breve da non consentire il superamento delle soglie tossiche o di visibilità su larga scala, sebbene l'area immediata al focolare diventi istantaneamente inospitale per via dell'irraggiamento.

Considerazioni Finali e Sviluppi Futuri

In conclusione, lo studio dimostra che l'inserimento di veicoli a propulsione alternativa in infrastrutture preesistenti richiede un cambio di gestione nella progettazione antincendio. Se per i combustibili tradizionali o gassosi l'attenzione deve essere focalizzata sulla resistenza al fuoco delle strutture e sui sistemi di compartimentazione per gestire carichi d'incendio elevati, per i veicoli elettrici la priorità si sposta sulla **gestione dei fumi** e sui **sistemi di rilevazione precoce**.

La persistenza dell'incendio EV e la produzione di gas tossici specifici (come HF e HCl) suggeriscono che i futuri standard di sicurezza per le autorimesse dovranno prevedere sistemi di ventilazione forzata (HVAC) più efficienti e procedure di intervento dei soccorritori mirate, data la difficoltà di estinzione delle batterie soggette a *thermal runaway*.

Questo lavoro conferma l'efficacia della modellazione CFD come strumento di supporto alle decisioni per il legislatore e per i progettisti, permettendo di trasformare sfide tecnologiche complesse in scenari di rischio gestibili attraverso soluzioni ingegneristiche basate sull'evidenza scientifica.

6. APPENDICI

6.1. Appendice A: Codice FDS Veicoli elettrici

Il tempo finale è stato impostato dopo 90 minuti dall'inizio dello scenario con un restart a 100 secondi per ovviare ad eventuali problemi durante il calcolo:

```
&TIME T_END=5400.0/  
&DUMP DT_BNDF=10.0, DT_DEVC=10.0, DT_HRR=10.0,  
DT_RESTART=100.0, DT_SLCF=10.0/
```

La suddivisione della mesh è stata fatta in modo tale che avessero all'incirca la stessa grandezza così da suddividere ogni mesh ad un processore:

```
&MESH ID='My_Mesh_50_6', IJK=102,98,29,  
XB=1757.0,1808.0,1154.0,1203.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=0/  
&MESH ID='My_Mesh_50_5', IJK=100,98,29,  
XB=1808.0,1858.0,1154.0,1203.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/  
&MESH ID='My_Mesh_25', IJK=62,66,58, XB=1811.5,1827.0,1137.5,1154.0,-  
0.5,14.0, MPI_PROCESS=2/  
&MESH ID='Mesh01', IJK=62,33,29, XB=1827.0,1858.0,1137.5,1154.0,-  
0.5,14.0, MPI_PROCESS=2/  
&MESH ID='My_Mesh_50_7', IJK=109,33,29,  
XB=1757.0,1811.5,1137.5,1154.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=3/  
&MESH ID='My_Mesh_50_3', IJK=202,33,29,  
XB=1757.0,1858.0,1121.0,1137.5,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=3/  
&MESH ID='My_Mesh_50_4', IJK=202,54,29,  
XB=1757.0,1858.0,1094.0,1121.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=4/  
&MESH ID='My_Mesh_50_2', IJK=202,57,29,  
XB=1757.0,1858.0,1065.5,1094.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=5/  
&MESH ID='My_Mesh_50_1', IJK=202,57,29,  
XB=1757.0,1858.0,1037.0,1065.5,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=6/
```

&MESH ID='Mesh02', IJK=202,59,29, XB=1757.0,1858.0,1007.5,1037.0,-
0.5,14.0, MPI_PROCESS=7/

Definizione delle specie partecipanti alla reazione:

&SPEC ID='PROPANE'/
&SPEC ID='NITROGEN DIOXIDE'/
&SPEC ID='WATER VAPOR'/
&SPEC ID='NITROGEN ATOM'/
&SPEC ID='HYDROGEN FLUORIDE'/
&SPEC ID='CARBON DIOXIDE'/
&SPEC ID='HYDROGEN CHLORIDE'/
&SPEC ID='NITRIC OXIDE'/
&SPEC ID='OXYGEN', LUMPED_COMPONENT_ONLY=.TRUE./
&SPEC ID='SOOT'/
&SPEC ID='OXYGEN ATOM'/
&SPEC ID='NITROGEN'/
&SPEC ID='CARBON MONOXIDE'/
&SPEC ID='HYDROGEN CYANIDE'/
&SPEC ID='EV_Fuel',
FORMULA='C0.9983H1.93666O0.48916N0.0021Cl0.0029F0.004'/

Definizione dell'aria:

&SPEC ID='AIR', BACKGROUND=T
SPEC_ID(1)='OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)=0.209797,
SPEC_ID(2)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)=0.790203 /

Definizione della reazione in gioco per la combustione del veicolo elettrico:

&REAC ID='EV_Combustion',
HEAT_OF_COMBUSTION=3.07E+4,
FUEL='EV_Fuel',
SPEC_ID_NU='AIR','EV_Fuel', 'HYDROGEN CYANIDE', 'NITROGEN
DIOXIDE', 'NITRIC OXIDE', 'HYDROGEN CHLORIDE', 'PROPANE',

'HYDROGEN FLUORIDE', 'CARBON MONOXIDE', 'SOOT','CARBON
DIOXIDE', 'WATER VAPOR', 'NITROGEN',
NU=-4.8057786,-1.0,3.0E-4,4.0E-4,1.4E-3,2.9E-3,3.5E-3,4.0E-
3,0.0227,0.1998,0.765,0.95073,3.797544/

Inserimento dei dispositivi di misurazione:

&DEVC ID='AST_195', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE
TEMPERATURE', XYZ=1812.75,1144.0,2.0, IOR=3/

&DEVC ID='IHF_195', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX',
XYZ=1814.028155,1143.25,2.0, IOR=3/

&DEVC ID='FIC_01', QUANTITY='FIC', XYZ=1822.356301,1146.0,1.8/

&DEVC ID='FED_01', QUANTITY='FED', XYZ=1822.056301,1146.0,1.8/

&DEVC ID='Visibility_01', QUANTITY='VISIBILITY',
XYZ=1821.756301,1146.0,1.8/

Introduzione dei materiali presenti in database e non con l'aggiunta delle specifiche
quali calore specifico, conduttività termica e densità:

&MATL ID='Calcestruzzo alleggerito EI120',

SPECIFIC_HEAT=1.0,

CONDUCTIVITY=0.3,

DENSITY=1000.0/

&MATL ID='STEEL',

FYI='Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',

SPECIFIC_HEAT=0.46,

CONDUCTIVITY=45.8,

DENSITY=7850.0,

EMISSIVITY=0.95/

&MATL ID='Acciaio Zincato (saracinesche e tetto)',

SPECIFIC_HEAT=0.896,

CONDUCTIVITY=40.0,

DENSITY=7850.0/

&MATL ID='Cemento Armato (Pilastri e muri)',

FYI='Pilastri e muri',

SPECIFIC_HEAT=0.893,

CONDUCTIVITY=1.5,

DENSITY=2400.0,

EMISSIVITY=0.94/

&MATL ID='CONCRETE (pavimento e muri interni)',

FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',

SPECIFIC_HEAT=1.04,

CONDUCTIVITY=1.8,

DENSITY=2280.0/

&MATL ID='PVC (Lucernari)',

FYI='NISTIR 1013-1 - NIST NRC Validation',

SPECIFIC_HEAT_RAMP='PVC (Lucernari)_SPECIFIC_HEAT_RAMP',

CONDUCTIVITY_RAMP='PVC (Lucernari)_CONDUCTIVITY_RAMP',

DENSITY=1380.0,

EMISSIVITY=0.95/

Creazione delle superfici da applicare alle obstructions:

&SURF ID='ADIABATIC',

COLOR='GRAY 80',

ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='Muri EI 120',

RGB=232,126,0,

MATL_ID(1,1)='Calcestruzzo alleggerito EI120',

MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,

THICKNESS(1)=0.25/

&SURF ID='Porte normali e Auto',

```

RGB=146,154,166,
MATL_ID(1,1)='STEEL',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/
&SURF ID='Saracinesche e Tetto',
RGB=146,162,165,
MATL_ID(1,1)='Acciaio Zincato (saracinesche e tetto)',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/
&SURF ID='Muri normali',
RGB=255,167,0,
MATL_ID(1,1)='Cemento Armato (Pilastrri e muri)',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/
&SURF ID='Pilastrri',
RGB=146,202,166,
MATL_ID(1,1)='Cemento Armato (Pilastrri e muri)',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/
&SURF ID='Muri interni normali e Paviemento',
RGB=146,202,166,
MATL_ID(1,1)='CONCRETE (paviemento e muri interni)',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/
&SURF ID='Lucernari',
RGB=146,202,183,
MATL_ID(1,1)='PVC (Lucernari)',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/

```

Superficie del burner alla quale è stato impostato l'HRRPUA ed il RAMP-UP
TIME:

&SURF ID='Burner EV',
 COLOR='RED',
 HRRPUA=872.44,
 RAMP_Q='Burner EV_RAMP_Q',
 TMP_FRONT=300.0/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=10.66, F=0.01/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=27.73, F=0.08/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=36.26, F=0.13/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=1580.33, F=0.96/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=1597.39, F=1.0/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=1605.92, F=0.81/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=4472.28, F=0.03/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=4591.71, F=0.02/
 &RAMP ID='Burner EV_RAMP_Q', T=4719.67, F=0.01/

Esempi di obstructions costruite per riprodurre la geometria dell'autorimessa a partire dal disegno in pianta:

&OBST ID='Burner EV', XB=1817.25,1820.75,1145.25,1146.75,0.5,0.75,
 SURF_IDS='Burner EV','ADIABATIC','ADIABATIC'/
 &OBST ID='Auto incendio', XB=1817.0,1821.0,1145.0,1147.0,0.5,0.5,
 SURF_ID='Porte normali e Auto'/
 &OBST ID='Auto', XB=1817.25,1821.25,1155.25,1157.25,0.0,1.5,
 SURF_ID='Porte normali e Auto'/
 &OBST ID='Auto', XB=1832.5,1836.5,1155.5,1157.0,0.0,1.5, SURF_ID='Porte
 normali e Auto'/
 &OBST ID='Porta', XB=1853.5,1856.5,1201.5,1202.0,0.0,3.0,
 SURF_ID='Saracinesche e Tetto'/
 &OBST ID='Lucernario', XB=1786.5,1789.0,1067.0,1078.5,13.0,13.5,
 SURF_ID='Lucernari'/
 &OBST ID='Muro interno', XB=1777.5,1792.0,1196.0,1196.5,0.0,12.5,
 SURF_ID='Muri interni normali e Paviamento'/

&OBST ID='Travi', XB=1777.5,1778.5,1009.0,1201.5,12.0,12.5,
SURF_ID='Porte normali e Auto'/

&OBST ID='Pilastro', XB=1817.5,1818.5,1019.5,1020.5,-7.21645E-16,12.5,
SURF_ID='Pilastrini'/

&OBST ID='Muro esterno', XB=1847.5,1849.0,1201.5,1202.0,0.0,12.5,
SURF_ID='Muri normali'/

&OBST ID='Pavimento', XB=1757.0,1858.0,1008.5,1037.0,-0.5,0.0,
SURF_ID='Muri interni normali e Pavimento'/

&HOLE ID='Finestrini incendio', XB=1817.5,1818.5,1146.75,1147.0,1.25,1.75/

&HOLE ID='Finestrini incendio', XB=1819.5,1820.5,1146.75,1147.0,1.25,1.75/

Condizioni al contorno della mesh con superficie "OPEN":

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1858.0,1858.0,1007.5,1037.0,-0.5,14.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1757.0,1007.5,1037.0,-0.5,14.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [YMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1007.5,1007.5,-0.5,14.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1007.5,1037.0,14.0,14.0/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1007.5,1037.0,-0.5,-0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_1 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1858.0,1858.0,1037.0,1065.5,-0.5,14.0/

&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_1 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1757.0,1037.0,1065.5,-0.5,14.0/

&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_1 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1037.0,1065.5,14.0,14.0/

&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_1 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1037.0,1065.5,-0.5,-0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_2 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1858.0,1858.0,1065.5,1094.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_2 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1757.0,1065.5,1094.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_2 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1065.5,1094.0,14.0,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_2 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1065.5,1094.0,-0.5,-0.5/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_4 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1858.0,1858.0,1094.0,1121.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_4 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1757.0,1094.0,1121.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_4 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1094.0,1121.0,14.0,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_4 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1094.0,1121.0,-0.5,-0.5/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_3 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1858.0,1858.0,1121.0,1137.5,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_3 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1757.0,1121.0,1137.5,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_3 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1121.0,1137.5,14.0,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_3 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1121.0,1137.5,-0.5,-0.5/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_7 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1757.0,1137.5,1154.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_7 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1811.5,1137.5,1154.0,14.0,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_7 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1811.5,1137.5,1154.0,-0.5,-0.5/
 &VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1858.0,1858.0,1137.5,1154.0,-0.5,14.0/

```

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1827.0,1858.0,1137.5,1154.0,14.0,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1827.0,1858.0,1137.5,1154.0,-0.5,-0.5/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_25 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1811.5,1827.0,1137.5,1154.0,14.0,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_25 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1811.5,1827.0,1137.5,1154.0,-0.5,-0.5/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_5 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1858.0,1858.0,1154.0,1203.0,-0.5,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_5 [YMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1808.0,1858.0,1203.0,1203.0,-0.5,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_5 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1808.0,1858.0,1154.0,1203.0,14.0,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_5 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1808.0,1858.0,1154.0,1203.0,-0.5,-0.5/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_6 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1757.0,1154.0,1203.0,-0.5,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_6 [YMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1808.0,1203.0,1203.0,-0.5,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_6 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1808.0,1154.0,1203.0,14.0,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_6 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1808.0,1154.0,1203.0,-0.5,-0.5/

```

Condizioni al contorno per le obstructions per definire il comportamento del fuoco e del calore a diretto contatto con i blocchi:

```
&BNDF QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE'/
```

```
&BNDF QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX'/
```

Definizione delle slices:

```
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', ID='Visibility', PBZ=1.8/
```

```

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temperatura', PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='OXYGEN', ID='O2 ',
PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE',
ID='CO2 ', PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE',
ID='CO ', PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='HYDROGEN
CHLORIDE', ID='HCl ', PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='HYDROGEN
CYANIDE', ID='HCN', PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='HYDROGEN
FLUORIDE', ID='HF', PBZ=1.8/

```

6.2. Appendice B: Codice FDS Veicoli a LNG

Con queste righe di codice si inserisce il tempo di fine (60 secondi) ed il tempo di campionamento (0.5 secondi) con il restart (10 secondi):

```

&TIME T_END=60.0/
&DUMP DT_BNDF=0.5, DT_DEVC=0.5, DT_HRR=0.5, DT_RESTART=10.0,
DT_SLCF=0.5/

```

Mesh applicate (0.125 m2 nell'intorno dell'incendio e 0.5m2 fuori):

```

&MESH ID='My_Mesh_12.5', IJK=124,132,116,
XB=1811.5,1827.0,1137.5,1154.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=0/
&MESH ID='My_Mesh_50_6', IJK=102,98,29,
XB=1757.0,1808.0,1154.0,1203.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/
&MESH ID='My_Mesh_50_5', IJK=100,98,29,
XB=1808.0,1858.0,1154.0,1203.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/
&MESH ID='Mesh01', IJK=62,33,29, XB=1827.0,1858.0,1137.5,1154.0,-
0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/

```

```

&MESH          ID='My_Mesh_50_7',          IJK=109,33,29,
XB=1757.0,1811.5,1137.5,1154.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/
&MESH          ID='My_Mesh_50_3',          IJK=202,33,29,
XB=1757.0,1858.0,1121.0,1137.5,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/
&MESH          ID='My_Mesh_50_4',          IJK=202,54,29,
XB=1757.0,1858.0,1094.0,1121.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/
&MESH          ID='My_Mesh_50_2',          IJK=202,57,29,
XB=1757.0,1858.0,1065.5,1094.0,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/
&MESH          ID='My_Mesh_50_1',          IJK=202,57,29,
XB=1757.0,1858.0,1037.0,1065.5,-0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/
&MESH ID='Mesh02', IJK=202,59,29, XB=1757.0,1858.0,1007.5,1037.0,-
0.5,14.0, MPI_PROCESS=1/

```

Reazione di combustione del metano:

```

&REAC ID='LNG_Combustion',
      FUEL='METHANE',
      HEAT_OF_COMBUSTION=5.0E+4,
      RADIATIVE_FRACTION=0.2/

```

Esempi di alcuni devices impiegati:

```

&DEVC ID='IHF_01', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX',
XYZ=1813.75,1150.0,1.5, IOR=-2/

```

```

&DEVC ID='IHF_02', QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX',
XYZ=1817.0,1148.0,1.5, IOR=-1/

```

```

&DEVC ID='AST_01', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE
TEMPERATURE', XYZ=1813.5,1150.0,1.5, IOR=-2/

```

```

&DEVC ID='AST_02', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE
TEMPERATURE', XYZ=1817.0,1149.5,1.5, IOR=-1/

```

```

&DEVC ID='FIC_01', QUANTITY='FIC', XYZ=1822.356301,1146.0,1.8/

```

```

&DEVC ID='FIC_02', QUANTITY='FIC', XYZ=1824.6,1146.0,1.8/

```

&DEVC ID='FED_01', QUANTITY='FED', XYZ=1822.056301,1146.0,1.8/

&DEVC ID='FED_02', QUANTITY='FED', XYZ=1824.3,1146.0,1.8/

&DEVC ID='Visibility_01', QUANTITY='VISIBILITY',
XYZ=1821.756301,1146.0,1.8/

&DEVC ID='Visibility_02', QUANTITY='VISIBILITY',
XYZ=1824.0,1146.0,1.8/

Materiali:

&MATL ID='Calcestruzzo alleggerito EI120',

SPECIFIC_HEAT=1.0,

CONDUCTIVITY=0.3,

DENSITY=1000.0/

&MATL ID='STEEL',

FYI='Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',

SPECIFIC_HEAT=0.46,

CONDUCTIVITY=45.8,

DENSITY=7850.0,

EMISSIVITY=0.95/

&MATL ID='Acciaio Zincato (saracinesche e tetto)',

SPECIFIC_HEAT=0.896,

CONDUCTIVITY=40.0,

DENSITY=7850.0/

&MATL ID='Cemento Armato (Pilastrini e muri)',

FYI='Pilastrini e muri',

SPECIFIC_HEAT=0.893,

CONDUCTIVITY=1.5,

DENSITY=2400.0,

EMISSIVITY=0.94/

&MATL ID='CONCRETE (pavimento e muri interni)',

FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',

SPECIFIC_HEAT=1.04,
CONDUCTIVITY=1.8,
DENSITY=2280.0/
&MATL ID='PVC (Lucernari)',
FYI='NISTIR 1013-1 - NIST NRC Validation',
SPECIFIC_HEAT_RAMP='PVC (Lucernari)_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
CONDUCTIVITY_RAMP='PVC (Lucernari)_CONDUCTIVITY_RAMP',
DENSITY=1380.0,
EMISSIVITY=0.95/

Superfici da applicare alle obstruction:

&SURF ID='Muri EI 120',
RGB=232,126,0,
MATL_ID(1,1)='Calcestruzzo alleggerito EI120',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/

&SURF ID='Porte normali e Auto',
RGB=146,154,166,
MATL_ID(1,1)='STEEL',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/

&SURF ID='Saracinesche e Tetto',
RGB=146,162,165,
MATL_ID(1,1)='Acciaio Zincato (saracinesche e tetto)',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/

&SURF ID='Muri normali',
RGB=255,167,0,
MATL_ID(1,1)='Cemento Armato (Pilastrini e muri)',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.25/

&SURF ID='Pilastrini',

```

    RGB=146,202,166,
    MATL_ID(1,1)='Cemento Armato (Pilastrini e muri)',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.25/
&SURF ID='Muri interni normali e Paviamento',
    RGB=146,202,166,
    MATL_ID(1,1)='CONCRETE (pavimento e muri interni)',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.25/
&SURF ID='Lucernari',
    RGB=146,202,183,
    MATL_ID(1,1)='PVC (Lucernari)',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.25/

```

Superficie del Burner con l'HRRPUA calcolato ed il ramp_up time:

```

&SURF ID='Burner LNG',
    COLOR='RED',
    HRRPUA=3898.0,
    RAMP_Q='Burner LNG_RAMP_Q',
    TMP_FRONT=300.0/
&RAMP ID='Burner LNG_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='Burner LNG_RAMP_Q', T=1.0, F=1.0/
&RAMP ID='Burner LNG_RAMP_Q', T=26.5, F=1.0/
&RAMP ID='Burner LNG_RAMP_Q', T=27.5, F=0.0/

```

Esempi di alcune obstructions utilizzate:

```

&OBST ID='Auto incendio', XB=1817.0,1821.0,1145.0,1147.0,0.5,0.5,
SURF_ID='Porte normali e Auto'/
&OBST ID='Tetto', XB=1757.0,1766.5,1049.5,1061.0,12.5,13.0,
SURF_ID='Saracinesche e Tetto'/

```

```

&OBST      ID='Lucernario',      XB=1786.5,1789.0,1067.0,1078.5,13.0,13.5,
SURF_ID='Lucernari'/
&OBST      ID='Travi',           XB=1797.5,1798.5,1124.0,1154.0,12.5,12.75,
SURF_ID='Porte normali e Auto'/
&OBST      ID='Pilastro',        XB=1757.5,1758.5,1200.5,1201.5,-7.21645E-16,12.5,
SURF_ID='Pilastrini'/
&OBST      ID='Pavimento',       XB=1757.0,1858.0,1037.0,1065.5,-0.5,0.0,
SURF_ID='Muri interni normali e Paviemento'/

```

```

&HOLE ID='Finestrino auto', XB=1820.75,1821.0,1145.5,1146.5,1.0,1.75/

```

Mesh impostate con "OPEN":

```

&VENT      ID='Mesh Vent: Mesh02 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1858.0,1858.0,1007.5,1037.0,-0.5,14.0/
&VENT      ID='Mesh Vent: Mesh02 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1757.0,1007.5,1037.0,-0.5,14.0/
&VENT      ID='Mesh Vent: Mesh02 [YMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1007.5,1007.5,-0.5,14.0/
&VENT      ID='Mesh Vent: Mesh02 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1007.5,1037.0,14.0,14.0/
&VENT      ID='Mesh Vent: Mesh02 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1007.5,1037.0,-0.5,-0.5/
&VENT      ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_1 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1858.0,1858.0,1037.0,1065.5,-0.5,14.0/
&VENT      ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_1 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1757.0,1037.0,1065.5,-0.5,14.0/
&VENT      ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_1 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1037.0,1065.5,14.0,14.0/
&VENT      ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_1 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1858.0,1037.0,1065.5,-0.5,-0.5/
&VENT      ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_2 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1858.0,1858.0,1065.5,1094.0,-0.5,14.0/

```

&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_2 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1757.0,1065.5,1094.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_2 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1065.5,1094.0,14.0,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_2 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1065.5,1094.0,-0.5,-0.5/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_4 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1858.0,1858.0,1094.0,1121.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_4 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1757.0,1094.0,1121.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_4 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1094.0,1121.0,14.0,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_4 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1094.0,1121.0,-0.5,-0.5/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_3 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1858.0,1858.0,1121.0,1137.5,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_3 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1757.0,1121.0,1137.5,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_3 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1121.0,1137.5,14.0,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_3 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1858.0,1121.0,1137.5,-0.5,-0.5/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_7 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1757.0,1137.5,1154.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_7 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1811.5,1137.5,1154.0,14.0,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_7 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1757.0,1811.5,1137.5,1154.0,-0.5,-0.5/
 &VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1858.0,1858.0,1137.5,1154.0,-0.5,14.0/
 &VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
 XB=1827.0,1858.0,1137.5,1154.0,14.0,14.0/

```

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1827.0,1858.0,1137.5,1154.0,-0.5,-0.5/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_25 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1811.5,1827.0,1137.5,1154.0,14.0,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_25 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1811.5,1827.0,1137.5,1154.0,-0.5,-0.5/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_5 [XMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1858.0,1858.0,1154.0,1203.0,-0.5,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_5 [YMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1808.0,1858.0,1203.0,1203.0,-0.5,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_5 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1808.0,1858.0,1154.0,1203.0,14.0,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_5 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1808.0,1858.0,1154.0,1203.0,-0.5,-0.5/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_6 [XMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1757.0,1154.0,1203.0,-0.5,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_6 [YMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1808.0,1203.0,1203.0,-0.5,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_6 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1808.0,1154.0,1203.0,14.0,14.0/
&VENT ID='Mesh Vent: My_Mesh_50_6 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN',
XB=1757.0,1808.0,1154.0,1203.0,-0.5,-0.5/

```

Alcune VENT utilizzate per il burner, a descrivere una circonferenza di diametro 5 m:

```

&VENT ID='Burner LNG', SURF_ID='Burner LNG',
XB=1818.5,1818.75,1146.0,1146.25,0.0,0.0/
&VENT ID='Burner LNG', SURF_ID='Burner LNG',
XB=1818.75,1819.0,1146.0,1146.25,0.0,0.0/

```

Boundaries:

```

&BNDF QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE/'

```

```
&BNDF QUANTITY='INCIDENT HEAT FLUX/'
```

Slices:

```
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', ID='Visibility', PBZ=1.8/
```

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temperatura', PBZ=1.8/
```

```
&SLCF QUANTITY='MIXTURE FRACTION', ID='Mix Frac ', PBZ=1.8/
```

```
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='OXYGEN', ID='O2 ',  
PBZ=1.8/
```

```
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON DIOXIDE',  
ID='CO2 ', PBZ=1.8/
```

```
&SLCF QUANTITY='MASS FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE',  
ID='CO ', PBZ=1.8/
```

6.3. Appendice C: Esempio di codice MATLAB per la mappatura dei devices

```
%% 1. PARAMETRI
```

```
fds_file = 'LNG.fds.txt';
```

```
xls_file = 'Risultati LNG.xlsx';
```

```
z_target = 1.8;
```

```
t_target = 25.5;
```

```
%% 2. LETTURA FILE FDS (Filtro IHF)
```

```
fid = fopen(fds_file, 'r'); coords = []; is_ihf = []; obs = [];
```

```
while ~feof(fid)
```

```
tline = fgetl(fid);
```

```
if ~ischar(tline), break; end
```

```
if contains(tline, '&DEVC')
```

```
xyz = str2double(regexpi(tline, 'XYZ\s*=\s*([\d\.-]+),([\d\.-]+),([\d\.-]+)', 'tokens',  
'once'));
```

```
if ~isempty(xyz)
```

```

coords = [coords; xyz];
is_ihf = [is_ihf; contains(upper(tline), 'INCIDENT HEAT FLUX')];
end
elseif contains(tline, '&OBST') && contains(tline, 'XB')
xb = str2double(regexpi(tline, 'XB\s*=\s*([\d\.-]+),([\d\.-]+),([\d\.-]+),([\d\.-]+),([\d\.-]+),([\d\.-]+)', 'tokens', 'once'));
if ~isempty(xb), obs = [obs; xb]; end
end
end
fclose(fid);
is_ihf = logical(is_ihf);

%% 3. LETTURA EXCEL
data_raw = readmatrix(xls_file, 'Sheet', 'Devices', 'Range', 'A3:ELB106');
time = data_raw(:,1);
[~, idx_t] = min(abs(time - t_target));
vals_row = data_raw(idx_t, 2:end);
n_col = min(length(vals_row), length(is_ihf));
v = vals_row(is_ihf(1:n_col));
c = coords(is_ihf(1:n_col), :);

%% 4. FILTRO QUOTA E RIMOZIONE NEGATIVI/DUPLICATI
idx_z = abs(c(:,3) - z_target) < 0.8;
x_f = c(idx_z, 1); y_f = c(idx_z, 2); v_f = v(idx_z);
v_f(v_f < 0) = 0; % Vincolo fisico: no IHF negativo
valid = isfinite(v_f);
x_f = x_f(valid); y_f = y_f(valid); v_f = v_f(valid);
[u_coords, ~, idx_u] = unique([x_f, y_f], 'rows');
v_u = accumarray(idx_u, v_f, [], @mean);

%% 5. GRIDDING
[xq, yq] = meshgrid(linspace(min(x_f), max(x_f), 300), ...

```

```

linspace(min(y_f), max(y_f), 300));
zq = griddata(u_coords(:,1), u_coords(:,2), v_u, xq, yq, 'v4');
zq(zq < 0) = 0;

%% 6. PLOT
figure('Color','w','Position', [50 100 1200 700]);
contourf(xq, yq, zq, 100, 'LineColor', 'none'); hold on;
for i = 1:size(obs,1)
rectangle('Position',[obs(i,1), obs(i,3), obs(i,2)-obs(i,1), obs(i,4)-obs(i,3)], ...
'EdgeColor',[0.1 0.1 0.1], 'LineWidth', 0.6);
end
colormap(hot); hcb = colorbar; % Hot è meglio per il flusso radiante
ylabel(hcb, 'IHF [kW/m^2]', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
title(['Mappa IHF - Quota: ', num2str(z_target), 'm - Tempo: ',
num2str(time(idx_t)), 's'], 'FontSize', 14);
xlabel('X (m)', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold'); ylabel('Y (m)', 'FontSize', 12,
'FontWeight', 'bold');
axis equal; grid on;
xlim([min(x_f)-2 max(x_f)+2]); ylim([min(y_f)-2 max(y_f)+2]);

```


7. BIBLIOGRAFIA

- [1] [«https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20190313STO31218/emissioni-di-co2-delle-auto-i-numeri-e-i-dati-infografica»](https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20190313STO31218/emissioni-di-co2-delle-auto-i-numeri-e-i-dati-infografica).
- [2] «European Environment Agency (EEA), 2021. “Transport emissions of greenhouse gases in Europe”».
- [3] [«https://www.acea.auto/fact/fuel-types-of-passenger-cars-in-use/»](https://www.acea.auto/fact/fuel-types-of-passenger-cars-in-use/).
- [4] NGVA Europe, «The role of natural gas in the transition to a low-carbon transport sector», 2020.
- [5] GIIGNL, «LNG Information Paper No. 1 - Safety and Security», 2021.
- [6] «S.Mokhatab, J.Y.Mak, J.V.Valappil, D.Wood, Handbook of Liquefied Natural Gas Cap 2.».
- [7] «Mary Kay O'Connor Process Safety Center - 2008 - LNG Pool Fire Modeling, <http://process-safety.tamu.edu> pp. 18».
- [8] «Foss, M.M., Delano, F., Gulen, G., Makaryan, R., Oct. 2003. LNG Safety and Security. Center for Energy Economics. Research Report.».
- [9] [«https://www.eni.com/it-IT/media/storie/gnl-rigassificazione.html»](https://www.eni.com/it-IT/media/storie/gnl-rigassificazione.html).
- [10] European Environment Agency, «Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives», 2018.
- [11] G. E. Blomgren, «The Development and Future of Lithium Ion Batteries», *J. Electrochem. Soc.*, vol. 164, n. 1, pagg. A5019–A5025, 2017, doi: 10.1149/2.0251701jes.
- [12] «James G. Quintiere, Sean B. Crowley, Richard N. Walters, Richard E. Lyon, David Blake; “Fire Hazards of Lithium Batteries”; report, Department of Fire Protection Engineering University of Maryland College Park, Airport and Aircraft R&D Division Federal Aviation Administration William J. Hughes Technical Center Atlantic City International Airport; 02-2016.».
- [13] «“L. Wang, S. Yin, C. Zhang, Y. Huan, J. Xu, Mechanical characterization and modeling for anodes and cathodes in lithium ion batteries, *J. Power Sources* 392 (2018) 265–273.”».

- [14] Prof. Bonvicini, «Slide del corso “Affidabilità e sicurezza nell’industria di Processo” ».
- [15] «<https://www.interno.gov.it/it/temi/prevenzione-e-soccorso/prevenzione-incendi>».
- [16] *DM 03/08/2015 - Codice di Prevenzione Incendi*.
- [17] «Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, Randall McDermott, Marcos Vanella; “Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model”; NIST Special Publication 1019 Sixth Edition; 25-05-2022; <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>.».
- [18] «rtv-autorimesse-decreto-15-maggio-2020».
- [19] «Ping Ping, Depeng Kong, Jiaqing Zhang, Ruoxi Wen Jennifer Wen; “Characterization of behaviour and hazards of fire and deflagration for high-energy Li-ion cells by over-heating”; *Journal of Power Sources* vol 398; 15-09-2018; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.044>.».
- [20] «NFPA (National Fire Protection Association). (2018). *Electric Vehicle Fire Risk Analysis*, *Fire Protection Studies*.».
- [21] «Wenhe Wang, Tengfei He, Sen He, Tianyu You, Faisal Khan; “Modeling of thermal runaway propagation of NMC battery packs after fast charging operation”; *Process Safety and Environmental Protection* vol 154; 12-08-2021; <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.006>.».
- [22] B. Mao, H. Chen, L. Jiang, C. Zhao, J. Sun, e Q. Wang, «Refined study on lithium ion battery combustion in open space and a combustion chamber», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 139, pagg. 133–146, lug. 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.03.037.
- [23] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot, e G. Marlair, «Comparison of the Fire Consequences of an Electric Vehicle and an Internal Combustion Engine Vehicle».
- [24] «Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV) Manual».
- [25] «FDS by NIST National Institute of Standards and Technology U.S. Department of commerce».
- [26] «Strategia dell’UE in materia di gas naturale liquefatto e stoccaggio del gas Risoluzione del Parlamento europeo del 25 ottobre 2016 su una strategia

dell'UE in materia di gas naturale liquefatto e stoccaggio del gas (2016/2059(INI))».

- [27] «<https://energiaoltre.it/report-mckinsey-i-fossili-guideranno-il-consumo-energetico-globale-dopo-il-2050/>».
- [28] «Proposta di Piano energetico regionale elaborata dalla Direzione centrale Ambiente ed Energia in collaborazione con ARPA FVG e con Università di Udine, Dipartimento di ingegneria elettrica, gestionale e meccanica».
- [29] «<https://www.greenture.it/it/soluzioni-net-zero/bio-lng-per-il-trasporto-pesante.html>».
- [30] «S.Mokhatab, J.Y.Mak, J.V.Valappil, D.Wood, Handbook of Liquefied Natural Gas, Capitolo 9.».
- [31] «Mary Kay O'Connor Process Safety Center - 2008 - LNG Pool Fire Modeling, <http://process-safety.tamu.edu> pp. 44.».
- [32] «PyroSim - © 1998 - 2026 Thunderhead Engineering, All rights reserved.».
- [33] «Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition».
- [34] «NIST - National Institute of Standards and Technology».