



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2025/2026

Sessione di Laurea Luglio 2026

Confronto delle conseguenze di incendio tra veicoli FCEV ed ICE all'interno di un parcheggio coperto

Relatori:

Prof. Davide Papurello

Candidato:

Massimiliano Moglia

Sommario

SOMMARIO	3
INDICE DELLE TABELLE	5
INDICE DELLE FIGURE	7
ABSTRACT.....	15
INTRODUZIONE.....	17
1.IL RUOLO DELL'IDROGENO NELLO SCENARIO ENERGETICO MONDIALE	19
1.1 L'IDROGENO NEI TRASPORTI	19
1.2 LA PRODUZIONE DI IDROGENO.....	22
1.2.1 <i>Steam Methane Reforming</i>	24
1.2.2 <i>Gassificazione del carbone</i>	25
1.2.3 <i>Pirolisi</i>	27
1.2.4 <i>Elettrolisi</i>	27
1.2.4.1 <i>Elettrolisi alcalina</i>	28
1.2.4.2 <i>Elettrolisi a membrana a scambio protonico</i>	28
1.2.4.3 <i>Elettrolisi ad ossidi solidi</i>	28
1.3 COSTI DI PRODUZIONE.....	29
2. I VEICOLI AD IDROGENO.....	31
2.1 FUEL CELL	35
2.1.1 <i>Celle a combustibile alcaline</i>	36
2.1.2 <i>Celle a combustibili ad acido fosforico</i>	37
2.1.3 <i>Celle a combustibile a membrana a scambio protonico</i>	38
2.1.4 <i>Cella a combustibile a carbonati fusi</i>	39
2.1.5 <i>Celle a combustibile ad ossidi solidi</i>	40
2.1.6 <i>Celle a combustibile a metanolo diretto</i>	41
2.2 RISCHIO DI INCENDIO.....	43
3. STUDIO SIMULATIVO: INCENDIO DI UN VEICOLO AD IDROGENO IN UN PARCHEGGIO COPERTO.....	45
3.1 CREAZIONE DEL MODELLO.....	45
3.1.1 <i>Impianti installati</i>	48
3.1.2 <i>Dispositivi per il controllo dei parametri</i>	51

3.2 DEFINIZIONE DELLE CURVE HRR.....	53
3.2.1 <i>Effetto dei sistemi antincendio</i>	58
3.3 IMPLEMENTAZIONE DELLE CURVE HRR IN PYROSIM	60
4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI	63
4.1 VEICOLO FCEV.....	63
4.1.1 <i>Scenario 1</i>	63
4.1.2 <i>Scenario 2</i>	67
4.1.3 <i>Scenario 3</i>	72
4.2 VEICOLO ICE	77
4.2.1 <i>Scenario 1</i>	77
4.2.2 <i>Scenario 2</i>	82
4.2.3 <i>Scenario 3</i>	87
4.3 CONFRONTO FCEV-ICE.....	91
4.3.1 <i>Scenario 1</i>	91
4.3.2 <i>Scenario 2</i>	94
4.3.3 <i>Scenario 3</i>	96
5. CONCLUSIONI.....	99
BIBLIOGRAFIA.....	101

Indice delle tabelle

Tabella 1: Confronto tra le proprietà chimico-fisiche dell'idrogeno, del gas naturale e della benzina [6].....	21
Tabella 2: I colori dell'idrogeno con i rispettivi metodi di produzione e fonti primarie [5]	22
Tabella 3: Confronto tra i diversi tipi di gassificatori [7].....	26
Tabella 4: Soglie prestazionali in caso di incendio	51
Tabella 5: Parametri per il calcolo del blowdown.....	57
Tabella 6: Tabella riassuntiva dei tempi di superamento delle soglie limite	97

Indice delle figure

Figura 1:Emissioni totali di CO ₂ e CO ₂ pro capite per stato, 2000-2024; Fonte: IEA (2025), CO ₂ total emissions by region, 2000-2024, IEA, Paris https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-total-emissions-by-region-2000-2024 , Licence: CC BY 4.0.....	17
Figura 2:Domanda di idrogeno in base ai settori e alle nazioni; Fonte: IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025 , Licence: CC BY 4.0	19
Figura 3:Richiesta di idrogeno nel settore trasporti in base al tipo di veicolo e alla nazione; Fonte:IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025 , Licence: CC BY 4.0	20
Figura 4: Produzione di idrogeno in base alla tecnologia e alle nazioni. Fonte:IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025 , Licence: CC BY 4.0	23
Figura 5: Produzione di idrogeno a bassa emissione. Fonte: IEA, Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database, IEA, Paris https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database , Licence: CC BY 4.0.....	23
Figura 6: Schema illustrativo del processo di SMR [6]	25
Figura 7: Costo di produzione dell'idrogeno in base alla tecnologia, 2024, e in Stated Policies Scenario, 2030; IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025 , Licence: CC BY 4.0.....	29
Figura 8: Schema di un veicolo FCEV [17]	31
Figura 9: Numero totale di veicoli alternativi registrati in Europa, passenger car (PC) e veicoli commerciali (LCV) [18].....	32
Figura 10: Numero totale di mezzi pesanti alternativi (HGV) registrati in Europa [18].....	33
Figura 11: Schema illustrativo di un serbatoio per lo stoccaggio di idrogeno in un veicolo FCEV [21]	34
Figura 12: Principio di funzionamento di una cella AFC [29]	37

Figura 13: Principio di funzionamento di una cella PAFC [29]	38
Figura 14: Layout di una cella PEMFC [32]	39
Figura 15: Principio di funzionamento di una cella MCFC [29]	40
Figura 16: Principio di funzionamento di una cella SOFC [29]	41
Figura 17: Principio di funzionamento di una cella DMFC [29]	42
Figura 18: Flow chart dei rischi associati ad una perdita di idrogeno [35]	44
Figura 19: Modello 3D del parcheggio	45
Figura 20: Layout del modello nello Scenario 1	47
Figura 21: Layout del modello nello Scenario 2	47
Figura 22: Layout del modello nello Scenario 3	48
Figura 23: Codice colore per le testine a bulbo di vetro [36]	48
Figura 24: Parametri di progetto dell'impianto sprinkler	49
Figura 25: Proprietà della superficie di estrazione	50
Figura 26: Parametri di progetto della superficie "Ventilazione"	50
Figura 27: Configurazione sensori di temperatura	51
Figura 28: Configurazione sensore di visibilità	52
Figura 29: Configurazione dei sensori FED	52
Figura 30: Modello completo dei dispositivi di controllo	53
Figura 31: Schematizzazione della curva HRR [40]	54
Figura 32: Curva HRR veicolo ICE INERIS	55
Figura 33: Curva HRR del veicolo a combustione interna	55
Figura 34: Curva HRR del veicolo FCEV [43]	56
Figura 35: Variazione della portata di idrogeno durante il blowdown	57
Figura 36: Curva HRR modificata con il Jet Fire del veicolo FCEV	58
Figura 37: Andamento della curva HRR in presenza di sistemi antincendio automatici [40]	58
Figura 38: Curva HRR del veicolo ICE in presenza dell'impianto antincendio	59
Figura 39: Curva HRR del veicolo FCEV in presenza dell'impianto antincendio	59
Figura 40: Configurazione del focolare	60

Figura 41: Valori per la definizione del Ramp-Up Time	60
Figura 42: Caratteristiche del propilene	61
Figura 43: Curva HRR- Scenario 1 FCEV	63
Figura 44: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) – Scenario 1 FCEV	64
Figura 45: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 1 FCEV	64
Figura 46: Modello di visibilità - Scenario 1 FCEV	65
Figura 47: Modello del calore- Scenario 1 FCEV	65
Figura 48: Andamento della temperatura a 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 1 FCEV	66
Figura 49: Andamento della temperatura a 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 1 FCEV	66
Figura 50: Modello dei gas tossici - Scenario 1 FCEV	67
Figura 51: Curva HRR - Scenario 2 FCEV	68
Figura 52: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) – Scenario 2 FCEV	68
Figura 53: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 2 FCEV	68
Figura 54: Modello di visibilità - Scenario 2 FCEV	69
Figura 55: Modello del calore - Senario 2 FCEV	69
Figura 56: Andamento della temperatura a 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 2 FCEV	70
Figura 57: Andamento della temperatura a 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 2 FCEV	70
Figura 58: Attivazione degli sprinkler - Scenario 2 FCEV	71
Figura 59: Modello dei gas tossici - Scenario 2 FCEV	71
Figura 60: Curva HRR - Scenario 3 FCEV	72
Figura 61: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 3 FCEV	73
Figura 62: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 3 FCEV	73
Figura 63: Modello della visibilità - Scenario 3 FCEV	73
Figura 64: Modello del calore - Scenario 3 FCEV	74
Figura 65: Andamento della temperatura all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 3 FCEV	75
Figura 66: andamento della temperatura all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 3 FCEV	75
Figura 67: Attivazione degli sprinkler - Scenario 3 FCEV	76
Figura 68: Modello dei gas tossici - Scenario 3 FCEV	76

Figura 69: Curva HRR - Scenario 1 ICE.....	77
Figura 70: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 1 ICE	78
Figura 71: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 1 ICE.....	78
Figura 72: Modello di visibilità - Scenario 1 ICE.....	78
Figura 73: Modello del calore - Scenario 1 ICE	79
Figura 74: Andamento della temperatura all'istante 300s (sx) e 600s (dx) – Scenario 1 ICE.....	80
Figura 75: Andamento della temperatura all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 1 ICE.....	80
Figura 76: Modello dei gas tossici - Scenario 1 ICE.....	81
Figura 77: Curva HRR - Scenario 2 ICE.....	82
Figura 78: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 2 ICE	82
Figura 79: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 2 ICE	82
Figura 80: Modello di visibilità - Scenario 2 ICE.....	83
Figura 81: Modello del calore - Scenario 2 ICE	83
Figura 82: Andamento della temperatura all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 2 ICE.....	84
Figura 83: Andamento della temperatura all'istante 900s (sx) e 1200s (dx)	85
Figura 84: Attivazione degli sprinkler - Scenario 2 ICE.....	85
Figura 85: Modello dei gas tossici - Scenario 2 ICE.....	86
Figura 86: Curva HRR - Scenario 3 ICE.....	87
Figura 87: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) – Scenario 3 ICE.....	87
Figura 88: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 3 ICE.....	87
Figura 89: Modello di visibilità - Scenario 3 ICE.....	88
Figura 90: Modello del calore - Scenario 3 ICE	89
Figura 91: Andamento delle temperature all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 3 ICE.....	89
Figura 92: Andamento della temperatura all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 3 ICE.....	90
Figura 93: Attivazione degli sprinkler - Scenario 3 ICE.....	90
Figura 94: Modello dei gas tossici - Scenario 3 ICE.....	91
Figura 95 Modello di visibilità - Scenario 1 FCEV vs ICE	92
Figura 96: Modello del calore - Scenario 1 FCEV vs ICE.....	92

Figura 97: Modello dei gas tossici - Scenario 1 FCEV vs ICE	93
Figura 98: Modello di visibilità - Scenario 2 FCEV vs ICE	94
Figura 99: Modello del calore - Scenario 2 FCEV vs ICE.....	95
Figura 100: Modello dei gas tossici - Scenario 2 FCEV vs ICE.....	95
Figura 101: Modello di visibilità - Scenario 3 FCEV vs ICE	96
Figura 102: Modello del calore - Scenario 3 FCEV vs ICE.....	96
Figura 103: Modello dei gas tossici - Scenario 3 FCEV vs ICE.....	97

Lista delle unità di misura

°C	Gradi Celsius
mg	milligrammo
kg	kilogrammo
kt	Kilo-tonnellate
Mt	Mega-tonnellate
Gt	Giga-tonnellate
MPa	Mega Pascal
mJ	milli Joule
MJ	Mega Joule
µm	micron
cm	centimetro
m	metro
km	chilometro
cm ²	centimetro quadro
W	Watt
kW	kilowatt
MW	Megawatt
kWh	kilowattora
W	Watt
V	Volt
Nm ³	Normal metro cubo

Abstract

Negli ultimi anni la richiesta di idrogeno è aumentata sia per usi industriali, come nel settore petrolchimico, sia nell'ambito dei trasporti. Nonostante in questo settore la richiesta di veicoli sia ancora piuttosto limitata a causa della scarsa infrastruttura presente sul territorio e dell'elevato costo dei veicoli stessi, risulta di particolare interesse comprendere i rischi connessi all'utilizzo dell'idrogeno soprattutto in ambienti chiusi, dove garantire la sicurezza degli occupanti è più complicato. Nella seguente trattazione si andranno a valutare le conseguenze in termini di temperatura, visibilità e gas tossici dovute all'incendio di un veicolo ad idrogeno (FCEV) all'interno di un parcheggio sotterraneo e paragonate con quelle relative ad un veicolo a combustione interna (ICE) eseguendo delle simulazioni CFD tramite FDS, software molto utilizzato per studiare la propagazione dei fumi e di calore all'interno di ambienti. Per ogni veicolo si analizzeranno tre scenari differenti: il primo non prevede la presenza di alcun tipo di impianto, il secondo prevede l'installazione di un impianto antincendio e il terzo un impianto di estrazione dei fumi oltre alla presenza degli sprinkler.

Introduzione

Con l'avvento del nuovo millennio lo scenario energetico mondiale ha subito dei cambiamenti importanti per ridurre il più possibile l'impatto ambientale derivante dai diversi processi produttivi e produzione di energia. In particolare, dal 2015 anno in cui è stato firmato l'Accordo di Parigi, il quale prevede di contenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto della soglia di 2 °C oltre i livelli preindustriali e di limitare tale incremento a 1.5 °C [1], tutte le nazioni firmatarie dell'accordo si impegnano a limitare la produzione di CO₂, in quanto essendo una sostanza clima alterante è la principale responsabile del cambiamento climatico. Secondo i dati del Global Energy Review 2025 [1], l'emissione di anidride carbonica collegata alla produzione di energia è cresciuta complessivamente del 1.5% nel 2024 per i paesi in via di sviluppo come Cina ed India, al contrario nei paesi già sviluppati come Unione Europea, USA e Giappone si è verificata una riduzione complessiva pari al 1.1%, con un valore maggiore per quanto riguarda l'emissione dovuta a carbone, in particolare per UE questa riduzione si aggira intorno al 11%. Questi risultati sono frutto di politiche energetiche stringenti nei confronti dei combustibili fossili e la diffusione in larga scala di soluzioni rinnovabili.

CO₂ total emissions and CO₂ per capita emissions by region, 2000-2024

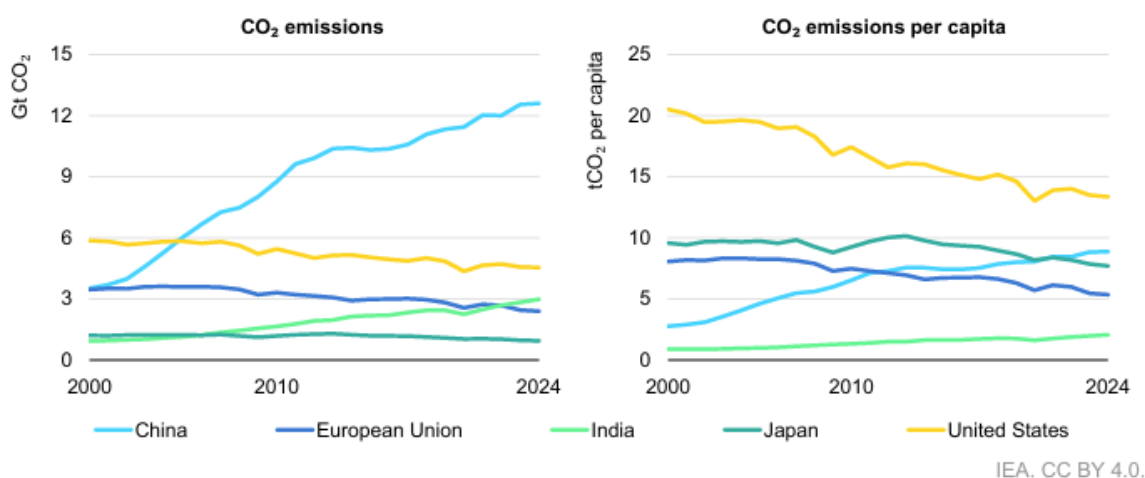


Figura 1. Emissioni totali di CO₂ e CO₂ pro capite per stato, 2000-2024; Fonte: IEA (2025), CO₂ total emissions by region, 2000-2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-total-emissions-by-region-2000-2024>, Licence: CC BY 4.0

Tuttavia, esistono dei metodi per catturare la CO₂ ma risultano ad oggi molto costosi e non disponibili nella maggior parte dei paesi, per questa ragione è molto importante ridurre le emissioni all'origine utilizzando delle tecnologie sostenibili ad impatto ambientale ridotto. Ad esempio, l'impiego del fotovoltaico ha portato una riduzione delle emissioni di CO₂ a livello globale pari a 1.4 Gt annue, per l'eolico la riduzione è stata di 900 e nel nucleare 190 Mt di CO₂ [1].

1. Il ruolo dell'idrogeno nello scenario energetico mondiale

Nello scenario energetico mondiale appena descritto l'idrogeno si colloca come nuovo vettore energetico in grado di sostituire parzialmente i combustibili fossili integrandolo con le diverse risorse rinnovabili, infatti, queste ultime non essendo disponibili in modo continuativo durante il giorno costituiscono un limite che può essere superato solo utilizzando sistemi di accumulo energetico, come le batterie, gli accumuli termici e l'idrogeno. Nel 2024 il consumo di idrogeno ha raggiunto 100 Mt con la Cina e gli USA che rappresentano i principali consumatori con una crescita rispettivamente del 2% e dello 0,5% rispetto all'anno precedente; invece, la domanda associata agli stati europei è rimasta pressoché costante [2]. È necessario precisare però che la crescita della domanda, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, è legata alla produzione industriale di beni che utilizzano l'idrogeno come materia prima e non come sostituto vero e proprio dei combustibili fossili. Infatti, ad oggi la maggior parte dell'idrogeno richiesto a livello mondiale viene impiegato nel settore della raffinazione e della produzione di ammoniaca [2].

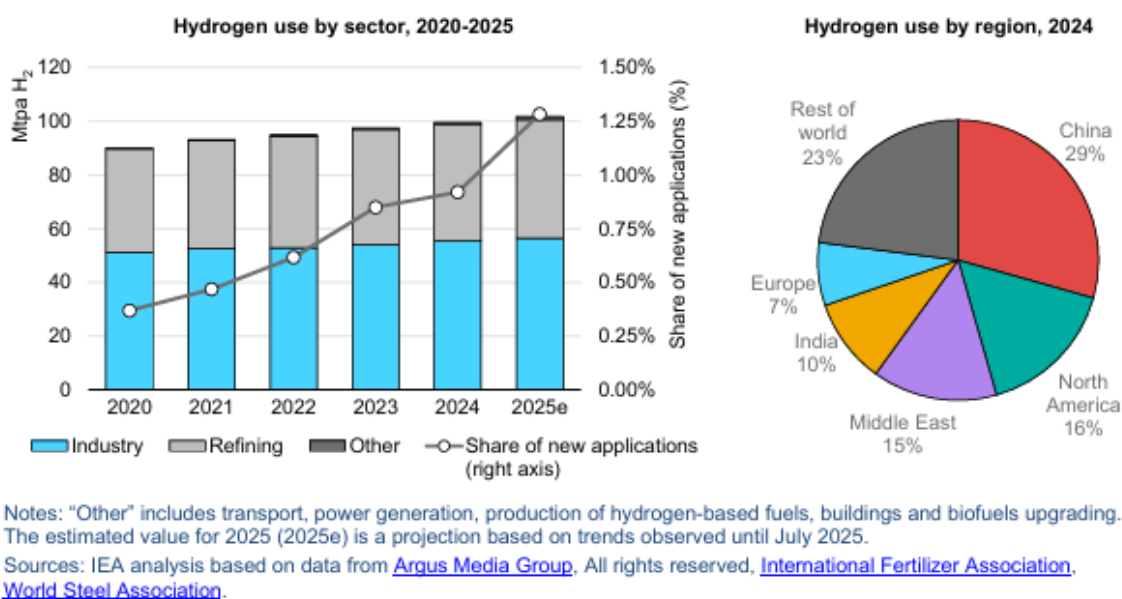
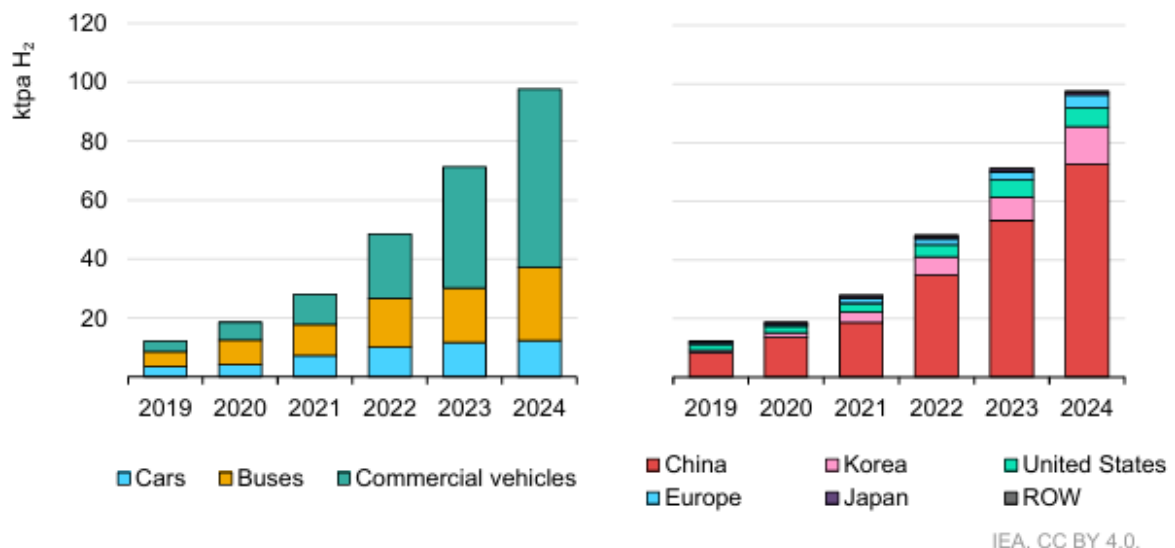


Figura 2: Domanda di idrogeno in base ai settori e alle nazioni; Fonte: IEA (2025), *Global Hydrogen Review 2025*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>, Licence: CC BY 4.0

1.1 L'idrogeno nei trasporti

Anche il settore dei trasporti negli ultimi anni per ridurre le emissioni di CO₂ dei singoli veicoli ha dovuto esplorare nuove strade. I veicoli che dominavano completamente il mercato prima delle normative ambientali vigenti erano quelli a combustione interna (ICE) i quali possedevano

tecnologie consolidate come i motori a benzina e Diesel. Un aspetto molto importante dal punto di vista del consumatore riguarda la velocità nell'eseguire il rifornimento che nel caso di questa tipologia di veicoli si esegue in pochi minuti. La classe di veicoli che ha subito la crescita maggiore a livello di vendite negli ultimi anni è il *Battery Electric Vehicle* (BEV) il quale sfruttando uno o più motori elettrici alimentati da batterie di accumulo poste nella parte inferiore del mezzo è in grado di sostituire la dipendenza dai combustibili fossili almeno in una parte del ciclo di vita del prodotto, ovvero l'utilizzo. Il secondo tipo di veicolo alternativo è detto *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV) il quale sfrutta l'idrogeno contenuto all'interno di un serbatoio per alimentare una cella a combustibile che a sua volta alimenta il motore elettrico. In questo settore la richiesta di idrogeno al 2024 è di circa lo 0,1% del consumo totale con un picco raggiunto pari a 100 kt annue [2]. Come si può evincere dalla *Figura 3* la Cina e la Corea del Sud sono gli stati con una richiesta maggiore anche grazie alla quantità di investimenti in questa tecnologia.



Notes: ROW = Rest of World. Commercial vehicles include light commercial vehicles and medium- and heavy-duty trucks. Assumptions on annual mileage and fuel economy come from the IEA [Global Energy and Climate Model](https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model).

Figura 3: Richiesta di idrogeno nel settore trasporti in base al tipo di veicolo e alla nazione; Fonte: IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>, Licence: CC BY 4.0

A differenza dei veicoli BEV in cui la ricarica delle batterie può avvenire anche in diverse ore, nei veicoli FCEV i tempi di rifornimento sono simili a quelli dei veicoli ICE con una media che varia dai 3-5 minuti [3]. Il rifornimento avviene in stazioni denominate Hydrogen Refuelling Station (HRS) le quali devono rispettare stringenti vincoli normativi sia in fase di costruzione sia di erogazione del carburante, con lo standard SAE J2601 che stabilisce il protocollo e i limiti di processo per il rifornimento di idrogeno nei veicoli con capacità volumiche superiori o uguali a 49.7 litri [4], quali la temperatura di erogazione del carburante, la portata massima del carburante, l'incremento della pressione. Senza entrare troppo nel dettaglio di come avvengano i rifornimenti nelle HRS, è

però importante specificare che l'idrogeno prima dell'erogazione deve essere compresso a pressioni elevate e sottoraffreddato a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, motivo per il quale la sigla che identifica le condizioni di erogazione per i veicoli passeggeri è T40-H70, ovvero idrogeno preraffreddato a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressione di stoccaggio pari a 700 bar. A seconda delle condizioni esterne di temperatura e pressione però, il rifornimento può subire delle variazioni in termini di tempo e talvolta bloccarsi se la temperatura interna al tank dovesse superare gli $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ per garantire la sicurezza dell'impianto, rappresentando un limite per la tecnologia. Infatti, per assicurare la corretta erogazione, SAE J2601 stabilisce dei protocolli basati su un approccio tabellare che utilizza una rampa di aumento della pressione fissa oppure un approccio basato su formule che invece adopera una rampa dinamica della pressione, la quale viene calcolata in modo continuativo durante il rifornimento [4]. Una peculiarità di questo vettore energetico è la sua elevata energia specifica ma allo stesso tempo una bassa energia volumica, ovvero a parità di massa possiede un'energia maggiore rispetto ad altri combustibili ma non a parità di volume; per questo motivo l'idrogeno viene immagazzinato all'interno di bombole ad alta pressione, nell'ordine dei 700 bar, oppure liquefatto ad una temperatura di circa $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. È caratterizzato anche da un'elevata infiammabilità, da una bassa energia di attivazione e si presenta come una sostanza incolore ed inodore [5], caratteristica che può generare delle problematiche soprattutto in caso di perdite ed incendio. Inoltre, a causa della sua bassa viscosità dinamica e della piccola dimensione molecolare può provocare infragilimento dei materiali, soprattutto metallici, motivo per cui i serbatoi devono essere costruiti in materiale composito secondo specifiche tecniche; questo tema verrà analizzato in modo più approfondito nel corso della trattazione.

Parametro	Idrogeno H_2	Metano CH_4	Benzina
Infiammabilità in aria (vol%)	4 - 75	4,3 - 15	1,4 - 7,6
Minima energia di innesco (mJ)	0,02	0,28	0,24
Velocità di combustione in aria (cm/s)	265 - 325	37 - 45	37 - 43
Velocità di galleggiamento in aria (m/s)	1,29 - 9,0	0,8 - 6,0	Non galleggiante
Temperatura di innesco (K)	843	923	523 - 698
Velocità di fiamma laminare (m/s)	2,1	0,38	0,42
Densità in condizioni normali (kg/m^3)	0,09	0,67	4,4
Densità energetica volumetrica in condizioni ambiente (MJ/m^3)	10,7	36,4	34200
Potere calorifico inferiore (MJ/kg)	120	50	44,5

Tabella 1: Confronto tra le proprietà chimico-fisiche dell'idrogeno, del gas naturale e della benzina [6]

1.2 La produzione di idrogeno

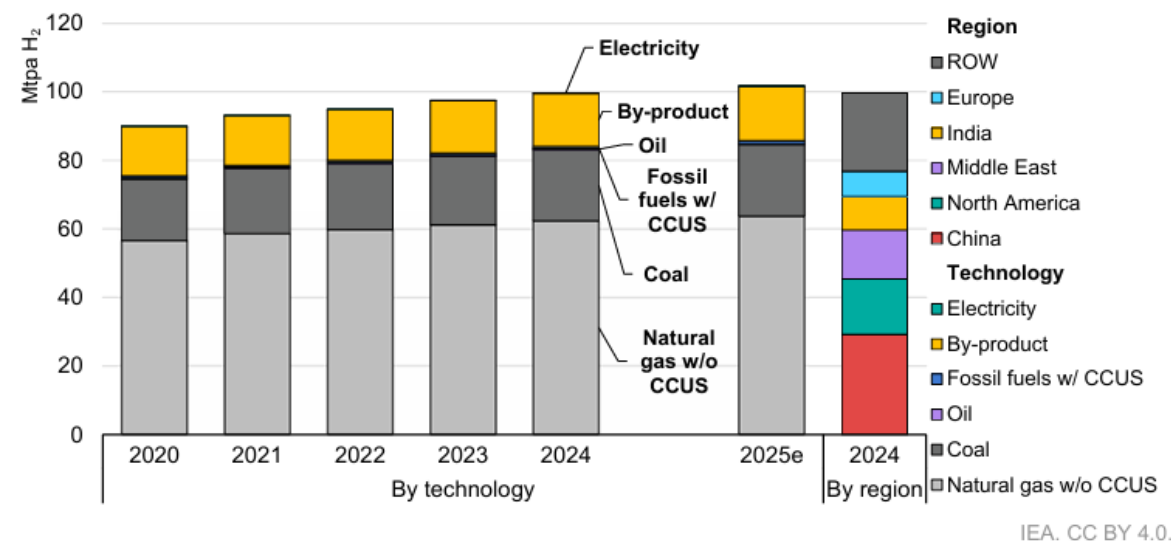
Fino a questo punto della trattazione si è parlato solo dello sviluppo dell'idrogeno nei diversi settori e delle sue caratteristiche senza però entrare nel merito di come viene prodotto e della distinzione che è necessario fare quando si trattano i vari processi produttivi. Infatti, l'idrogeno prodotto a livello mondiale non ha tutto lo stesso valore poiché esistono diversi modi per produrlo, dai più ai meno sostenibili, i quali vanno ad associargli un colore. Esistono ad oggi ben sette colori che identificano l'idrogeno a seconda del metodo produttivo utilizzato, i quali verranno riassunti in *Tabella 2*.

Colore	Metodo produttivo	Fonte energetica primaria
Marrone	Gassificazione	Carbone
Grigio	Steam Reforming (SR)	Gas naturale
Blu	Gassificazione/SR con CCUS	Carbone/ Gas naturale
Turchese	Pirolisi	Gas naturale
Giallo	Elettrolisi	Energia di rete
Rosa	Elettrolisi	Energia nucleare
Verde	Elettrolisi	Energia rinnovabile

Tabella 2: I colori dell'idrogeno con i rispettivi metodi di produzione e fonti primarie [5]

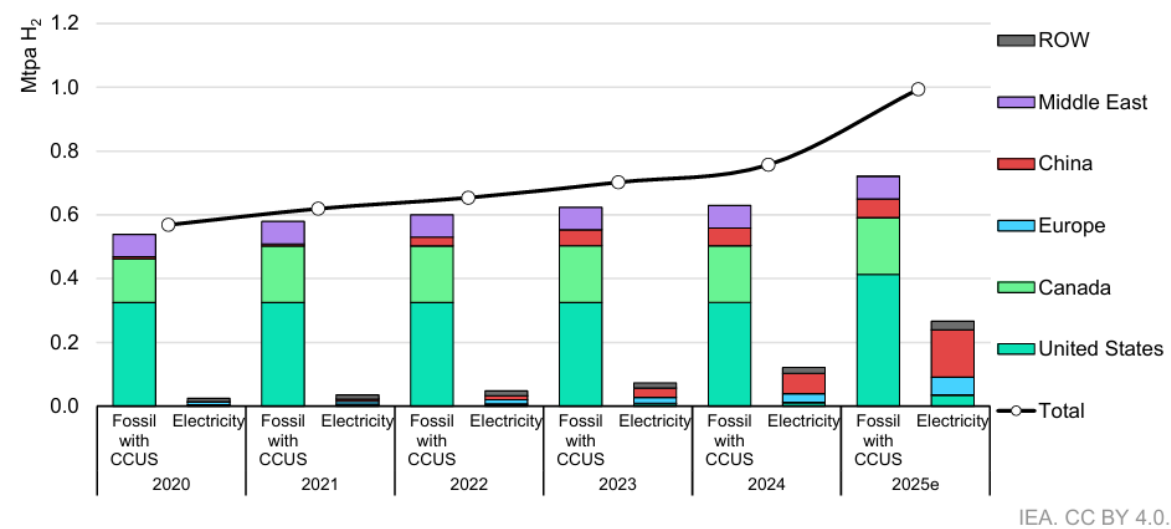
I dati riguardanti la produzione di idrogeno al 2024, nonché gli ultimi disponibili, mostrano come i metodi utilizzando combustibili fossili stiano ancora dominando il mercato, con lo Steam Reforming del gas naturale che è responsabile dei due terzi della domanda totale grazie all'infrastruttura ben collaudata e i bassi costi di gestione; anche la gassificazione del carbone è responsabile di una buona parte della produzione globale soprattutto in paesi come Cina ed India dove la materia prima è molto abbondante. L'affidamento sui combustibili fossili produce però una quantità di CO₂ pari a 980 Mt solo nel 2024 [2], motivo per cui le politiche ambientali stanno spingendo per una produzione a bassa emissione di anidride carbonica. Per questa ragione dal 2020 ad oggi la crescita dei metodi sostenibili è aumentata in maniera costante raggiungendo l'1% della domanda globale, anche se il dato più importante riguarda la crescita che si è verificata di anno in anno; infatti, basti pensare che dal 2023 al 2024 la crescita riguardante la produzione di idrogeno a bassa emissione è cresciuta di circa il 10% [2].

Quando si parla di metodi produttivi a bassa emissione si fa riferimento allo Steam Reforming con CCS (Carbon Capture and Storage), all'elettrolisi tramite energia rinnovabile ed infine alla pirolisi, anche se quest'ultima è una tecnica ancora in fase di sviluppo ed ottimizzazione.



Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage; ROW = rest of world; 2025e= estimate for 2025, based on trends observed until July 2025. By-product hydrogen includes production in catalytic naphtha crackers and steam crackers which is subsequently used in refining.

Figura 4: Produzione di idrogeno in base alla tecnologia e alle nazioni. Fonte:IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>, Licence: CC BY 4.0

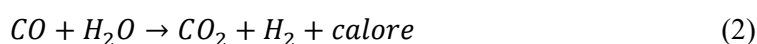
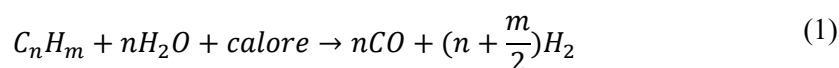


Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage; ROW = rest of world; 2025e = estimate for 2025, based on projects planned to start operations in 2025 that have at least reached FID.
Source: [IEA Hydrogen Production Projects Database](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database) (September 2025).

Figura 5: Produzione di idrogeno a bassa emissione. Fonte: IEA, Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>, Licence: CC BY 4.0

1.2.1 Steam Methane Reforming

Come già accennato in precedenza SMR è la tecnologia più diffusa per la produzione di idrogeno ricoprendo circa il 66% della richiesta mondiale [2] utilizzando come materia prima il gas naturale. Il processo prevede una fase iniziale di desolforazione in cui vengono eliminati i composti organici contenenti zolfo, il quale può andare ad intaccare le fasi successive del processo avvelenando il catalizzatore.



Una volta purificato, il metano ed il vapore acqueo miscelati vengono riscaldati all'interno di una fornace a temperature comprese tra i 700 – 900 °C ed una pressione fino a 3.5 MPa in presenza di un catalizzatore a base di nichel per velocizzare la reazione. Viene utilizzata questa tipologia di catalizzatore perché garantisce il migliore compromesso in termini di efficienza e costi di esercizio, anche se in impianti ridotti e nei laboratori di ricerca è possibile trovare delle soluzioni con metalli nobili come il Rodio (Rh) e il platino (Pt) [7] che a causa dei costi elevati e della scarsa disponibilità non potrebbero essere impiegati in impianti di grossa taglia. Al termine della prima reazione si forma un gas di sintesi detto syngas, formato da monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H₂), che esce ad una temperatura di 890 °C e una pressione di 32 bar raggiungendo un valore di conversione del metano di circa 83% dopo il quale viene fatto raffreddare intorno ai 350 °C [8]. Successivamente, il syngas viene riversato all'interno di un reattore Water-Gas Shift (WGS) dove il monossido di carbonio viene fatto reagire con ulteriore acqua per produrre anidride carbonica e idrogeno in quantità maggiori. L'idrogeno ottenuto dalla seconda reazione viene purificato tramite un processo di Pressure Swing Adsorption (PSA), in grado di eliminare le particelle di CO₂ presenti nell'idrogeno raggiungendo una purezza oltre al 99,99% [7].

Da quanto detto finora si evince come questa tecnologia produca una quantità di CO₂ molto elevata, motivo per cui negli anni si è speso molto per sviluppare delle soluzioni in grado di ridurre il più possibile le emissioni rendendo la tecnologia maggiormente utilizzata al mondo più sostenibile. Le soluzioni più diffuse sono la Carbon Capture and Storage (CCS) e la Carbon Capture Utilisation and Storage (CCUS); la prima consiste nel catturare la CO₂, comprimerla e trasportarla all'interno di siti geologici come le riserve di petrolio o gas naturale ormai esaurite. Esistono tecnologie, una di queste è stata testata in una centrale geotermica in Islanda, in grado di immagazzinare l'anidride carbonica all'interno di rocce basaltiche che sono presenti però in grande quantità solo ai poli della Terra pertanto molto più complicate da realizzare rispetto a sfruttare giacimenti già esistenti. Il secondo metodo rappresenta un'integrazione del primo già analizzato in quanto la CO₂ catturata, prima di

essere immagazzinata, viene sfruttata per alimentare processi industriali nel settore dell'acciaio, del cemento e chimico; si dimostra perciò più complicata da realizzare perché ha come obiettivo la creazione di valore dalla cattura della CO₂ [8] [9].

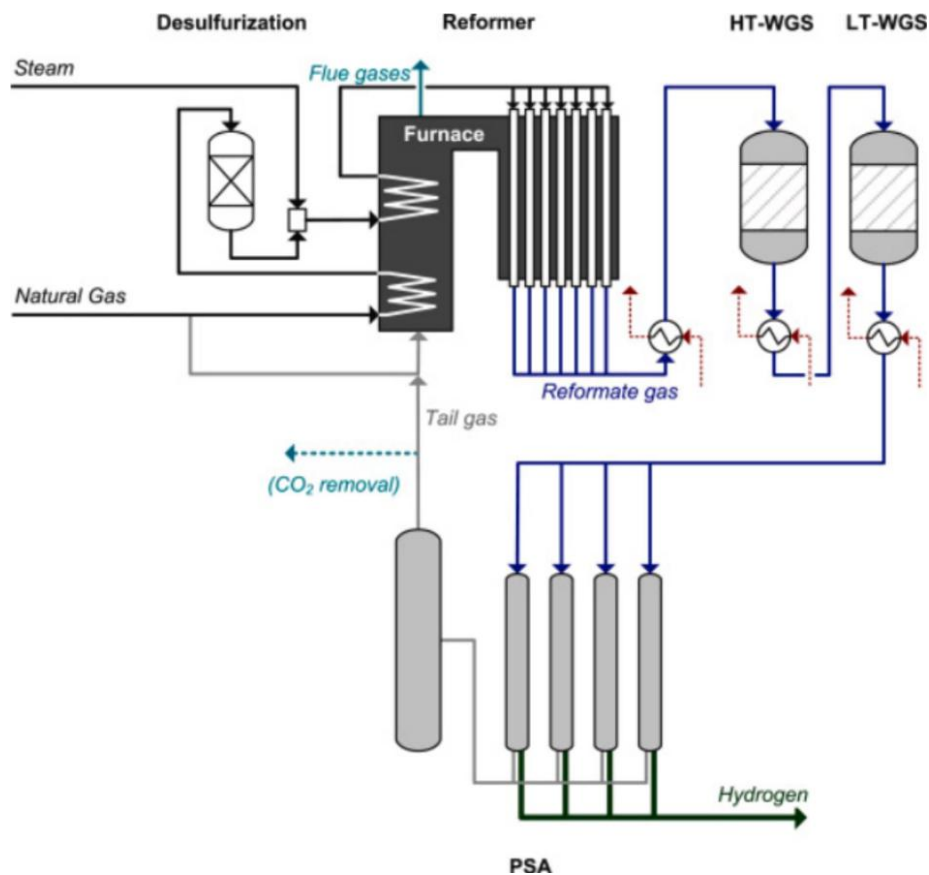


Figura 6: Schema illustrativo del processo di SMR [7]

1.2.2 Gassificazione del carbone

La gassificazione del carbone è un'altra tecnologia collaudata ed impiegata per la produzione di idrogeno su larga scala, soprattutto nelle nazioni in cui le riserve di carbone sono abbondanti. Prevede la conversione del carbone in un gas di sintesi, syngas, formato da una miscela di idrogeno (H₂) e monossido di carbonio (CO) attraverso la sua parziale ossidazione. Il processo comincia con la separazione dell'ossigeno dall'aria che viene successivamente inviato al gassificatore, in cui il carbone viene riscaldato a temperature dell'ordine dei 1000 °C insieme all'ossigeno ed al vapore acqueo formando un composto volatile ricco di idrogeno, il quale viene successivamente purificato per eliminare tutte le impurità presenti quali zolfo e particelle di catrame che vanno ad inficiare sulla purezza finale dell'idrogeno. Il syngas viene inviato ad un reattore WGS per massimizzare la quantità di idrogeno convertendo la CO₂ e il CO, infine, attraverso un processo di PSA viene separato l'idrogeno ad alta purezza dal gas di sintesi. A seconda del tipo di gassificatore utilizzato cambiano sia i processi sia le temperature in gioco; pertanto, la scelta riguardante la tecnologia da impiegare

risulta fondamentale. Ad oggi esistono principalmente 3 tipologie di gassificatori usati su larga scala [7]:

- A letto fisso
- A letto fluido
- A letto trascinato

Il primo tipo si distingue ulteriormente in *Controcorrente* (Up-draft), se l'ingresso di ossigeno e vapore avviene dal basso, *Equi-corrente* (Down-draft) se invece avviene dall'alto; in entrambi i casi il rifornimento di carbone si verifica sempre dalla sommità del gassificatore. Il gassificatore a letto fluido prevede l'ingresso del carbone sul fianco e l'immissione di aria e vapore dal basso per garantire una distribuzione di temperatura ed uno scambio termico più uniforme possibile. L'ultima tipologia prevede l'immissione sia di carbone che di aria e vapore dall'alto, come per il gassificatore a letto fisso *Equi corrente*, con la differenza che la temperatura di lavoro risulta maggiore rispetto alle altre tipologie di sistemi, ciononostante risulta la tecnologia più utilizzata per la produzione su larga scala. Esiste in realtà un ultimo tipo di gassificatore al plasma che porta diversi vantaggi rispetto a quelli citati in precedenza quali l'utilizzo di una torcia al plasma per raggiungere temperature più elevate, una resa di idrogeno superiore ed un processo che si avvicina maggiormente alla sostenibilità ambientale, nonostante ciò, non è indicata per la produzione industriale su larga scala, almeno allo stato dell'arte attuale.

Tipo di gassificatore	Tipo di carbone	Temperatura di uscita del syngas (°C)	Grandezza del campione (cm)	Temperatura di zona del reattore (°C)	Scala	Efficienza del gas a freddo (%)
Letto fisso	Lignite sub-bituminosa	460 - 650	5	1000 - 1100	Larga	80
Letto fluidizzato	Lignite sub-bituminosa	800 - 1000	0,6	800 - 1000	Larga	78 - 81
Letto trascinato	Carbone	900 - 1600	0,015	1990	Larga	80
Plasma	Carbone	1250	5	1500 - 5500	Piccola/Modulare	80 - 90

Tabella 3: Confronto tra i diversi tipi di gassificatori [7]

Esattamente come per SMR, anche la gassificazione produce una grande quantità di CO₂ che può essere contenuta attraverso la CCS. Un'alternativa alla gassificazione del carbone è data dalle biomasse, il cui funzionamento resta simile a quello già analizzato con la differenza che l'impianto risulta più complicato perché è necessario un pretrattamento delle biomasse per garantire uniformità del materiale; inoltre, l'efficienza termica di tali impianti è dell'ordine del 35-50% [10], rispetto al 80-85% di quelli a carbone. In aggiunta, le biomasse avendo un basso potere calorifico inferiore necessitano di volumi di impianto maggiore, ma producono un "idrogeno verde" ovvero a bassa

emissione; infatti, si stima che la CO₂ rilasciata dai processi termochimici associati alle biomasse sia uguale a quella assorbita dalle piante durante la loro vita. [10]

1.2.3 Pirolisi

La pirolisi è un processo termochimico per la produzione di idrogeno a partire da materiali organici che consiste nella loro decomposizione termica in assenza di ossigeno. Riscaldando il metano ad alta temperatura in assenza di ossigeno, l'energia che si crea è sufficiente a rompere i legami chimici presenti nella molecola (CH₄) formando idrogeno gassoso come prodotto primario e carbonio solido come sottoprodotto, evitando così la formazione di CO₂. A differenza dell'anidride carbonica, il carbonio solido è più facile da gestire e può essere immagazzinato sotto forma di blocchi da utilizzare in diversi settori industriali quali le acciaierie [11]. Nonostante non produca anidride carbonica, è però opportuno specificare che la pirolisi di una molecola di metano produce due molecole di idrogeno invece nel processo dello Steam Reforming si formano quattro molecole di idrogeno ed una di CO₂. Esistono tuttavia diverse modalità di pirolisi [12]:

- Pirolisi lenta: avviene in tempi abbastanza lunghi a temperature intorno ai 500 °C in cui si ottengono una fase solida, liquida e gassosa in parti uguali.
- Carbonizzazione: rappresenta il metodo più antico di pirolisi ed avviene a temperature comprese tra i 300-500 °C da cui si ottiene principalmente la fase solida ad elevato contenuto di carbonio.
- Fast pirolisi: avviene a temperature medie intorno ai 500-650 °C in cui la reazione si sviluppa rapidamente con tempi di residenza delle particelle di biomassa e vapori compresi tra 0.5-2 secondi [13], favorendo la formazione della fase liquida, ovvero un bio-oil contenente idrocarburi aromatici e paraffine.
- Flash pirolisi: la reazione avviene con tempi molto simili a quella "fast" ma con temperature superiori ai 650 °C, favorendo la formazione di una fase gassosa (syngas).

1.2.4 Elettrolisi

L'ultimo metodo di produzione che viene analizzato è l'elettrolisi, ovvero la scissione di una molecola d'acqua in idrogeno e ossigeno. Per far avvenire questa reazione è necessaria una quantità di energia elettrica elevata che se prodotta attraverso fonti rinnovabili quali il solare, l'eolico e l'idroelettrico porta alla formazione di "idrogeno verde" ovvero ad impatto ambientale quasi nullo. Come già anticipato nel *Paragrafo 1.2* l'idrogeno prodotto con l'elettrolisi rappresenta ad oggi una percentuale molto bassa della domanda totale, proprio a causa della richiesta energetica elevata e della convenienza dei metodi tradizionali che utilizzano combustibili fossili.

Il principio di funzionamento di un elettrolizzatore consiste in una reazione di ossido-riduzione, che prevede un catodo ed un anodo immersi all'interno di una sostanza in grado di condurre elettricamente, detta elettrolita, nel quale si scinde la molecola d'acqua in idrogeno, al catodo, e ossigeno, all'anodo. Poiché questa tipologia di impianti viene installata vicino a grandi bacini idrici è necessario implementare dei sistemi di filtraggio delle acque in modo da aumentarne l'efficienza e non ridurre la vita utile dell'impianto stesso; nel caso in cui venga installato vicino al mare è necessario anche implementare un processo di dissalazione dell'acqua.

Esistono principalmente tre tecnologie riguardanti l'elettrolisi:

- Elettrolisi Alcalina (AEL)
- Elettrolisi a membrana a scambio protonico (PEMEL)
- Elettrolisi ad ossidi solidi (SOEC)

1.2.4.1 Elettrolisi alcalina

È il tipo di elettrolisi più diffusa sul mercato la quale utilizza l'idrossido di potassio come elettrolita (KOH), da qui il nome "alcalina"; l'acqua viene introdotta al catodo dove viene scissa in H_2 e separata dagli ioni (OH^-) che viaggiano attraverso la soluzione elettrolitica verso l'anodo in cui si forma O_2 [14]. È una tecnologia ampiamente sviluppata negli anni in grado di raggiungere buone efficienze produttive nell'ordine del 60-70% ed una purezza dell'idrogeno superiore al 98% lavorando a basse temperature tipicamente intorno ai 60-80 °C [10]. I difetti degli elettrolizzatori che utilizzano questa tecnologia riguardano principalmente la complessità operativa del KOH e la tendenza alla corrosione dei vari componenti [7]. A differenza di altre tecnologie possiedono la vita utile più alta di tutti con tempi che possono raggiungere anche le 90'000 ore [10].

1.2.4.2 Elettrolisi a membrana a scambio protonico

Negli elettrolizzatori PEM l'acqua viene introdotta all'anodo dove si scinde in ioni (H^+) che a loro volta viaggiano attraverso la membrana polimerica al catodo per formare H_2 [14]. Le temperature a cui si lavora sono basse, simili a quelle dell'elettrolisi alcalina, così come il consumo energetico che si aggira intorno ai $4.5-7.5 \frac{kWh}{Nm^3}$. La purezza dell'idrogeno raggiunge valori superiori al 99.99% anche se la sua produzione è di un ordine di grandezza inferiore rispetto all'elettrolisi alcalina [14]. Anche la vita utile dell'impianto si riduce con tempi dell'ordine delle 20'000 ore [10]; tuttavia questo tipo di elettrolizzatori permettono una compatibilità migliore con l'intermittenza delle fonti di energia rinnovabili perché sono in grado di raggiungere una condizione di regime in minor tempo [7], anche grazie ai materiali pregiati che costituiscono i catalizzatori.

1.2.4.3 Elettrolisi ad ossidi solidi

Il funzionamento è lo stesso dell'elettrolisi alcalina con le differenze che in questo caso l'elettrolita è un ossido ceramico, e che si opera ad altissime temperature, nell'ordine dei 900-1000 °C [10],

poiché l'energia elettrica viene parzialmente sostituita con quella termica [14] derivante da processi chimico-industriali. È una tecnologia più moderna rispetto a quelle analizzate in precedenza infatti permette di utilizzare SOEC in modo inverso funzionando sia da elettrolizzatore sia da cella a combustibile per una maggiore interscambiabilità del sistema. A causa delle alte temperature a cui lavora, i materiali sono sottoposti ad ingenti stress termici e di conseguenza anche la loro durata risulta limitata con tempi inferiori alle 40'000 ore [10].

1.3 Costi di produzione

Il costo di produzione dell'idrogeno varia molto a seconda della tecnologia utilizzata però esiste una tendenza comune secondo cui le risorse fossili possiedono un costo inferiore rispetto a quelle rinnovabili, tranne nel 2022 a causa della situazione geopolitica dovuta ai conflitti in Ucraina, in cui il prezzo del gas ha raggiunto picchi storici così come l'idrogeno; solo in quel periodo i paesi con elevate risorse rinnovabili hanno tratto beneficio dal produrre idrogeno con metodi sostenibili. In questo periodo il costo di produzione dell'idrogeno con combustibili fossili è passato da 1 USD/kg a 9 USD/kg per regioni importatrici di gas naturale [2], invece il costo relativo alle fonti rinnovabili è compreso tra i 4-10 USD/kg [2]. Questa situazione però è durata poco, infatti al 2024, anno in cui sono disponibili gli ultimi dati, il costo dovuto alla produzione da fonti fossili si è ridotto in un range di 0.8-4.6 USD/kg, invece per quanto riguarda le fonti rinnovabili il prezzo è aumentato anche a causa della scarsità delle materie prime che costituiscono i componenti degli elettrolizzatori. Focalizzandosi sulla situazione Europea, il costo medio di produzione tramite SMR si aggira intorno ai 3.1 EUR/kg con un incremento fino ai 4.1 EUR/kg per gli impianti con cattura della CO₂. Nel caso di elettrolisi alimentata da energia elettrica di rete il costo medio è intorno ai 7.4 EUR/kg, il quale si riduce ai 6.7 EUR/kg se la fonte diventa rinnovabile [15].

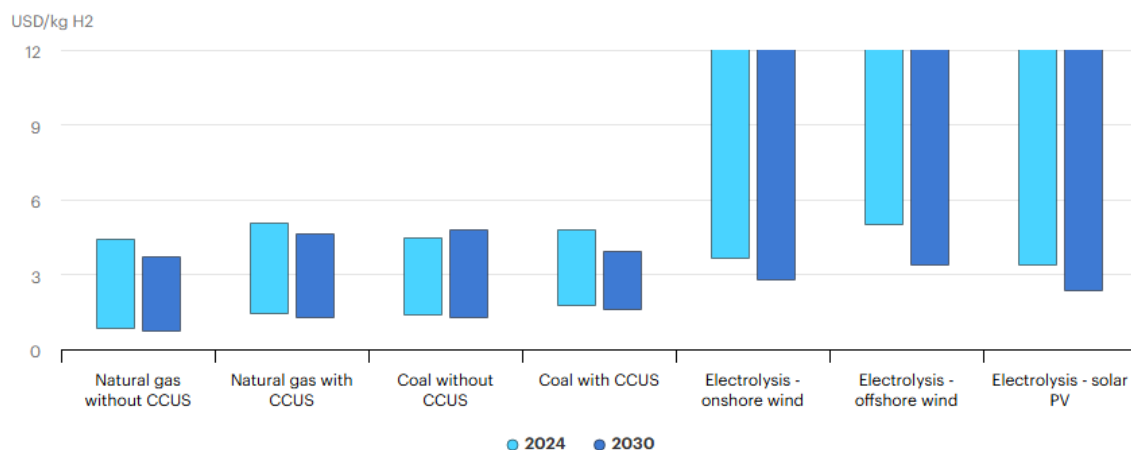


Figura 7: Costo di produzione dell'idrogeno in base alla tecnologia, 2024, e in Stated Policies Scenario, 2030; IEA (2025), Global Hydrogen Review 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>, Licence: CC BY 4.0

Finora si è parlato solo del costo di produzione ma in un mercato che tende ad espandersi come quello dei veicoli alternativi, risulta interessante conoscere il prezzo dell'idrogeno che dovrà pagare il consumatore alla stazione di rifornimento, con un prezzo attuale che si aggira intorno ai 10-15 €/kg. Secondo alcune stime fatte da BMW, in Germania il prezzo finale dell'idrogeno potrebbe scendere ad un valore di 6 €/kg nei prossimi anni, comportando un costo per il pieno di carburante simile a quello dei veicoli tradizionali [16].

2. I veicoli ad idrogeno

La quasi totalità dei veicoli disponibili sul mercato funziona tramite le celle a combustibile perché rappresentano una tecnologia ampiamente sviluppata e matura, però nel corso degli anni alcuni costruttori come BMW hanno progettato dei veicoli ICE in grado di funzionare utilizzando l'idrogeno come combustibile (HICEV). Possedevano il vantaggio di avere una struttura simile a quella dei veicoli tradizionali anche se con opportuni accorgimenti sulle valvole di regolazione e guarnizioni, con una maggiore attenzione sulla sicurezza del veicolo; nonostante potesse sembrare un'idea innovativa in realtà nascondeva diverse problematiche non semplici da risolvere. Una di queste era rappresentata dall'idrogeno stesso perché doveva essere immagazzinato in serbatoi criogenici, condizione molto difficile da mantenere su un veicolo in movimento comportando inoltre un incremento di peso notevole dovuto all'installazione del sistema di raffreddamento. In aggiunta non si andava a risolvere il problema delle emissioni di gas tossici, in quanto la reazione di combustione dell'idrogeno avvenendo con l'aria presa dall'esterno del veicolo e non con ossigeno puro, portava alla formazione di ossidi di azoto (NO_x) [17], tra i principali responsabili dell'inquinamento ambientale. Fu così che l'intero settore automotive decise di puntare sui veicoli Fuel Cell (FCEV).

Le Fuel Cells rappresentano una tecnologia inventata quasi due secoli fa e nel corso del '900 la NASA la implementò nei suoi progetti spaziali fino ad essere utilizzata nel settore dei trasporti, con la General Motor che costruì il primo veicolo passeggeri a cella a combustibile chiamato *Electrovan*, nel 1966 [18]. Da quel momento anche altre case automobilistiche cominciarono a sviluppare tecnologie inerenti alle Fuel Cell, seppur con uno sviluppo lento, fino al nuovo millennio in cui case come BMW, Toyota, Hyundai e Honda hanno lanciato sul mercato i primi veicoli di serie.

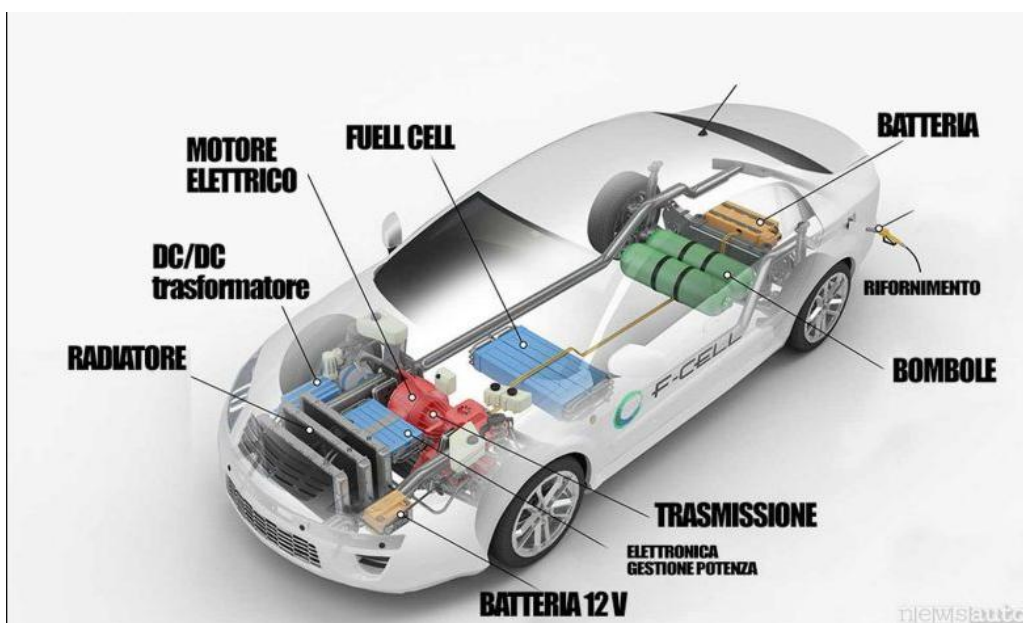


Figura 8: Schema di un veicolo FCEV [19]

Ad oggi i veicoli ad idrogeno sono ancora poco diffusi, *Figura 8*, sia in Italia che in Europa, principalmente a causa dell'infrastruttura carente e degli scarsi investimenti in questo settore, infatti a differenza dei Battery Electric Vehicles per cui i vari Stati europei hanno impiegato notevoli incentivi sia col fine di far sviluppare dalle case costruttrici dei veicoli con tecnologie sempre più ottimizzate, sia per implementare una rete capillare di stazioni di ricarica su tutto il territorio. Le politiche Europee sulla mobilità però stanno puntando anche sull'incentivare i mezzi pesanti ad idrogeno, *Figura 9*, perché si è notato che l'autonomia di un HCV (High Goods Vehicle) alimentato ad idrogeno può essere paragonabile a quella di un HGV a gasolio. Infatti, è proprio su questa tipologia di veicoli che devono percorrere grandi distanze nel tempo minore possibile che si nota maggiormente la potenzialità dell'idrogeno, in quanto i rifornimenti sono brevi rispetto all'equivalente elettrico.

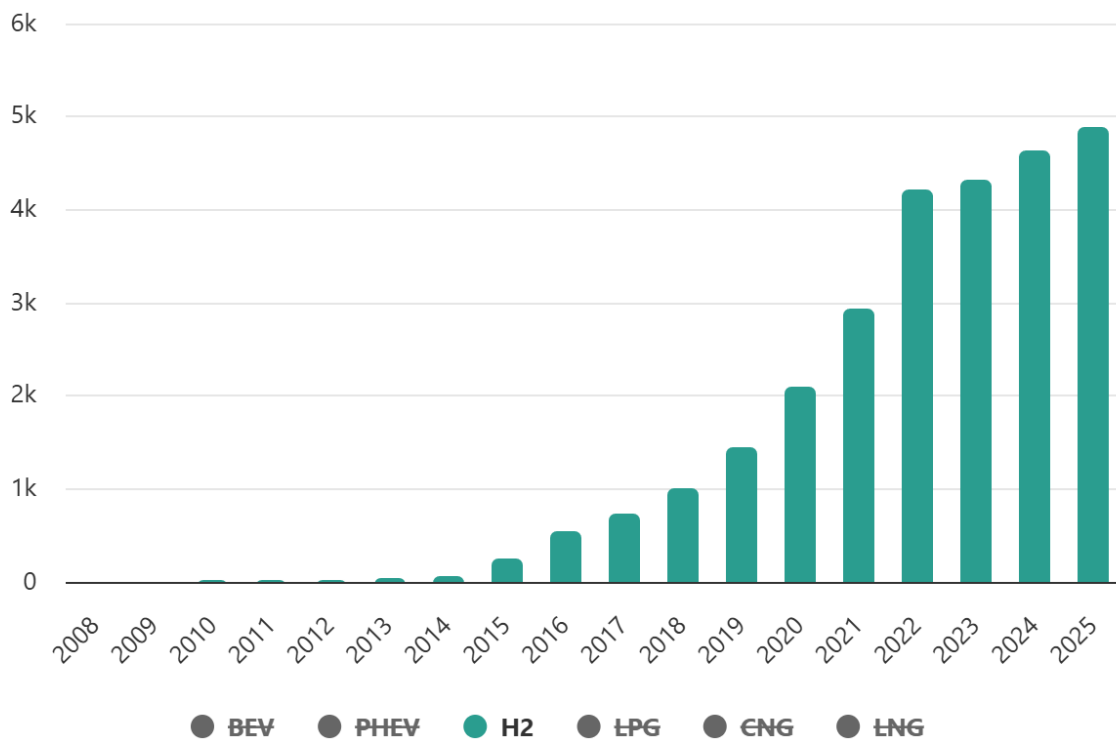


Figura 9: Numero totale di veicoli alternativi registrati in Europa, passenger car (PC) e veicoli commerciali (LCV) [20]

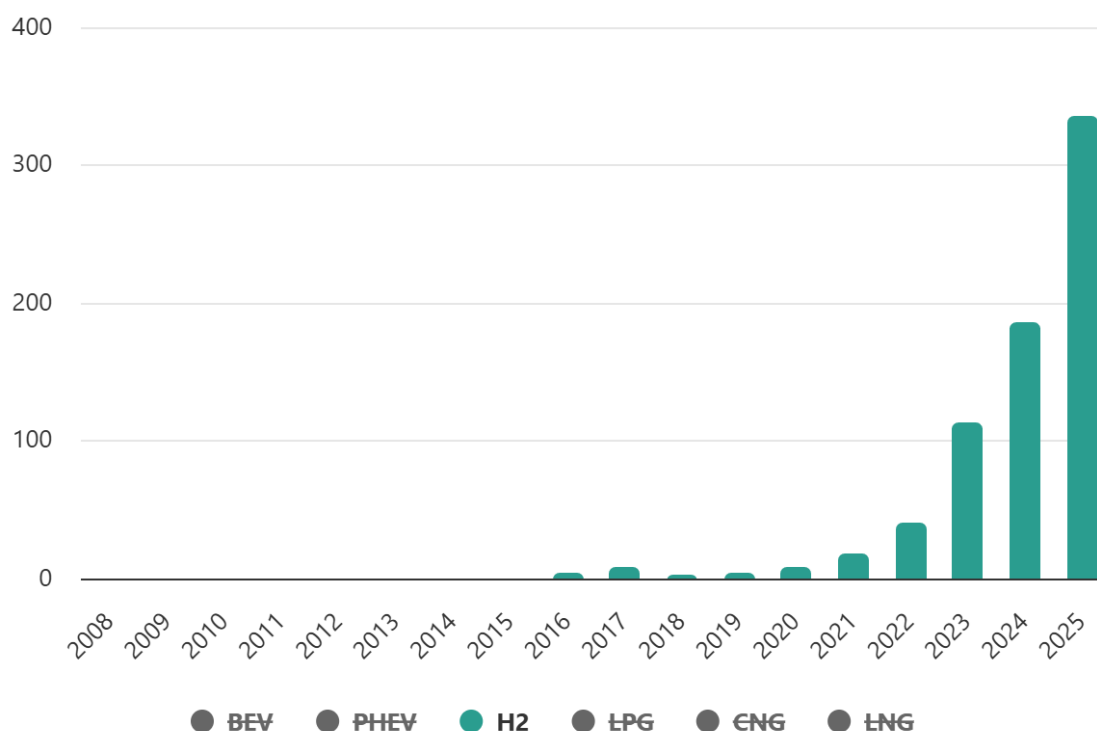


Figura 10: Numero totale di mezzi pesanti alternativi (HGV) registrati in Europa [20]

Prima di analizzare il funzionamento delle Fuel Cells è opportuno conoscere la struttura dei serbatoi in cui viene stoccato l'idrogeno compresso che negli anni hanno subito diverse trasformazioni. Il serbatoio di Tipo I è interamente composto da materiale metallico, solitamente acciaio o alluminio, impiegato soprattutto nelle applicazioni stazionarie a causa del peso elevato; inoltre, la pressione di stoccaggio è di 200-300 bar, per cui non adatta al settore dei trasporti. Il serbatoio di Tipo II è formato da uno strato interno di materiale composito, fibra di vetro e/o fibra di carbonio, ed un involucro esterno di materiale metallico [21]. Il problema principale di questi serbatoi, oltre al peso elevato e alla pressione di stoccaggio contenuta, è il fenomeno dell'embrittlement, ovvero l'infragilimento da idrogeno; infatti, esso tende a penetrare all'interno dei materiali metallici riducendone la duttilità e la resistenza a fatica ben al di sotto dei valori normativi stabiliti. Per questa ragione sono stati sviluppati il serbatoio di Tipo III e di Tipo IV. Il primo di essi è formato da un liner metallico, con la funzione di proteggere da eventuali urti esterni, completamente rivestito da un wrap composito costituito da fibra di carbonio annegata in una matrice polimerica, responsabile invece del 95% del carico strutturale all'interno del serbatoio [4]. È garantito per pressioni fino ai 450 bar, pertanto può essere installato sui mezzi pesanti che funzionano con pressioni di stoccaggio di 350 bar, ma non sui veicoli passeggeri. L'ultimo serbatoio, nonché quello più diffuso nell'industria automobilistica, è il Tipo IV formato completamente da materiale composito, viene utilizzato spesso il Polietilene ad Alta Densità (HDPE) [4] come rivestimento al posto dell'acciaio e un materiale composito come la fibra di carbonio/vetro per reggere i carichi meccanici. Ovviamente risulta il serbatoio più leggero tra tutti

quelli presentati nonché quello con la pressione di stoccaggio maggiore, che può raggiungere i 1000 bar. Esiste in realtà un ulteriore serbatoio, di Tipo V, che prevede una struttura completamente costituita da materiale composito senza nessun liner metallico/polimerico. Rispetto al serbatoio di tipo IV si verifica una riduzione di peso intorno al 10-20%, aumentandone anche la resistenza a fatica; nonostante i miglioramenti siano efficaci, al momento rimane una soluzione da laboratorio e quindi non ancora estendibile ai vari settori.

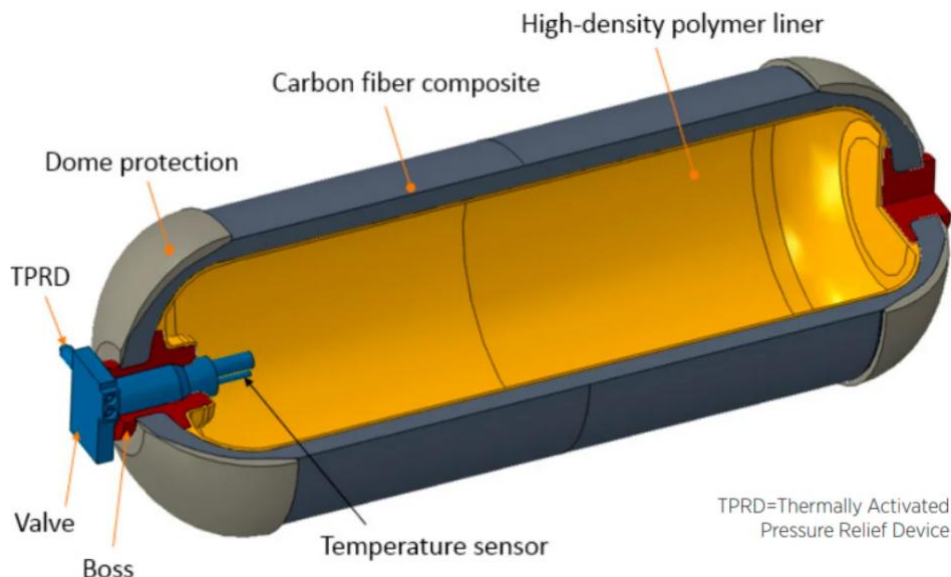


Figura 11: Schema illustrativo di un serbatoio per lo stoccaggio di idrogeno in un veicolo FCEV [22]

Toyota Mirai

Il primo modello FCEV di serie ad essere introdotto sul mercato fu la Toyota Mirai nel 2014 che adottava una cella a combustibile PEM con la reazione di riduzione dell'ossigeno migliorata di un fattore 1.8 rispetto a quella precedente. Inoltre, venne aumentata la densità di corrente che permise di ridurre la grandezza delle celle abbattendo di conseguenza i costi. Il numero di celle è pari a 370 affiancate le une alle altre con uno spessore di ogni cella pari a 1.34 mm, in grado di sviluppare una potenza di 114 kW [23]. oggi rinnova la tecnologia offrendone una seconda generazione. Dal 2021 il veicolo è stato rinnovato, aumentando la capacità dei suoi tre serbatoi e riducendo il consumo di idrogeno a 0.79 kg/100 km, raggiungendo così un'autonomia di 650 km [24].

Hyundai Nexa

Modello lanciato nel 2018 a seguito dell'esperienza maturata da Hyundai negli anni anche grazie al progetto precedente del 2013 chiamato Tucson ix35, garantiva una potenza della cella a combustibile pari a 95 kW ed un'autonomia superiore ai 600 km [25]. Alla fine del 2025 viene presentata la nuova versione che prevede miglioramenti alla cella a combustibile con una potenza pari a 110 kW, al

sistema batteria passando da una potenza di 40 kW a 80 kW con una capacità di 2.64 kWh ed infine un volume totale dei tre serbatoi pari a 162.6 l [26] che permette di percorrere 700 km con un pieno di idrogeno. Il tempo impiegato per il rifornimento si aggira intorno ai 5 minuti [27].

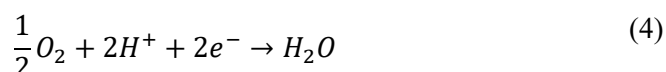
Honda Clarity

Honda lanciò il suo primo modello FCEV nel 2008 con la FCX Clarity che sfruttava una cella a combustibile da 100 kW e con un serbatoio da 4.1 kg era in grado di percorrere 390 km [28]. Nel 2016 viene rinnovata dando vita al modello Clarity, il quale prevede una riduzione del numero di celle del 30% [29] grazie all'aumento della densità di corrente che circola in esse, portando anche ad una riduzione di spazio e di peso. Avere una cella a combustibile contenuta ha permesso di abbassare il veicolo rispetto al precedente, aumentando l'efficienza e l'autonomia, che combinata con un incremento della capienza del serbatoio è salita a 589 km [28].

2.1 Fuel Cell

Le celle a combustibile sono una delle più antiche tecnologie per la produzione di energia elettrica che però negli anni ha trovato poco sviluppo rispetto all'utilizzo dei combustibili fossili. Con il bisogno sempre più crescente di limitare l'impatto ambientale generato dalle fonti fossili, le fuel cell ad idrogeno rappresentano un aiuto notevole in quanto l'unico prodotto emesso è l'acqua, inoltre hanno un'efficienza maggiore rispetto ai classici motori termici. A differenza di quest'ultimi che per produrre energia elettrica richiedono un processo di combustione, o delle batterie che una volta esaurita la loro capacità devono essere sostituite, le celle a combustibile utilizzano un processo termochimico che sfrutta delle celle elettrochimiche. Le celle sono formate da tre elementi fondamentali più un circuito elettrico che permette il passaggio di elettroni da un elettrodo all'altro:

- Anodo: elettrodo negativo nel quale avviene la reazione di ossidazione, l'idrogeno rilascia elettroni formando ioni (H^+)
- Catodo: elettrodo positivo in cui avviene la reazione di riduzione dell'ossigeno presente nell'aria che reagendo con gli elettroni e i protoni (H^+) presenti nell'elettrolita forma l'acqua come prodotto
- Elettrolita: soluzione acquosa (nella maggior parte dei casi) che funge da interfaccia tra i due elettrodi, permettendo il passaggio degli ioni



La caduta di tensione che si genera in ogni cella è massima quando la corrente che circola nel circuito è nulla. Quando essa comincia a circolare la tensione si riduce a causa di fenomeni di polarizzazione e di potenza termica dissipata, motivo per cui la differenza di potenziale tra gli elettrodi di ogni cella è relativamente basso, nell'ordine di 1 V.

Esistono diversi tipi di celle a combustibile e si è soliti distinguerle in funzione dell'elettrolita adoperato; di seguito verranno elencate le tipologie più comuni:

- Celle a combustibile alcaline (AFC)
- Celle a combustibile ad acido fosforico (PAFC)
- Celle a combustibile a membrana a scambio protonico (PEMFC)
- Celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC)
- Celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC)
- Celle a combustibile a metanolo diretto (DMFC)

2.1.1 Celle a combustibile alcaline

Chiamate così perché l'elettrolita che le costituisce è una soluzione alcalina di idrossido di potassio (KOH) che può essere mobile o statica; nel primo caso la soluzione circola continuamente tra gli elettrodi garantendo anche una migliore efficienza, nel secondo caso invece la soluzione è inglobata all'interno di una matrice porosa di amianto, formando uno strato sottile adiacente agli elettrodi.

Lavorano principalmente a bassa temperatura tra i 65-80 °C [30] per le applicazioni di tipo stazionario ma possono essere impiegate anche in settori in cui è richiesta una velocità di reazione e un'efficienza superiore come il campo aerospaziale; infatti, sono state le prime celle a combustibile ad essere utilizzate dalla NASA per le missioni Apollo e successivamente per gli Space Shuttle [31]. Se impiegate in questo settore, lavorano a medie temperature nell'ordine dei 200-250 °C. Il loro grande limite è l'intolleranza alla CO₂ che tende a degradare elettrolita compromettendo sia le reazioni di riduzione sia di ossidazione, con un conseguente abbassamento dell'efficienza; sempre per questo motivo è opportuno usare come combustibile solo idrogeno puro (H₂) derivante da elettrolisi e non prodotto tramite processi di reforming o gassificazione poiché potrebbe contenere una certa frazione di anidride carbonica [30], la quale risulterebbe costosa da eliminare.

All'anodo e al catodo avvengono rispettivamente le seguenti reazioni:

- Anodo: $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$
- Catodo: $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$

All'anodo l'idrogeno reagisce con gli ioni ossidrili (OH⁻) presenti nell'elettrolita formando acqua e liberando elettroni, che attraversando il circuito esterno generano energia elettrica e raggiungono il

catodo, in cui l'ossigeno reagisce con essi e con l'acqua dando vita a nuovi ioni idrossido. Le reazioni sono velocizzate tramite l'uso di catalizzatori al platino, anche se la ricerca si sta concentrando sul trovare soluzioni più economiche.

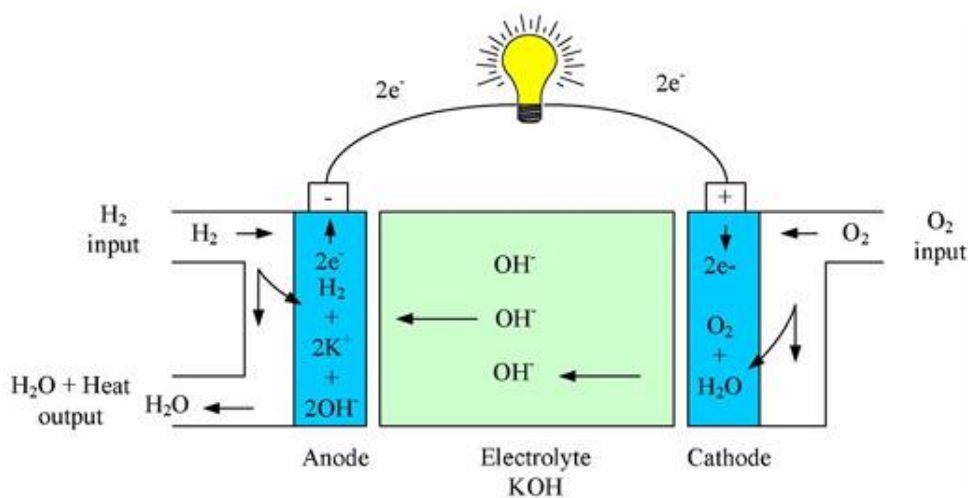


Figura 12: Principio di funzionamento di una cella AFC [30]

2.1.2 Celle a combustibili ad acido fosforico

Sono celle che utilizzano come elettrolita l'acido fosforico inglobato in una matrice di carburo di silicio, funzionanti a temperature medie intorno ai 150-200 °C per raggiungere un'elevata conduttività. Sono state sperimentate la prima volta all'inizio degli anni '60 in cui per funzionare correttamente necessitavano di una quantità di platino come catalizzatore pari a 10 mg/cm², valore che negli anni è stato ridotto a circa 0.1 mg/cm² [32]. Il rendimento delle PAFC può raggiungere l'85% quando utilizzate in cogenerazione [30].

A differenza della cella AFC, l'elettrolita acido conduce ioni (H⁺) dall'anodo al catodo, alimentati rispettivamente con idrogeno ed aria. Tollerano la presenza di CO₂ e CO fino a concentrazioni massime rispettivamente del 30% e del 2% [30]. L'acido fosforico essendo altamente corrosivo può danneggiare i materiali che compongono la cella; inoltre, solidificando a 42.4 °C è necessario un sistema che lo riscaldi anche quando la cella non è attiva.

Le reazioni che avvengono nella cella:

- Anodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Catodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

L'idrogeno all'anodo si decompone liberando ioni (H⁺) che attraversano l'elettrolita ed elettroni che invece fluiscono nel circuito elettrico esterno generando corrente elettrica. Al catodo l'ossigeno reagisce con gli ioni (H⁺) e con gli elettroni producendo acqua.

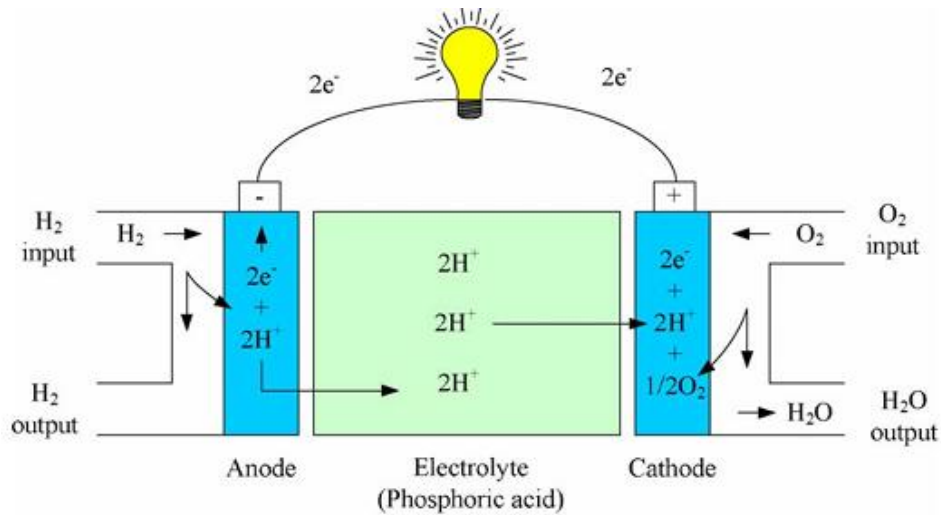


Figura 13: Principio di funzionamento di una cella PAFC [30]

2.1.3 Celle a combustibile a membrana a scambio protonico

A differenza delle celle analizzate in precedenza l'elettrolita è solido, formato da una membrana solfonica perfluorurata (Nafion) con uno spessore tra i 50-200 μm che permette di lavorare a basse temperature comprese tra gli 80-120 $^{\circ}C$ ed avere una buona stabilità chimica. La struttura della cella è formata da un MEA (Membrane Electrode Assemblies) racchiusa tra due piatti bipolari. Il MEA è formato dalla membrana solida, dai due elettrodi porosi saturi di platino per velocizzare la reazione e dai GDL (Gas Diffusion Layer) [33], ovvero un supporto poroso che permette il trasporto del gas reagente distribuendolo in modo uniforme al catalizzatore e facilitare il passaggio degli elettroni. I GDL sono formati da tre strati:

- Strato macroporoso: formato da un tessuto carbonioso con uno spessore di 300-400 μm trattato con del PTFE (politetrafluoroetilene) per renderlo idrofobo [34]
- Strato microscopico: formato rivestendo lo strato macroporoso con una miscela di polvere di carbonio spessa 10-100 μm [34]
- Strato catalitico: formato da uno strato finissimo di platino (10-50 μm) disperso in nanoparticelle [34]

All'estremità del MEA sono presenti i piatti bipolari che permettono la connessione in serie di più celle e soprattutto provvedono sia all'eliminazione dei liquidi prodotti dalla reazione sia al raffreddamento della cella attraverso delle scanalature appositamente progettate.

Le reazioni che avvengono nella cella sono le seguenti:

- Anodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Catodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

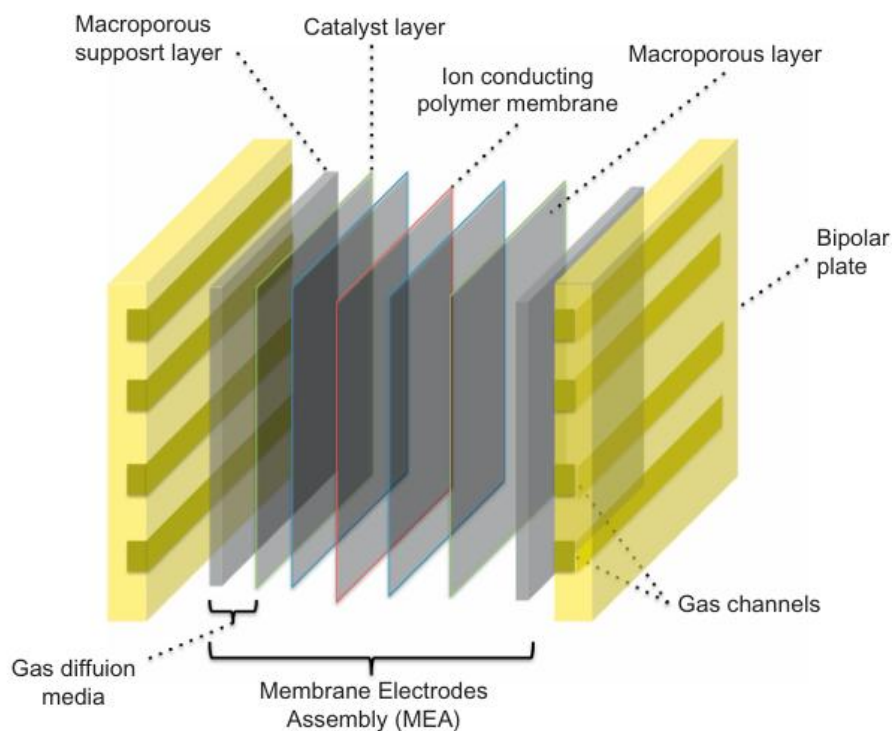


Figura 14: Layout di una cella PEMFC [33]

Come le celle precedenti anche le PEM presentano dei punti di forza e dei difetti da migliorare. Come pregio c'è sicuramente la mancanza di un elettrolita liquido corrosivo, che nel tempo può limitare la vita utile del sistema; ma non solo, infatti è una cella in grado di tollerare l'anidride carbonica permettendo così l'utilizzo di aria prelevata direttamente dall'atmosfera, inoltre possiede alte densità di corrente e tensione. Ha invece lo svantaggio di essere molto costosa sia a causa dell'elevata quantità di catalizzatori al platino sia per la membrana polimerica stessa; inoltre è molto sensibile alle impurità presenti nell'idrogeno e non tollera concentrazioni di CO superiori alle 50 ppm. Infine, per garantire un corretto funzionamento richiede un'adeguata umidificazione della cella con conseguente controllo delle condizioni di temperatura e pressione.

2.1.4 Cella a combustibile a carbonati fusi

Le celle MCFC utilizzano come elettrolita una miscela fusa di carbonato di litio (Li_2CO_3) e potassio (K_2CO_3) contenuta in una matrice ceramica ad una temperatura di circa 650 °C [30] che permette il passaggio degli ioni carbonato (CO_3^{2-}) dal catodo all'anodo. A differenza di altre celle in cui è necessario contenere se non addirittura eliminare la presenza di CO_2 , in questo caso è indispensabile per far avvenire la reazione; infatti, come input al catodo sono previsti l'ossigeno e l'anidride carbonica come mostrato in Figura 15. Viste le alte temperature la cella può essere alimentata

all'anodo anche con gas naturale che attraverso un processo di reforming può sfruttare il calore di scarto della cella dando origine ad idrogeno [31].

Le reazioni sono le seguenti:

- Anodo: $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$
- Catodo: $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$

Al catodo si verifica la riduzione dell'ossigeno che insieme all'anidride carbonica forma gli ioni carbonato, che attraversando l'elettrolita giungono all'anodo in cui producono acqua e anidride carbonica, la quale a sua volta dovrà essere condotta nuovamente all'elettrodo positivo.

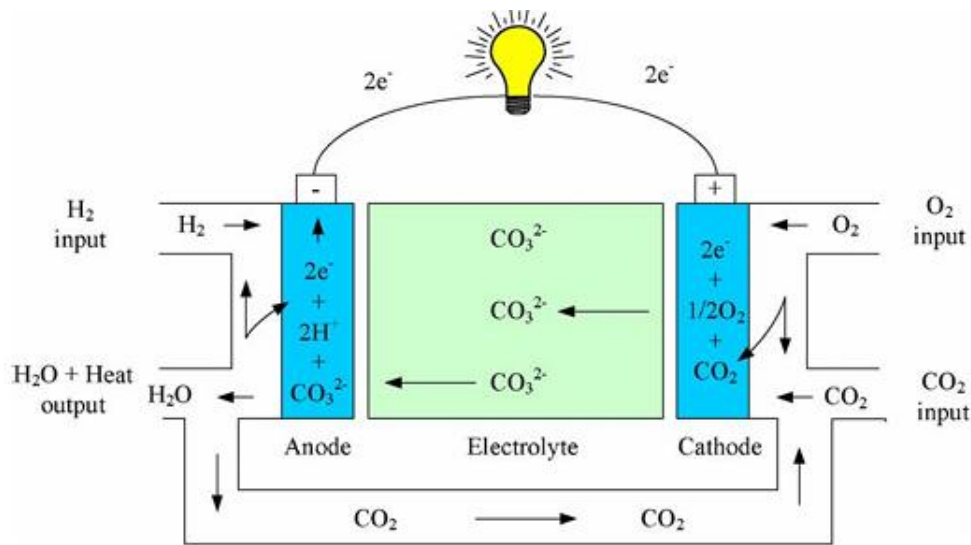


Figura 15: Principio di funzionamento di una cella MCFC [30]

Nonostante sia una cella che trova sviluppo in diverse applicazioni grazie al range di potenza capace di generare, dai 10 kW ai 2 MW, possiede dei difetti da tenere in considerazione. Gli elettrodi essendo realizzati in ossido di nichel possono dissolversi nell'elettrolita causando dei malfunzionamenti, anche se questa soluzione permette di abbattere i costi sui materiali nobili come il platino. Non sono in grado di tollerare concentrazioni di solfuri superiori a 1.5 ppm e necessitano di un preriscaldamento prima di entrare in funzione a causa dell'elevate temperature che si raggiungono, motivo per cui sono celle impiegate maggiormente in impianti energetici stazionari.

2.1.5 Celle a combustibile ad ossidi solidi

Questo tipo di cella utilizza un elettrolita costituito da un ossido di zirconio (ZrO_2) stabilizzato con ossido di ittrio (Y_2O_3), il quale a temperature superiori di 800 °C diventa un conduttore di ioni

ossigeno (O^{2-}) [34]. L'anodo è solitamente formato da ossido di nickel ed ittrio; il primo ha un basso costo e una buona conducibilità elettrica, il secondo ha una struttura porosa che permette il passaggio dei gas. Il catodo invece è costituito da una struttura porosa di manganite di lantanio drogata con stronzio, anch'essa con una buona conducibilità termica e compatibilità con l'elettrolita [34], permettendo di eliminare i catalizzatori costosi come il platino. Esattamente come le celle MCFC consentono di utilizzare il calore di scarto per processi di reforming interno, permettendo l'alimentazione anche con gas metano desolfato [31].

Le reazioni che avvengono sono:

- Anodo: $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$
- Catodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

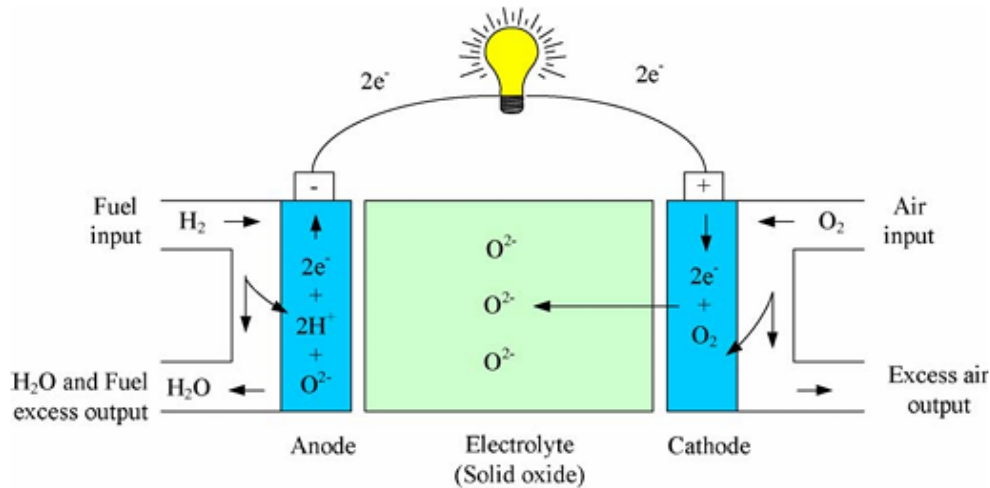


Figura 16: Principio di funzionamento di una cella SOFC [30]

Utilizzando un elettrolita solido si eliminano i problemi di corrosione che invece sono presenti con un elettrolita liquido, oltre alla possibilità di alimentare la cella con più combustibili oltre all'idrogeno, aspetto che garantisce una maggiore versatilità del sistema. Al contrario però sono necessari materiali in grado di resistere a temperature elevate senza degradarsi, garantendo comunque una buona compatibilità chimica tra i componenti.

2.1.6 Celle a combustibile a metanolo diretto

È l'unica cella tra quelle viste che non utilizza l'idrogeno come fonte primaria ma il metanolo, ovvero un alcol. Rappresenta una tecnologia moderna risalente agli anni '90 sviluppata inizialmente dalla NASA in collaborazione con l'University of Southern California [30] con l'obiettivo di sostituire le tradizionali batterie dei piccoli dispositivi elettronici con potenze fino a 20 W, in quanto possiedono

una vita utile maggiore. La struttura è simile a quella vista per le celle PEMFC in cui è presente un MEA contenuto tra i piatti bipolari. Essa prevede un elettrolita a membrana a scambio protonico (PEM) di tipo Nafion posto tra i due elettrodi. L'anodo è composto da una lega di platino-rutenio in cui il platino ha la funzione di catalizzare la reazione di ossidazione, il catodo è formato da una struttura catalitica porosa di platino. I GDL hanno la funzione di garantire l'accesso alla superficie reattiva ed eliminare l'acqua prodotta a fine reazione. A differenza delle celle PEMFC in cui la membrana è impermeabile ai reagenti, nelle celle DMFC la membrana è parzialmente permeabile permettendo la penetrazione del metanolo dall'anodo fino al catodo. Questo fenomeno è chiamato *crossover*, in cui il metanolo viene direttamente ossidato dall'ossigeno gassoso senza produrre elettroni utili alla generazione di corrente elettrica [35].

Di seguito sono elencate le reazioni elettrochimiche:

- Anodo: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 2H^+ + 2e^-$
- Catodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$

La soluzione di metanolo e acqua entra nell'anodo subendo la reazione di ossidazione con cui produce anidride carbonica e libera ioni idrogeno ed elettroni. Gli ioni (H^+) fluiscono nell'elettrolita fino al catodo; invece, gli elettroni percorrono il circuito elettrico esterno. Al catodo entra l'ossigeno che si riduce formando acqua.

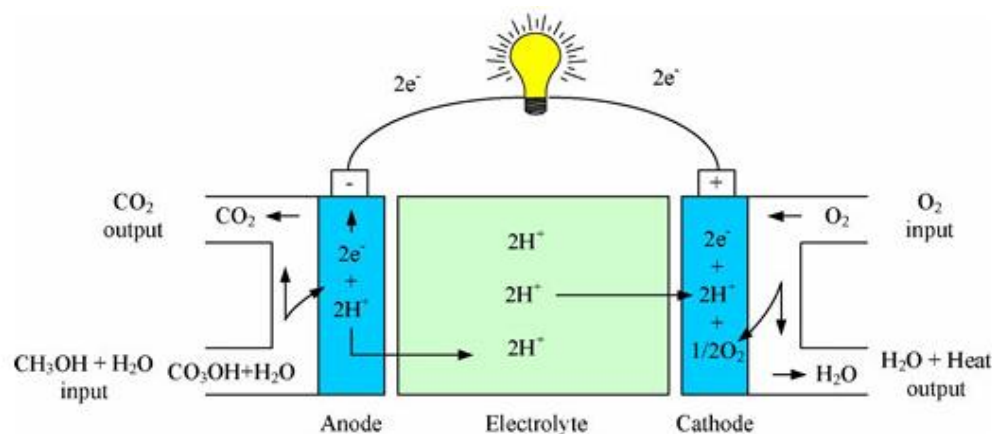


Figura 17: Principio di funzionamento di una cella DMFC [30]

2.2 Rischio di incendio

I veicoli ad idrogeno sono caratterizzati da modalità di incendio completamente differenti rispetto ai veicoli tradizionali, con conseguenze che devono ancora essere studiate in modo approfondito essendo una tecnologia moderna. Quello che si conosce ad oggi sono le varie tipologie di incendio che si possono scatenare a seguito di una perdita di idrogeno, ma la difficoltà maggiore è capire come limitare il fenomeno poiché cambia a seconda delle condizioni ambientali in cui ci si trova. Il fenomeno di incendio varia a seconda della quantità di moto dell'idrogeno durante la perdita; se il fenomeno è caratterizzato da un'elevata quantità di moto si avrà un *jet fire*; invece, se prevale la forza di galleggiamento l'idrogeno tende a salire in alto formando una nube (*plume*).

- Jet fire: rappresenta un fenomeno locale in cui l'idrogeno fuoriesce dal serbatoio in quantità moderate ma in regime turbolento, provocando un getto ad alta velocità monodirezionale in grado di creare ingenti danni a persone e strutture.
- Fireball: rilascio massivo di idrogeno con innesco ritardato che tende a creare una “palla di fuoco” di forma sferica e/o ellittica ricca di combustibile in grado di bruciare solo esternamente, caratterizzata da un'elevata irradiazione.
- Vapour Cloud Fire: combustione di una nube infiammabile a lenta deflagrazione, ovvero il fronte di fiamma penetra nella nube in regime subsonico generando un incendio privo di sovrappressione.
- Vapour Cloud Explosion: combustione di una nube infiammabile a rapida deflagrazione, caratterizzato da un fronte di fiamma in grado di penetrare la nube ad alta velocità generando delle forti sovrappressioni (esplosioni) che rappresentano lo scenario peggiore sia per le persone sia per gli oggetti.

Il Jet Fire verrà citato anche nel seguito della trattazione, motivo per cui si intende approfondire ora alcuni aspetti. Nei veicoli ad idrogeno, i serbatoi sono dotati di una valvola di sicurezza TPRD (*Thermally Activated Pressure Relief Device*) che si apre quando il sensore raggiunge una temperatura di 110 °C in modo da rilasciare l'idrogeno gradualmente ed evitare un'esplosione. Il rilascio dell'idrogeno ad alta pressione, associato ad un'energia di innesco molto bassa, ne provoca l'accensione che si manifesta sottoforma di getto ad elevata temperatura e velocità. Su tutti i veicoli passeggeri FCEV i serbatoi sono montati più in basso possibile sia per un miglior bilanciamento dei pesi sia ragioni di sicurezza; infatti, si è notato che rivolgendo le valvole TPRD in direzione del pavimento con un angolo compreso tra i 30°-45° all'indietro rispetto al suolo, i danni provocati risultano di entità inferiore comparati a quelli relativi alle valvole in posizione verticale senza nessun angolo di inclinazione [36]. Nel 2024, proprio a causa di un presunto malfunzionamento della valvola TPRD è stata effettuata una campagna di richiamo per 1600 Hyundai Nexi negli Stati Uniti e Canada, anche se a seguito di verifiche approfondite è stato constatato che solo l'1% delle auto richiamate presentavano effettivi difetti tecnici [37].

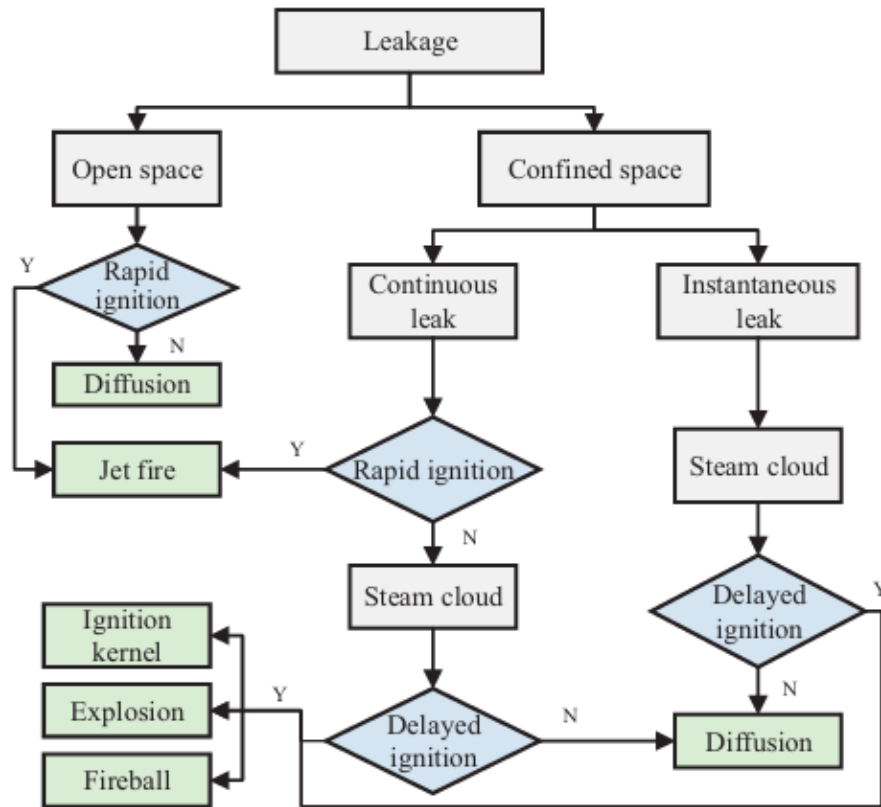


Figura 18: Flow chart dei rischi associati ad una perdita di idrogeno [38]

Gli incidenti verificati sono relativamente rari e riguardano principalmente i bus; a dicembre del 2024 un autobus è esploso in Corea del Sud mentre effettuava il rifornimento ad una stazione di ricarica, causato da un malfunzionamento della cella a combustibile, provocando ferite significative all'addetto alla stazione di rifornimento e al conducente del mezzo [39]. In California a luglio del 2023 un altro autobus ad idrogeno è stato distrutto a seguito di una esplosione avvenuta durante la ricarica del mezzo [40]. Non ci sono invece particolari evidenze di incidenti gravi avvenuti durante la marcia dei veicoli, uno dei pochi ad essere documentato dal momento di commercializzazione su larga scala dei mezzi ad idrogeno riguarda una Toyota Mirai che nel 2015 negli USA ha subito un tamponamento a bassa velocità nella zona in cui sono presenti i serbatoi, i quali non hanno subito danni. Neppure il veicolo ne ha subiti in quanto i sistemi di sicurezza sono intervenuti tempestivamente spegnendolo. [41]

3. Studio simulativo: incendio di un veicolo ad idrogeno in un parcheggio coperto

L'interesse di questo studio è analizzare l'incendio di un veicolo ad idrogeno all'interno di uno spazio chiuso come un parcheggio sotterraneo e confrontarne i risultati in termini di temperatura, visibilità e gas tossici prodotti con un veicolo tradizionale (ICE). Per lo studio è stato utilizzato un software di simulazione CFD chiamato Pyrosim, creato dalla Thunderhead Engineering, il quale rappresenta un precompilatore di FDS, Fire Dynamics Simulator sviluppato dal NIST. In sintesi, Pyrosim sfrutta come simulatore FDS ma permette di creare un modello in modo più rapido ed intuitivo senza dover scrivere direttamente i codici di calcolo. I risultati delle simulazioni sono visibili attraverso i post-processor *Pyrosim Result Viewer* e *Smokeyview*.

3.1 Creazione del modello

Si intende attirare l'attenzione sul fatto che il modello creato non rappresenta un parcheggio esistente ma è stato considerato come caso rappresentativo di un parcheggio interrato residenziale, con un numero totale di otto posti auto. Nella parte alta del modello in *Figura 19* sono presenti l'entrata e l'uscita del parcheggio; invece, nella parte centrale si trovano due locali adiacenti che rappresentano rispettivamente un locale tecnico e il vano scale; quest'ultimo viene utilizzato anche come via di esodo da parte degli occupanti in caso di incendio. L'altezza del parcheggio è di 2.75 m.

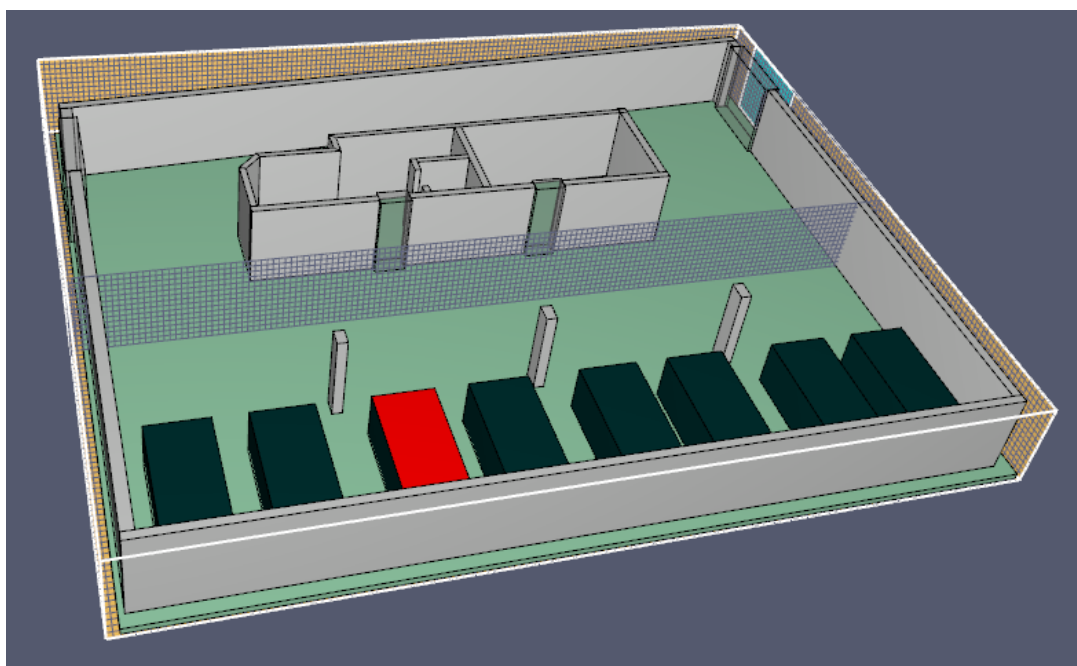


Figura 19: Modello 3D del parcheggio

I blocchi in verde scuro raffigurano i veicoli di taglia media; invece, la superficie rossa è necessaria per indicare il focolare di incendio, aspetto che verrà trattato meglio in seguito. Si considera che solo la superficie superiore bruci.

In *Figura 19* si nota una griglia sia nella parte centrale sia agli estremi del dominio, la quale permette al software di risolvere numericamente il sistema di equazioni di Navier-Stokes-Fourier in ogni cella. Infatti, la griglia si divide in celle che a seconda della dimensione garantiscono una precisione differente al modello, in questo caso sono state utilizzate 247'500 celle da 0.18 m ciascuna, in modo da garantire una buona accuratezza su tutto il dominio, circostanza possibile in quanto il modello ha un'area limitata. Stabilita la mesh è necessario definire le condizioni al contorno, indispensabili affinché la simulazione funzioni e sia più realistica possibile; Pyrosim richiede di inserire dei contorni aperti così che il modello abbia almeno un punto di contatto con le condizioni ambientali esterne, nel caso in esame, infatti, sono stati inseriti due contorni aperti che rappresentano l'entrata e l'uscita dal parcheggio (di colore azzurro). Tutti gli altri lati hanno invece dei contorni chiusi perché essendo presenti i muri non si verifica nessuno scambio di massa tra interno ed esterno. La griglia nella parte centrale del modello è stata inserita in modo da dividere il dominio in due parti uguali per sfruttare un comando chiamato *Run Parallel*, il quale permette di utilizzare il calcolo parallelo riducendo i tempi computazionali, soprattutto quando il numero delle celle è elevato.

Per avere un modello più realistico possibile è opportuno inserire anche i giusti materiali, soprattutto se si intende studiare la trasmissione del calore di una specifica parete oppure se la temperatura raggiunta da una superficie possa provocare dei danni strutturali. I muri sono realizzati in mattoni, su Pyrosim chiamati *Fire Brick*, il pavimento in cemento (*concrete*) e i veicoli sono formati da strati di acciaio e plastica/gomma.

In ognuno dei due modelli, sia per il veicolo ad idrogeno sia per quello tradizionale, sono stati analizzati tre scenari differenti:

- Scenario 1: incendio di un'auto senza nessun tipo di impianto presente nel parcheggio.
- Scenario 2: incendio di un'auto con la presenza di un impianto di tipo sprinkler posizionato nella zona dei veicoli.
- Scenario 3: incendio di un'auto in presenza di un impianto di tipo sprinkler ed un impianto di estrazione dei fumi, entrambi posizionati nella zona in cui sono parcheggiati i veicoli.

È stato scelto un impianto antincendio di tipo sprinkler perché è uno dei più utilizzati in queste situazioni e soprattutto perché in uno spazio così limitato un impianto water mist o a privazione di ossigeno sarebbero stati poco realistici oltre che costosi. Sempre per motivi di spazio si è optato per un impianto di estrazione dei fumi rispetto ai jet fan utilizzati invece nei parcheggi multipiano e nei tunnel autostradali, anche se il Decreto Prevenzione Incendi del 2015 non prevede impianti di ventilazione meccanica per parcheggi di questo tipo.

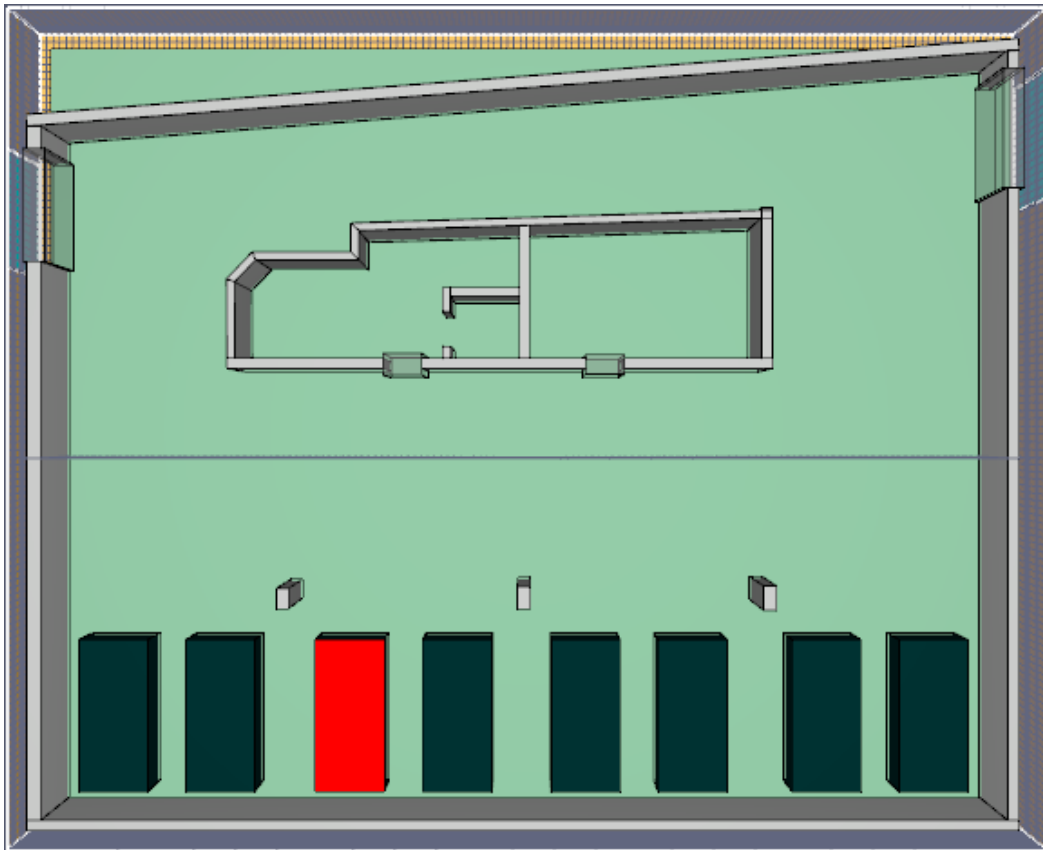


Figura 20: Layout del modello nello Scenario 1

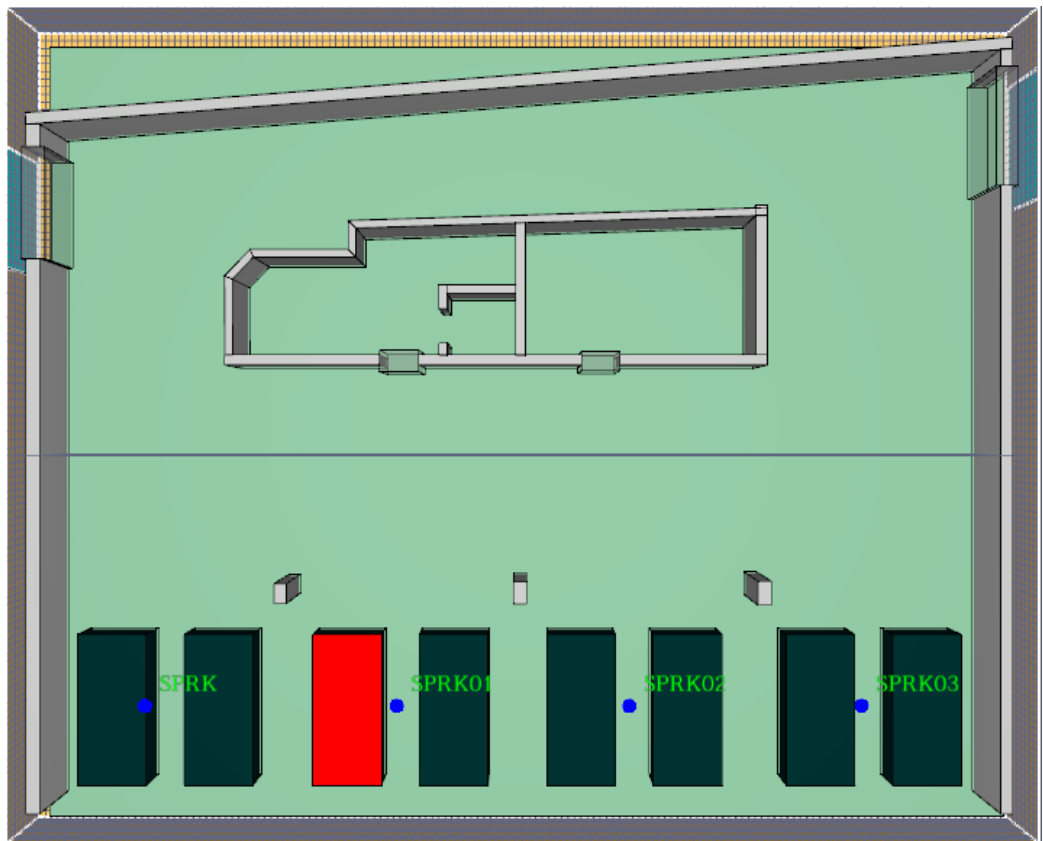


Figura 21: Layout del modello nello Scenario 2

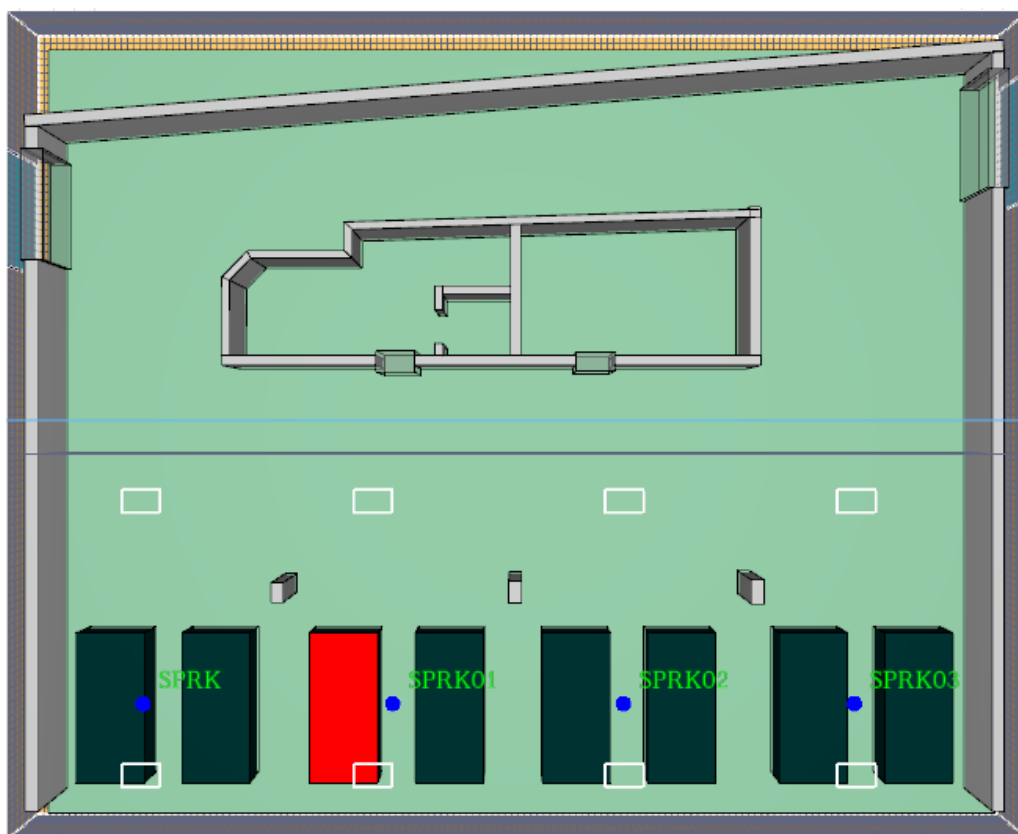


Figura 22: Layout del modello nello Scenario 3

3.1.1 Impianti installati

Come già anticipato nel *Paragrafo 3.1*, negli Scenari 2 e 3 sono stati installati degli impianti sprinkler e/o di ventilazione meccanica.

Impianto antincendio di tipo sprinkler

Per quanto riguarda l'impianto antincendio di tipo sprinkler, si tratta di un circuito carico d'acqua (negli impianti ad umido) il cui ugello di erogazione è chiuso da un bulbo contenente un liquido termosensibile che si rompe non appena la temperatura dell'ambiente raggiunge la soglia limite pari a 70 °C nei casi commerciali/residenziali. Esistono diverse temperature di attivazione degli sprinkler a seconda degli ambienti in cui vengono installati, i quali si distinguono in base al colore del liquido presente nel bulbo.

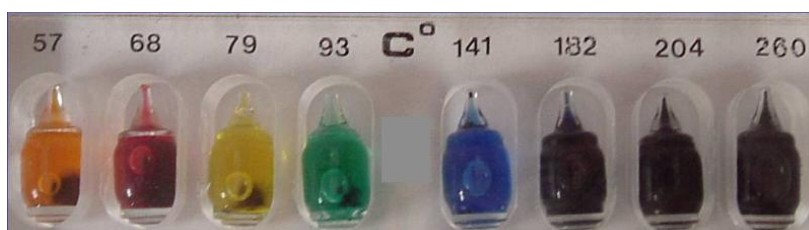


Figura 23: Codice colore per le testine a bulbo di vetro [39]

Quando la testina comincia l'erogazione, l'acqua impatta su un deflettore in grado di ampliare il getto coprendo una superficie maggiore; inoltre, esiste una classificazione anche a seconda di come avviene l'erogazione e di come sono posizionati gli sprinkler:

- Pendente: in cui la tubazione dell'acqua si trova sopra la testina erogatrice, l'effetto è simile a quello della pioggia
- Verticale: stessa configurazione di quello a pendente ma a parti invertite, ovvero l'acqua fluisce dal basso verso l'alto e impattando contro il deflettore crea un effetto a pioggia.
- Orizzontale: le testine sono installate a muro e non a soffitto creando un getto parabolico.

Tutti gli sprinkler sono installati ad una altezza di 2.5 m con una distanza dalle pareti pari a 2.3 m come stabilito dalla normativa UNI-EN 12845 del 2015 in caso di disposizione regolare [40].

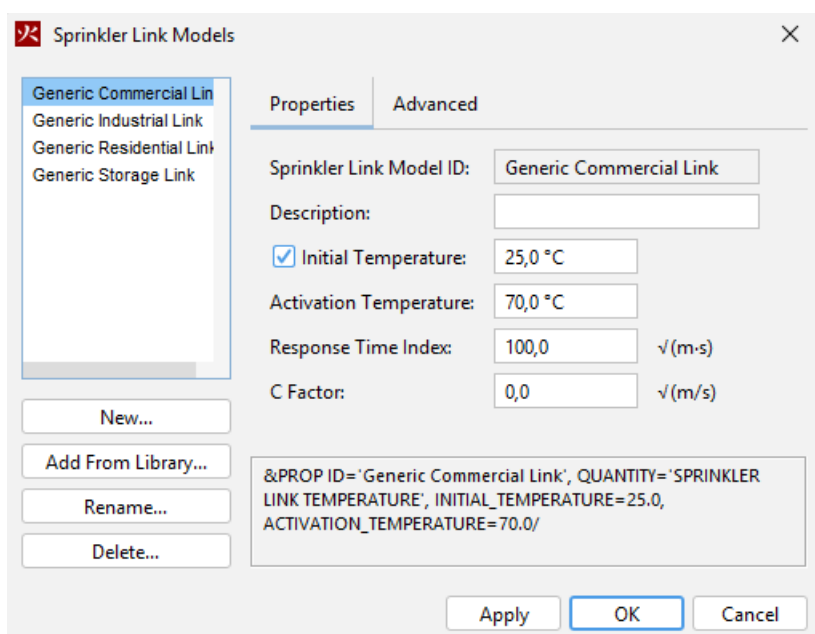


Figura 24: Parametri di progetto dell'impianto sprinkler

Impianto di ventilazione meccanica

L'impianto di ventilazione meccanica consiste nell'estrazione dei fumi attraverso delle griglie posizionate nella zona in cui sono parcheggiati i veicoli. Essa è possibile grazie a dei ventilatori in grado di creare una depressione nell'ambiente che fa convogliare i fumi verso le griglie di estrazione mantenendo l'ambiente libero da essi per il tempo necessario all'esodo degli occupanti. Inoltre, essendo presenti due aperture verso l'esterno di superficie non inferiore ad $1/25$ [41] della superficie totale, come prescritto dal DM del 1/02/1986, nell'istante in cui si attiva la ventilazione entra dell'aria fresca proveniente dall'esterno che diluisce la concentrazione di inquinanti causata dall'incendio. La ventilazione viene attivata non appena la visibilità scende al di sotto di una soglia limite pari a 10 m. Nel caso di normale funzionamento l'impianto deve garantire sempre almeno tre ricambi orari, nel

caso di incendio è stato fissato un valore di 10 volumi orari coerente con altri casi studio [45], nonché stabilito da una normativa inglese [46]. Per implementare l'impianto all'interno di Pyrosim è necessario creare una *Vent*, che rappresenta la griglia di estrazione, a cui si applica una condizione di *Exhaust* per la quale il software riconosce che in quel punto vi è un'estrazione di massa. Le griglie sono poste a soffitto e hanno tutte una dimensione di 1 m x 0.58 m.

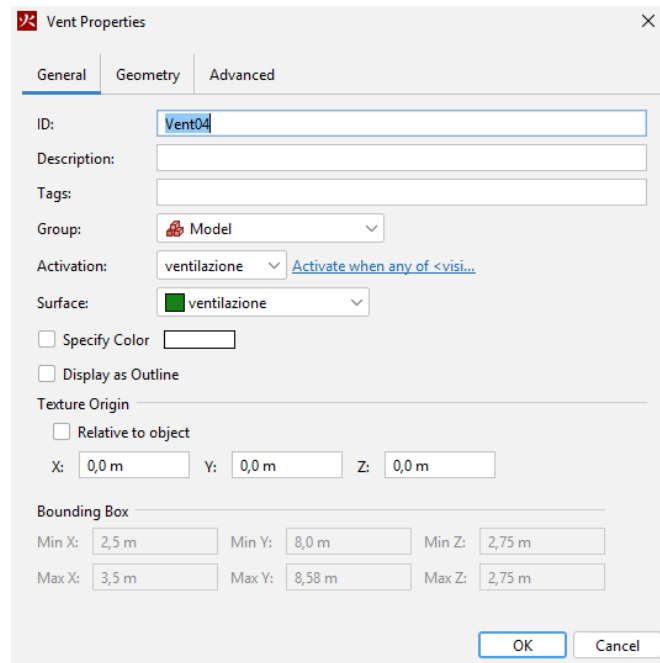


Figura 25: Proprietà della superficie di estrazione

In Figura 25 si possono notare due campi importanti: il primo è la superficie, ovvero la condizione al contorno associata alla *Vent* che in questo caso indica la portata d'aria da estrarre; il secondo è il campo *Activation* che permette di inserire un controllo su quando deve essere attivato l'impianto, ovvero quando la visibilità scende al di sotto dei 10 m come già citato in precedenza.

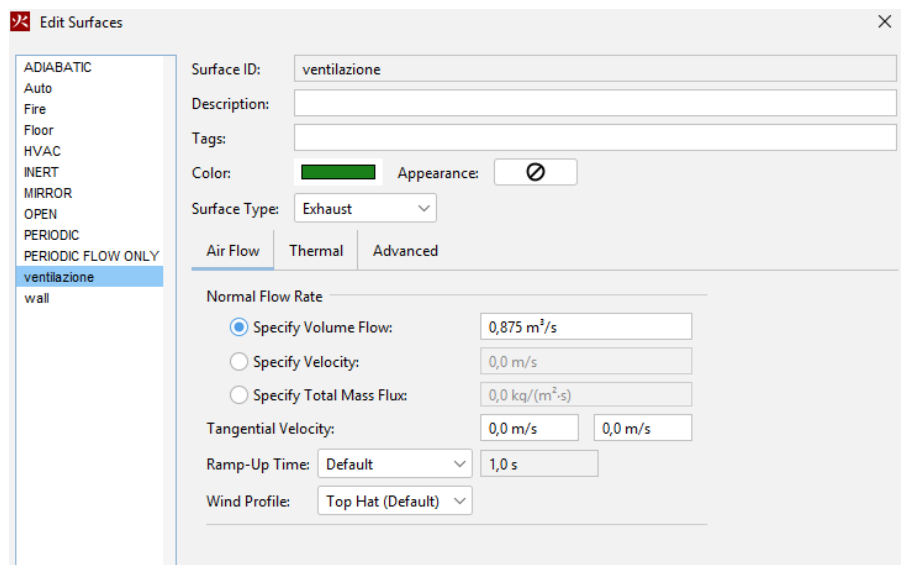


Figura 26: Parametri di progetto della superficie "Ventilazione"

3.1.2 Dispositivi per il controllo dei parametri

Nonostante i risultati delle simulazioni siano visibili in *Pyrosim Result* e in *Smokeview*, risulta molto più comodo lavorare con i grafici in modo da avere dei parametri esatti e poter fare delle comparazioni tra i diversi scenari, per questo è necessario installare dei dispositivi che permettano il controllo delle grandezze quali temperatura, visibilità, e gas tossici. Sono state scelte queste come grandezze poiché rappresentano le soglie prestazionali indicate dal Codice Prevenzione Incendi del 2015, nel dettaglio in *Tabella 4*.

Modello	Prestazione	Soglia di prestazione	Riferimento
Oscuramento della visibilità da fumo	Visibilità minima di pannelli riflettenti, non retroilluminati, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 10 m Occupanti in locali di superficie lorda < 100m²: 5 m	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 5 m Soccorritori in locali di superficie lorda < 100m²: 2,5 m	[1]
Gas tossici	FED, <i>fractional effective dose</i> e FEC, <i>fractional effective concentration</i> per esposizione a gas tossici e gas irritanti, valutata ad altezza 1,80 m dal piano di calpestio	Occupanti: 0,1	ISO 13571:2012, limitando a 1,1% la porzione di occupanti incapacitati al raggiungimento della soglia
		Soccorritori: nessuna valutazione	-
Calore	Temperatura massima di esposizione	Occupanti: 60°C	ISO 13571:2012
		Soccorritori: 80°C	[1]

Tabella 4: Soglie prestazionali in caso di incendio

Come indicato in *Tabella 4*, tutti i dispositivi nel modello sono stati disposti ad un'altezza di 1.8 m dal piano di calpestio, tranne per il sensore temperatura di fiamma che è stato posizionato a soffitto esattamente sopra l'incendio. Gli altri sensori di temperatura sono stati posizionati rispettivamente vicino alle due aperture e a fianco alla porta che dà accesso al vano scale, in quanto funge anche da uscita di emergenza.

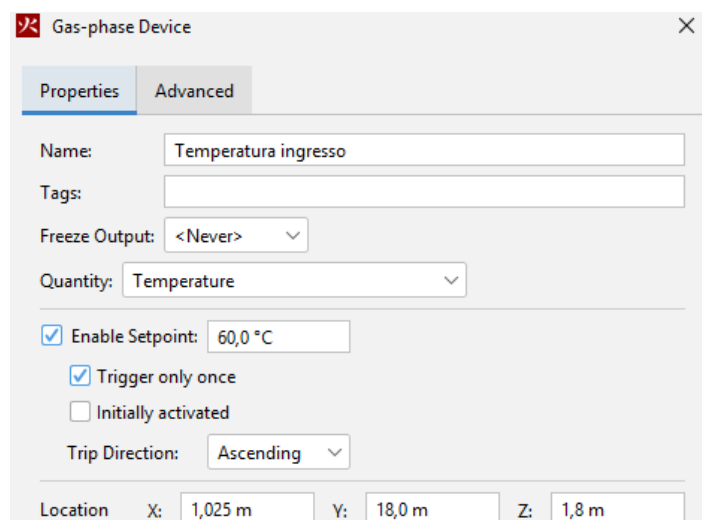


Figura 27: Configurazione sensori di temperatura

Sono presenti, inoltre, due sensori di visibilità, uno posizionato nella zona vicina all'incendio invece il secondo inserito a metà tra l'ingresso e l'uscita del parcheggio. In *Figura 28* si può notare come Pyrosim offra l'opportunità di inserire un allarme che scatti nel momento in cui si registra un superamento della soglia limite, così da renderlo visibile anche durante la simulazione.

Gas-phase Device

Properties | Advanced

Name:

Tags:

Freeze Output:

Quantity:

☒ Enable Setpoint:

☒ Trigger only once

☐ Initially activated

Trip Direction:

Location X: Y: Z:

Figura 28: Configurazione sensore di visibilità

I due sensori FED (*Fractional Effective Dose*) misurano il rapporto tra la Exposure Dose, ovvero la dose disponibile di un gas tossico per inalazione, e la dose che determina degli effetti incapacitanti sul soggetto medio esposto [42]. Se FED risulta pari all'unità il soggetto è considerato incapacitato. Sono stati posizionati nella parte centrale del modello ad una distanza di 15.5 m l'uno dall'altro.

Fractional Effective Dose (FED)

Properties | Advanced

Name:

Tags:

Freeze Output:

Quantity:

Activity Level:

☒ Enable Setpoint:

☒ Trigger only once

☐ Initially activated

Trip Direction:

Location X: Y: Z:

Figura 29: Configurazione dei sensori FED

Infine, sono stati inseriti altri tre dispositivi di controllo anche se di minore rilevanza rispetto ai precedenti, i quali invece serviranno nella fase di analisi e discussione dei risultati. I dispositivi aggiuntivi sono due sensori di CO posizionati sui pilastri ed uno Smoke Detector in posizione centrale al parcheggio.

In *Figura 30* viene mostrato il modello completo con tutti i dispositivi, rappresentati da pallini di colore giallo; invece, i pallini blu indicano gli sprinkler.

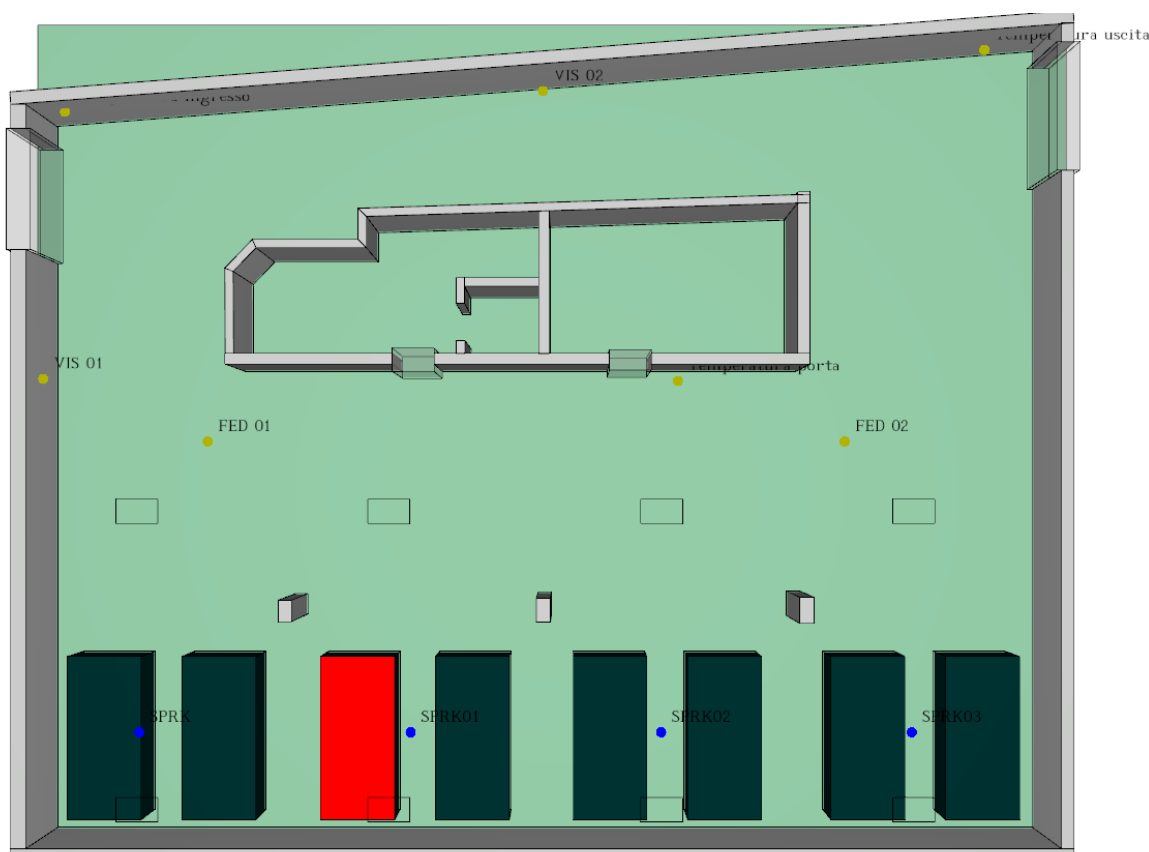


Figura 30: Modello completo dei dispositivi di controllo

3.2 Definizione delle curve HRR

Un punto importante nella modellazione dell'incendio riguarda la definizione della curva HRR (*Heat Rate Release*), che indica il modo in cui si sviluppa l'incendio. Ai fini della caratterizzazione del focolare si possono scegliere le seguenti strade [43]:

- Utilizzare dati sperimentali provenienti da prove di laboratorio
- Usare dati presenti in letteratura, purché affidabili e condivisi
- Applicare delle metodologie di stima
- Impiegare dei focolari predefiniti con le limitazioni fornite dal Codice Prevenzione Incendi

Spesso nelle simulazioni vengono usate delle curve di incendio ideali, ovvero curve t^2 in cui l'HRR nella fase di innesco dell'incendio ha un andamento parabolico per poi proseguire con una fase costante fino al decadimento. L'istante in cui comincia la fase stazionaria dipende molto dalla velocità di propagazione dell'incendio.

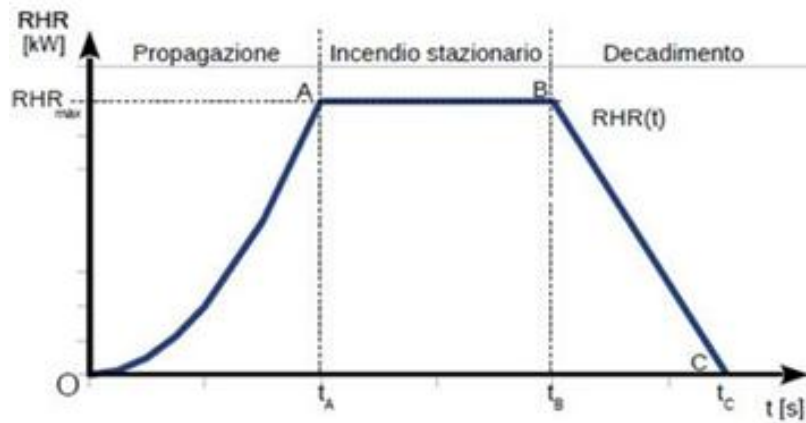


Figura 31: Schematizzazione della curva HRR [43]

$$HRR(t) = 1000 \left(\frac{t}{t_a} \right)^2 \text{ per } t < t_a$$

In cui:

- t : tempo [s]
- t_a : tempo necessario affinché HRR raggiunga i 1000 kW [s]

Come si nota dall'equazione sopra citata a parità di tempo t , minore è il tempo t_a , più rapido è l'incendio a propagarsi.

Nel caso in esame però si è scelto di utilizzare i dati provenienti da prove sperimentali perché risultano più realistiche rispetto al focolare predefinito, che in alcuni casi tende ad essere troppo conservativo.

Auto a combustione interna (ICE)

Per il veicolo tradizionale i dati sono stati ricavati da uno studio dell'INERIS [44] (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) in cui il test è stato eseguito su un veicolo Diesel di medie dimensioni con una massa pari a 1404 kg. Il picco di HRR raggiunto è pari a 6.1 MW [44] con l'andamento riportato in Figura 32.

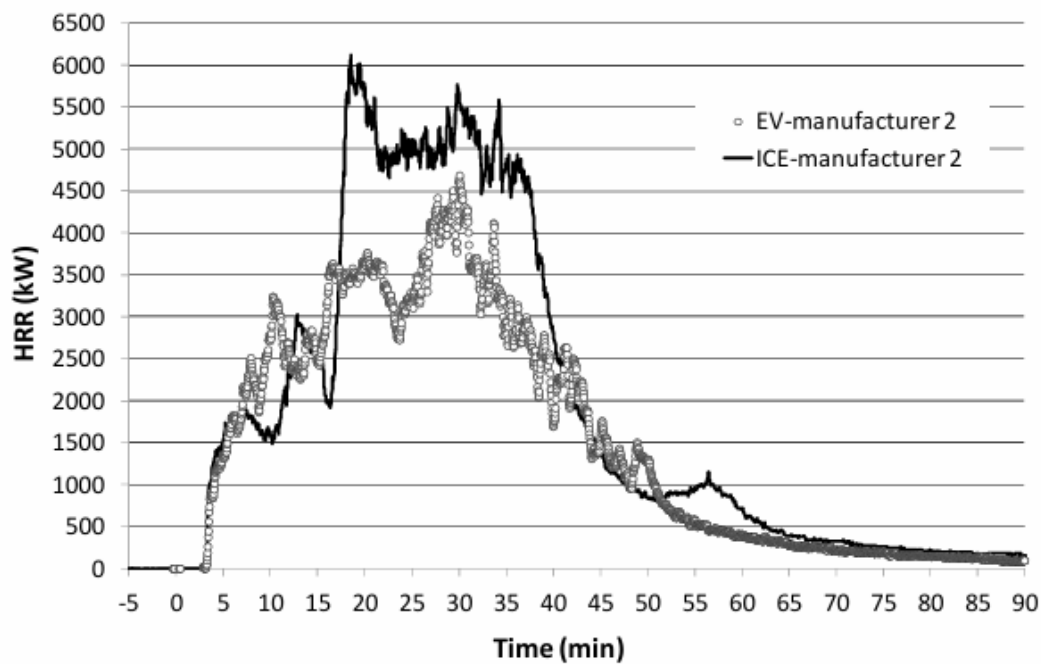


Figura 32: Curva HRR veicolo ICE INERIS

Si è scelto di eseguire delle simulazioni di 20 minuti, tempo sufficiente per raggiungere il picco di HRR e per studiare le conseguenze all'interno del parcheggio, in quanto la fase più critica risulta essere quella iniziale in cui sono presenti gli occupanti. La curva è stata pertanto ricostruita su un foglio Excel fino al tempo stabilito.

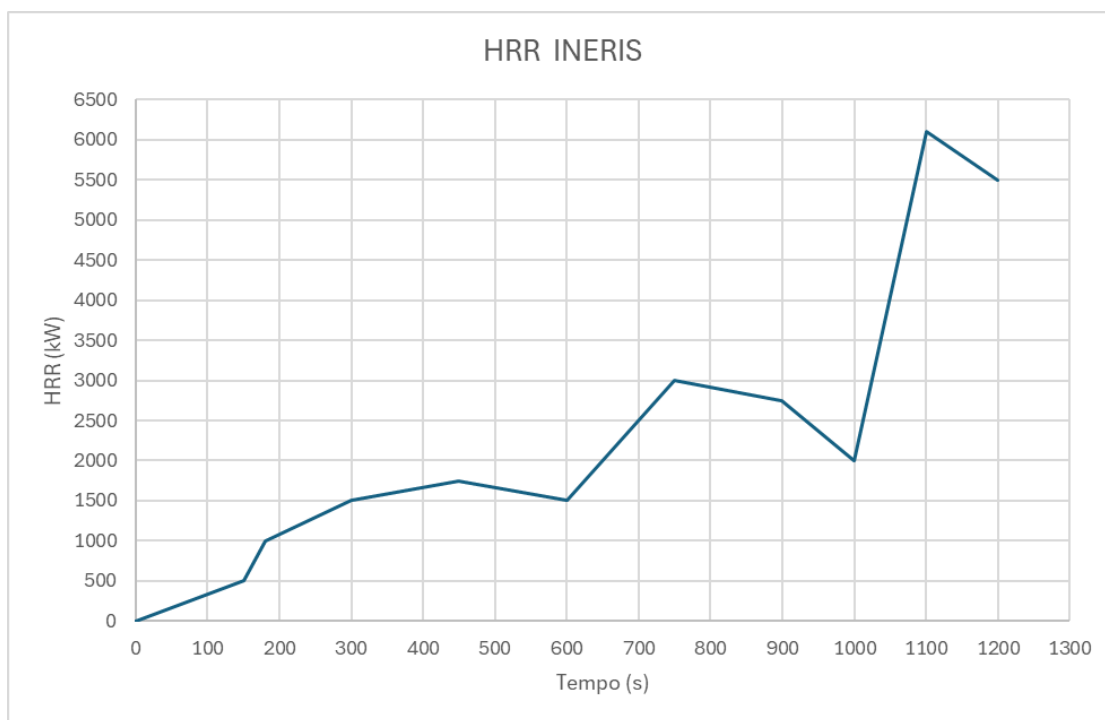


Figura 33: Curva HRR del veicolo a combustione interna

Auto ad idrogeno (FCEV)

Per l'auto alimentata ad idrogeno con tecnologia Fuel Cell sono presenti pochi dati riguardanti la potenza di incendio, ma uno studio condotto nel 2022 dall'Università della Corea del Sud [45] ha riportato dei risultati coerenti con i valori massimi citati in letteratura. Il veicolo è di medie dimensioni con un peso maggiore rispetto al veicolo tradizionale, raggiungendo infatti i 1820 kg [45]. La curva citata è di colore "Verde" nella *Figura 34*.

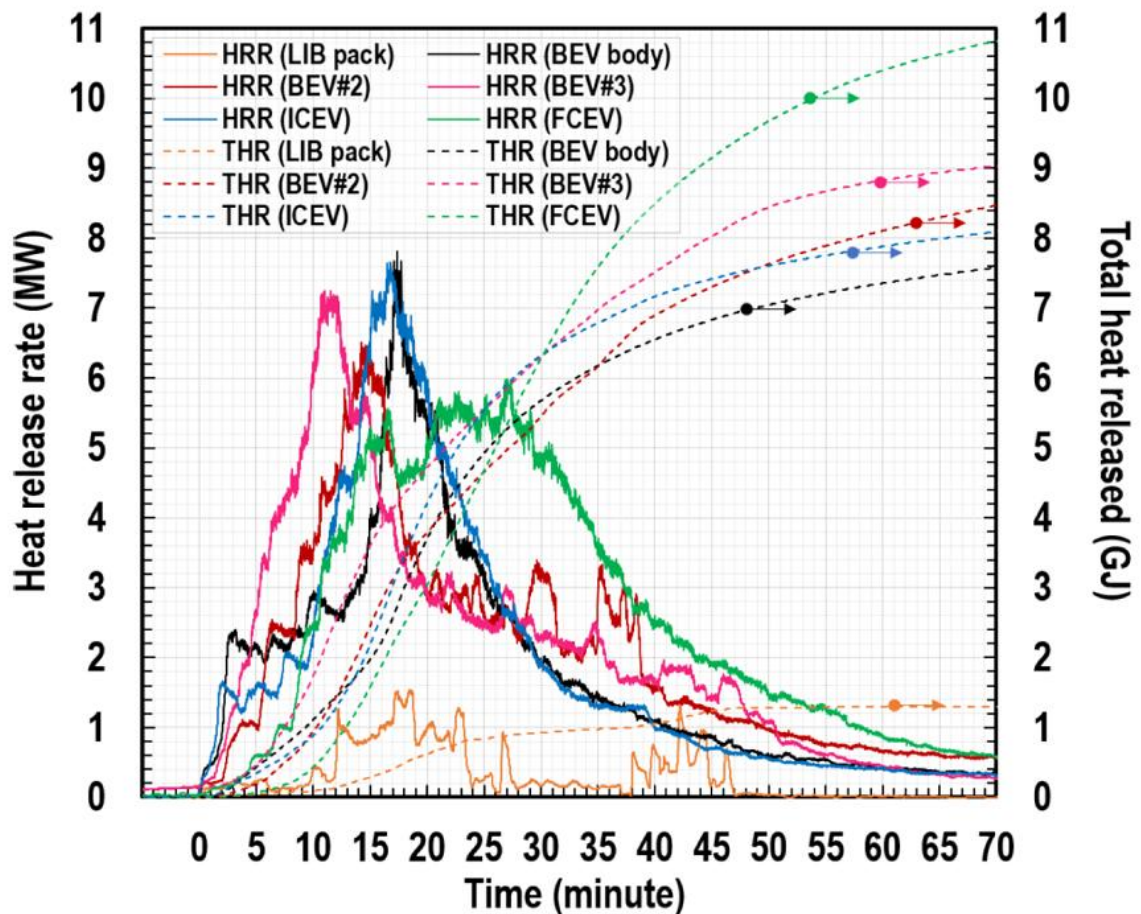


Figura 34: Curva HRR del veicolo FCEV [46]

Purtroppo per motivi di sicurezza durante lo svolgimento dei test i tre serbatoi di idrogeno sono stati svuotati [45], motivo per cui l'HRR riportato non tiene conto della presenza del Jet Fire, ovvero il getto che si crea a seguito di un rilascio di idrogeno dalla valvola TPRD. Quest'ultima però non essendo stata eliminata dà indicazione del raggiungimento dei 110 °C necessari alla sua apertura, motivo per il quale la curva può essere modificata tenendo conto anche del rilascio graduale di idrogeno dal serbatoio. Per calcolare il tempo necessario allo svuotamento (*blowdown*) del serbatoio e la portata rilasciata, è indispensabile conoscere la pressione all'interno del tank, la sua capacità, la temperatura, e il diametro dell'ugello. Questi dati possono essere implementati all'interno di *e-*

Laboratory, un calcolatore che permette di studiare il comportamento dell'idrogeno in diversi ambienti, ottenendo come output il tempo necessario allo svuotamento e la portata variabile. I dati sul volume e il diametro dell'orifizio sono da considerarsi come valori medi dei veicoli attualmente in commercio.

Input	Valore	
Pressione iniziale	700	bar
Temperatura serbatoio	293	K
Volume serbatoio	150	l
Massa nel serbatoio	6	kg
Diametro orifizio	2,5	mm
Output	Valore	
Tempo di svuotamento	300	s

Tabella 5: Parametri per il calcolo del blowdown

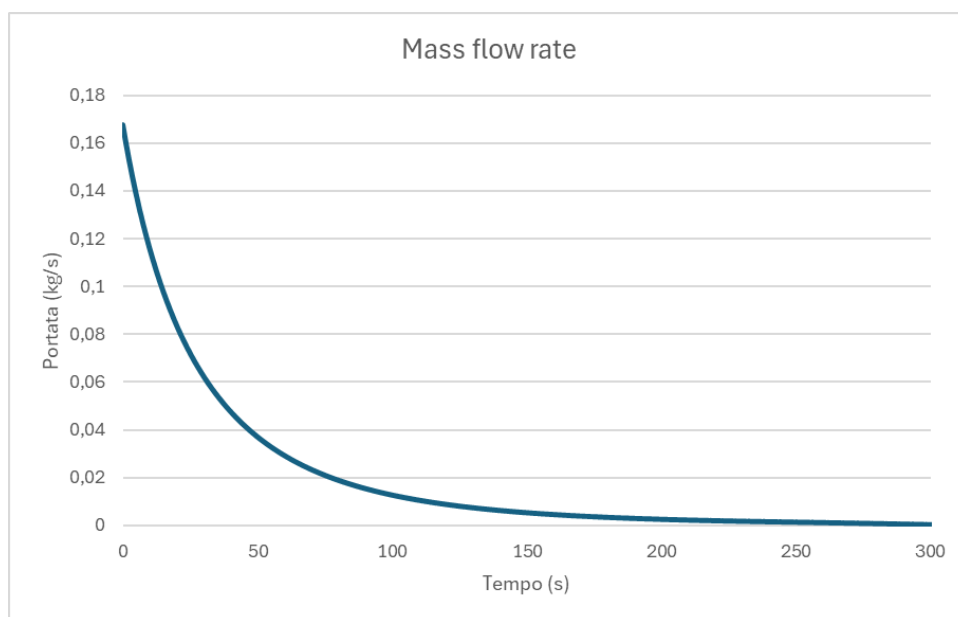


Figura 35: Variazione della portata di idrogeno durante il blowdown

Conoscendo sia la variazione di portata nel tempo sia il potere calorifico inferiore dell'idrogeno, pari a 120 MJ/kg è possibile ricavare l'HRR dovuta al Jet Fire sfruttando la relazione:

$$HRR(t) = \dot{m} \cdot LHV$$

Successivamente la potenza termica ottenuta è stata mediata su tre intervalli di tempo pari a 100 secondi ciascuno, in modo da avere dei valori discreti con cui modificare la curva in *Figura 34* dal momento di apertura della valvola TPRD, istante che viene fornito all'interno del report di laboratorio.

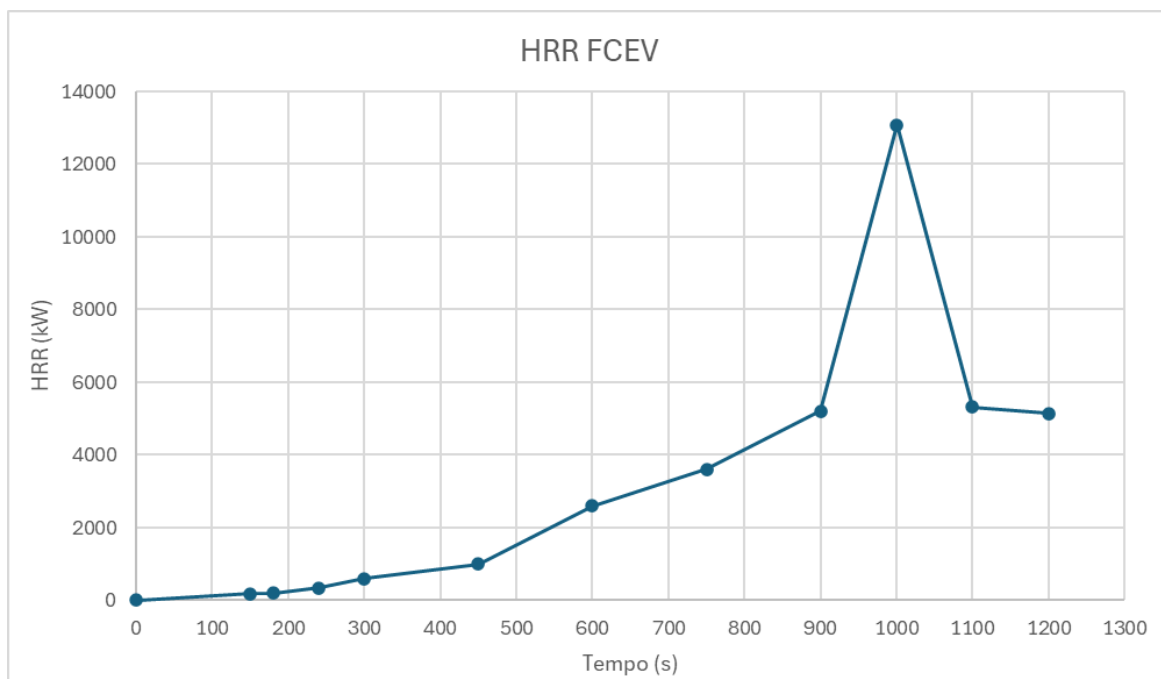


Figura 36: Curva HRR modificata con il Jet Fire del veicolo FCEV

3.2.1 Effetto dei sistemi antincendio

Negli scenari 2 e 3 in cui viene attivato l'impianto antincendio di tipo sprinkler si può presumere che la potenza termica non raggiunga i valori stabiliti nel *Paragrafo 3.2*. Il Codice Prevenzione Incendi fino al 2015 stabiliva che la curva HRR in caso di sistemi di controllo di tipo automatico potesse essere considerata costante dal tempo di attivazione delle testine fino al termine della simulazione, come rappresentato in *Figura 37*.

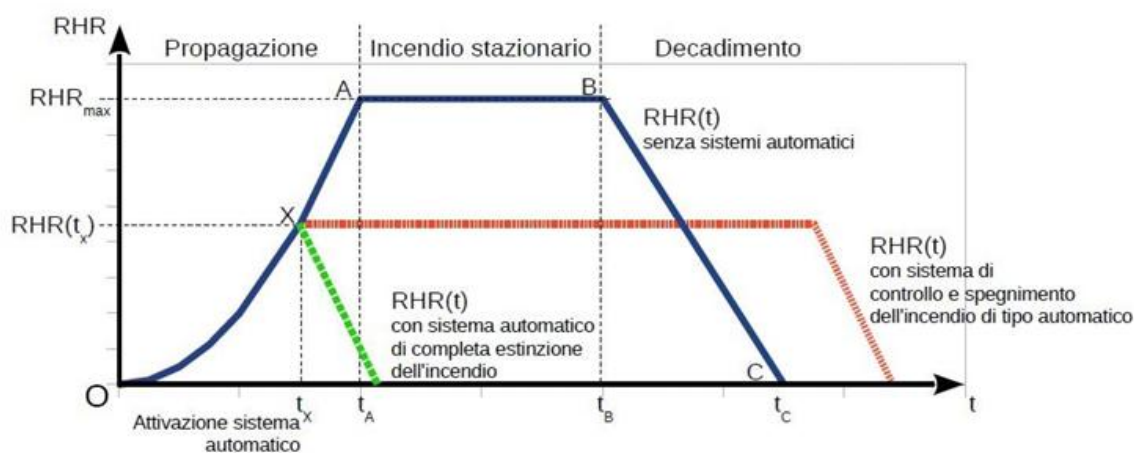


Figura 37: Andamento della curva HRR in presenza di sistemi antincendio automatici [43]

Dal 2020, anno in cui è stato pubblicato un aggiornamento del Codice, quanto detto in precedenza non vale più per le autorimesse poiché è stato appurato che la carrozzeria dei veicoli ha una funzione

di schermo nei confronti dell'acqua erogata dall'impianto, di conseguenza la sua capacità di abbattere la potenza termica si riduce. Per questo motivo la norma suggerisce una riduzione di HRR del 50% dall'istante in cui si attiva l'impianto, offrendo una casistica meno conservativa rispetto alla precedente. Di seguito vengono riportate le curve corrette.

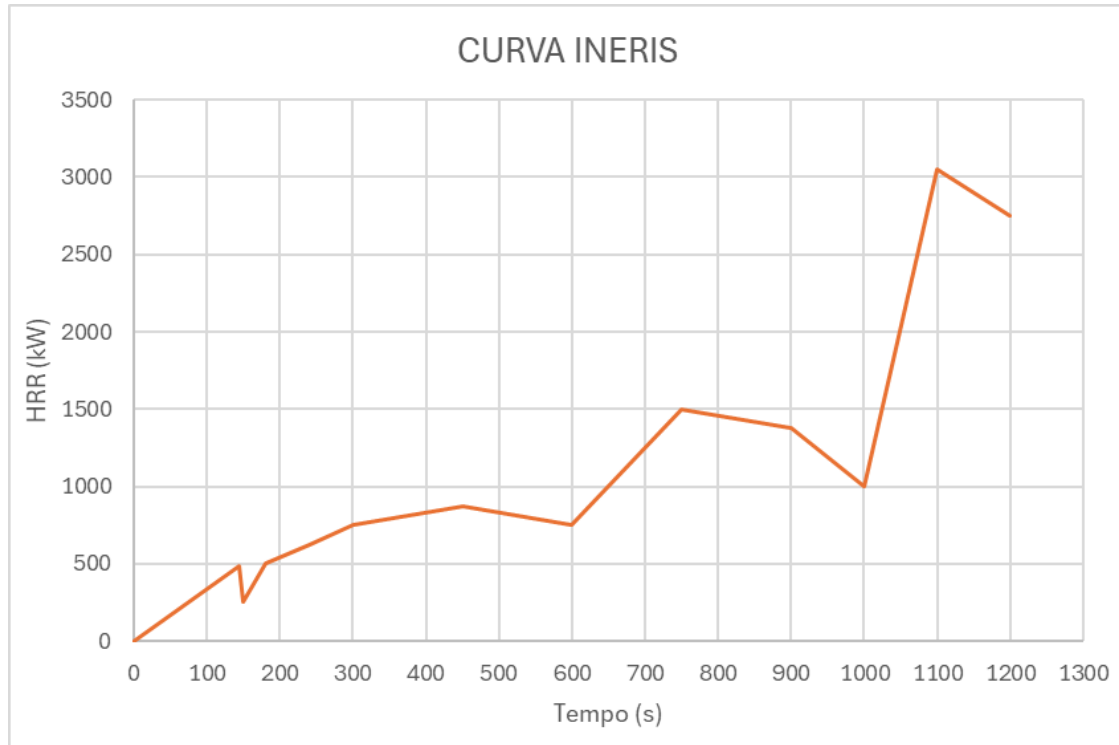


Figura 38: Curva HRR del veicolo ICE in presenza dell'impianto antincendio

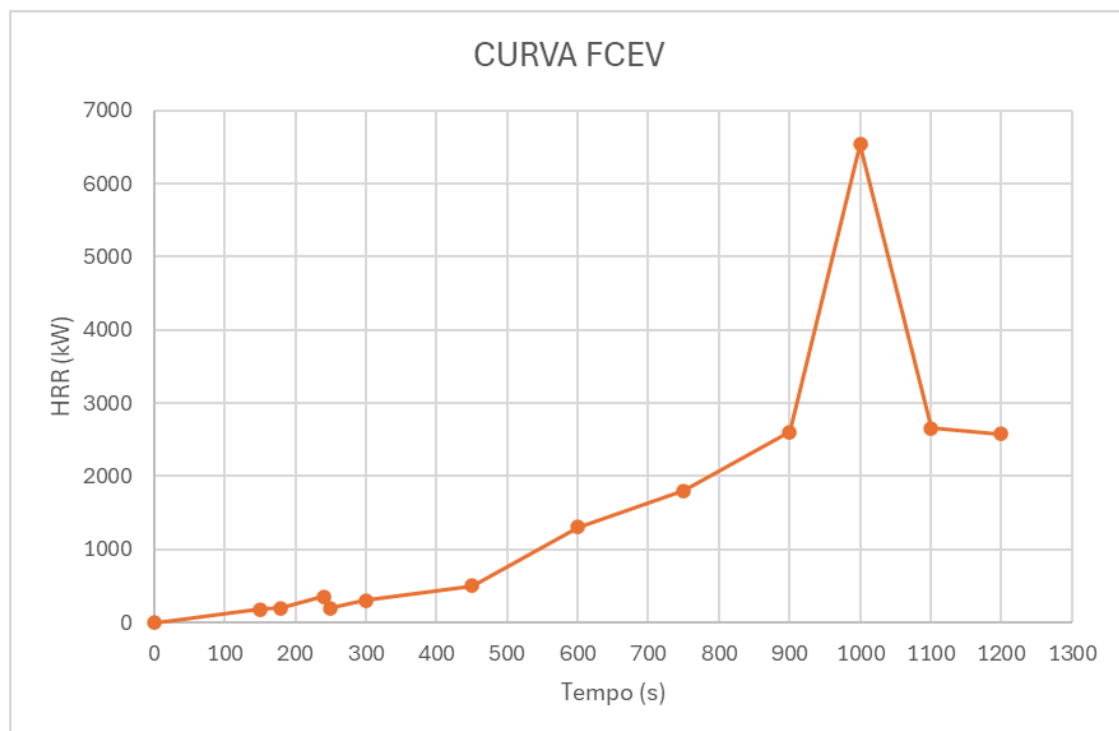


Figura 39: Curva HRR del veicolo FCEV in presenza dell'impianto antincendio

3.3 Implementazione delle curve HRR in Pyrosim

In Pyrosim per definire le caratteristiche del focolare è necessario modellare una superficie in cui vengono riportati i parametri di input quali HRRPUA, che indica il valore massimo di HRR, il tipo di superficie (“Burner”) e il Ramp-up Time ovvero l’evoluzione della curva di incendio, come riportato in *Figura 40*.

The 'Edit Surfaces' dialog box shows the configuration for a 'Fire' surface. The 'Surface ID' is 'Fire'. The 'Surface Type' is 'Burner'. The 'Heat Release' tab is selected, showing the following parameters:

- Heat Release Rate Per Area (HRRPUA): 847,22 kW/m²
- Mass Loss Rate: 0,0 kg/(m²·s)
- Ramp-Up Time: Custom
- Extinguishing Coefficient: 0,0 m²/(kg·s)

Figura 40: Configurazione del focolare

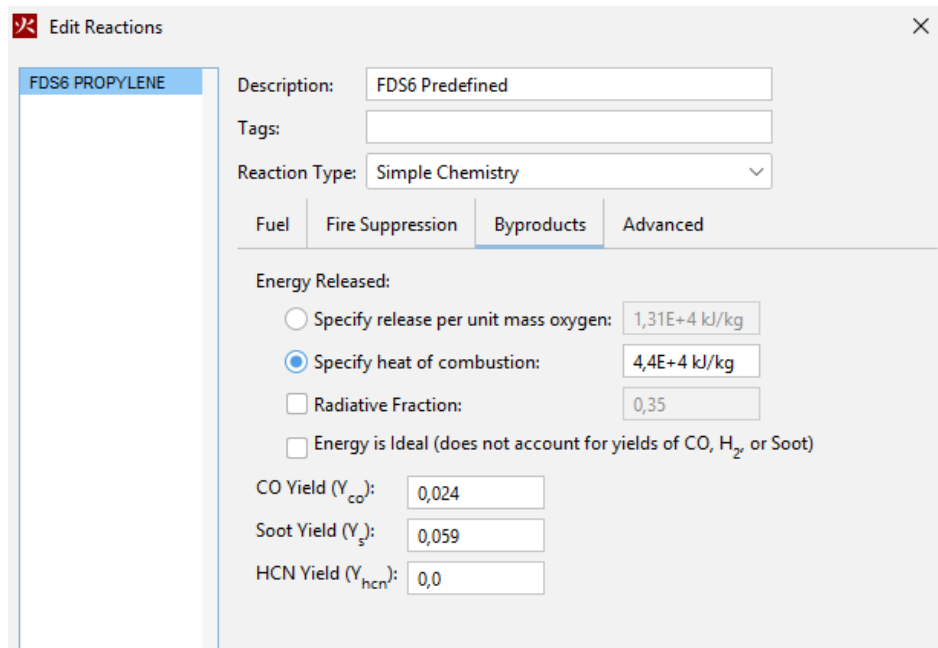
Nel caso analizzato, il Ramp-Up Time è di tipo “custom” perché l’andamento della curva HRR è stata impostata manualmente sulla base dei dati ricavati nei paragrafi precedenti, per la quale è necessario inserire in una tabella il tempo e la frazione di HRR corrispondente, calcolata sulla base del picco massimo.

The 'Ramping Function Values' dialog box shows the following data for the Ramp-Up Time:

	Time (s)	Fraction
1	0,0	0,0
2	150,0	0,082
3	180,0	0,164
4	240,0	0,205
5	300,0	0,246
6	450,0	0,287
7	600,0	0,246
8	750,0	0,492
9	900,0	0,451
10	1000,0	0,328
11	1100,0	1,0

Figura 41: Valori per la definizione del Ramp-Up Time

Essendo stata definita una superficie di tipo “Burner” il software richiede una reazione in grado di innescare l’incendio, la quale è caratterizzata da una specie combustibile, ovvero il materiale che partecipa all’incendio. Purtroppo, Pyrosim non permette di impostare più di una reazione all’interno del modello, di conseguenza si è scelto come specie combustibile il Propilene che rappresenta uno dei materiali più diffusi all’interno delle autovetture moderne, nonché caratterizzato da una modesta fumosità; infatti, nella definizione della reazione è importante anche specificare i sottoprodotti che genera la combustione (By-products), come i valori di CO e di fumosità [47].



The screenshot shows the 'Edit Reactions' window with the 'FDS6 PROPYLENE' reaction selected. The 'Byproducts' tab is active, showing the following settings:

- Description:** FDS6 Predefined
- Tags:** (empty)
- Reaction Type:** Simple Chemistry
- Energy Released:**
 - ☐ Specify release per unit mass oxygen: 1,31E+4 kJ/kg
 - ☒ Specify heat of combustion: 4,4E+4 kJ/kg
 - ☐ Radiative Fraction: 0,35
 - ☐ Energy is Ideal (does not account for yields of CO, H₂, or Soot)
- CO Yield (Y_{co}):** 0,024
- Soot Yield (Y_s):** 0,059
- HCN Yield (Y_{hcn}):** 0,0

Figura 42: Caratteristiche del propilene

4. Discussione dei risultati

In questa sezione verranno presentati i risultati ottenuti durante le simulazioni dei diversi scenari. Si presenteranno per primi i risultati relativi al veicolo ad idrogeno (FCEV) in quanto oggetto della tesi, successivamente verranno mostrati anche quelli del veicolo tradizionale (ICE). Infine, si confronteranno gli esiti dei due studi affrontati. Si ricorda che gli scenari analizzati per ogni veicolo sono tre.

4.1 Veicolo FCEV

4.1.1 Scenario 1

In questo scenario l'incendio è libero di evolvere senza l'intervento di nessun dispositivo di mitigazione e/o estinzione, per cui i valori che si otterranno sono i più alti tra tutti gli scenari analizzati. La curva HRR restituita dal software è coerente con quella implementata nel *Capitolo 3* come si nota dalla *Figura 43*.

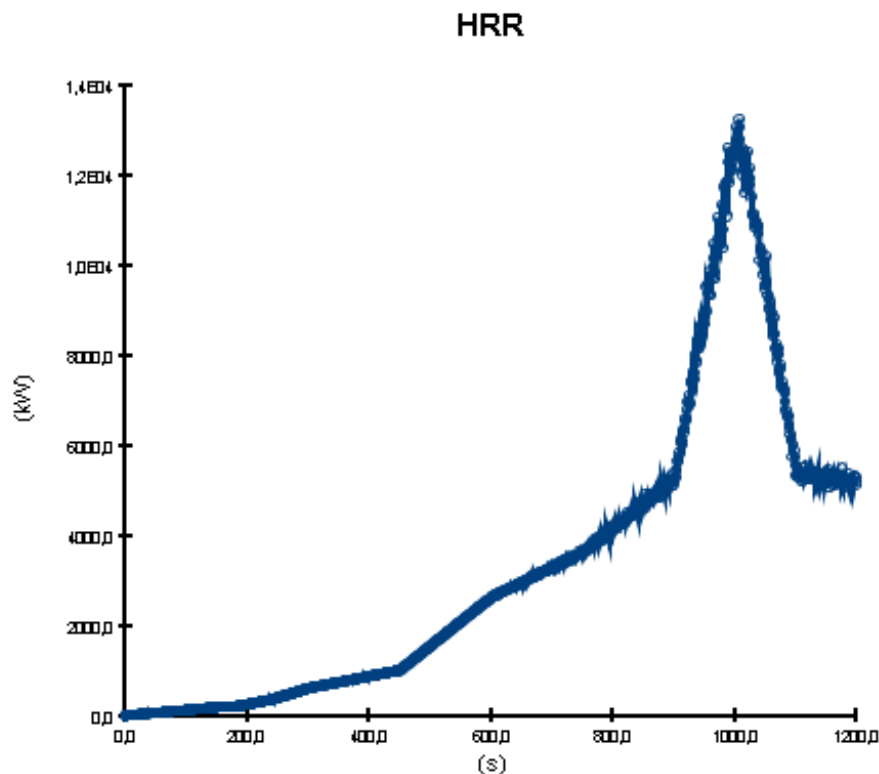


Figura 43: Curva HRR- Scenario 1 FCEV

VISIBILITÀ

Nelle immagini seguenti viene mostrata la produzione di fumi all'interno del parcheggio in quattro istanti di tempo differenti. Il locale tecnico e il vano scale non vengono raggiunti dai fumi in quanto al tempo zero le porte di tipo REI si chiudono per garantire la sicurezza, soprattutto nel vano scale in cui è indispensabile creare un luogo di uscita sicuro.

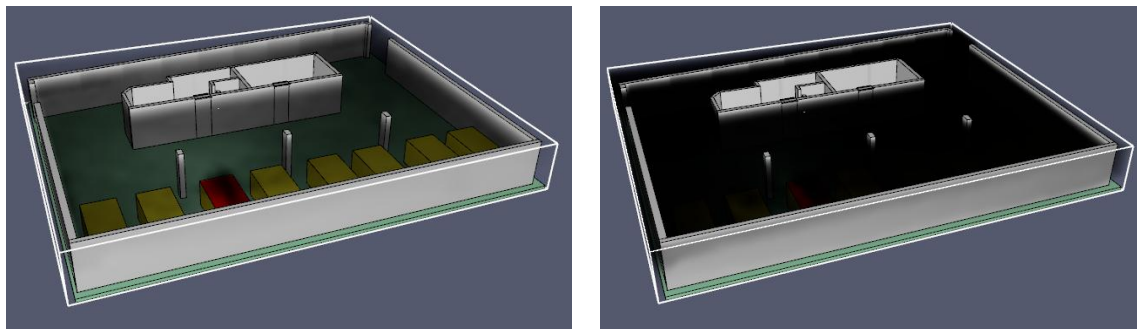


Figura 44: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) – Scenario 1 FCEV

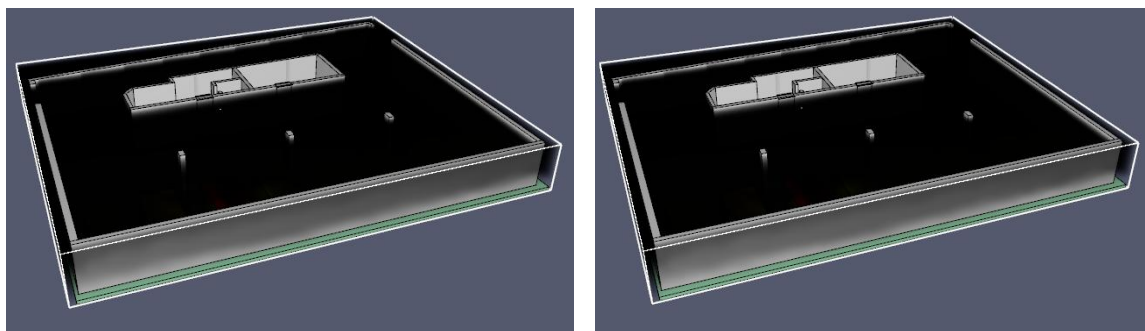


Figura 45: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 1 FCEV

Nel grafico presente in *Figura 46* si riporta la variazione di visibilità registrata dai due sensori presenti nel modello in relazione al limite massimo consentito dal Codice.

Si può notare come i due dispositivi essendo vicini al focolare, soprattutto il VIS 01, raggiungano molto in fretta la soglia limite, in particolare il VIS 01 registra per la prima volta una visibilità inferiore ai 10 m a 176 secondi dall'innesco. È possibile che proprio a causa della vicinanza al focolare, il VIS 01 registri un segnale più discontinuo rispetto al VIS 02 che invece è posizionato a metà tra le sezioni di ingresso ed uscita dei veicoli.

Anche il rilevatore di fumo che si ricorda essere installato a soffitto nel centro del parcheggio, il quale misura la percentuale di fumo in un metro di distanza, raggiunge un valore pari al 100 %/m in un arco di tempo pari a 600s, oltre al quale rimane costante. Infatti, come si vede anche dalla *Figura 44* e *Figura 45* oltre quell'istante di tempo la fumosità rimane pressoché uguale, rendendo difficile distinguere gli oggetti presenti nel parcheggio.

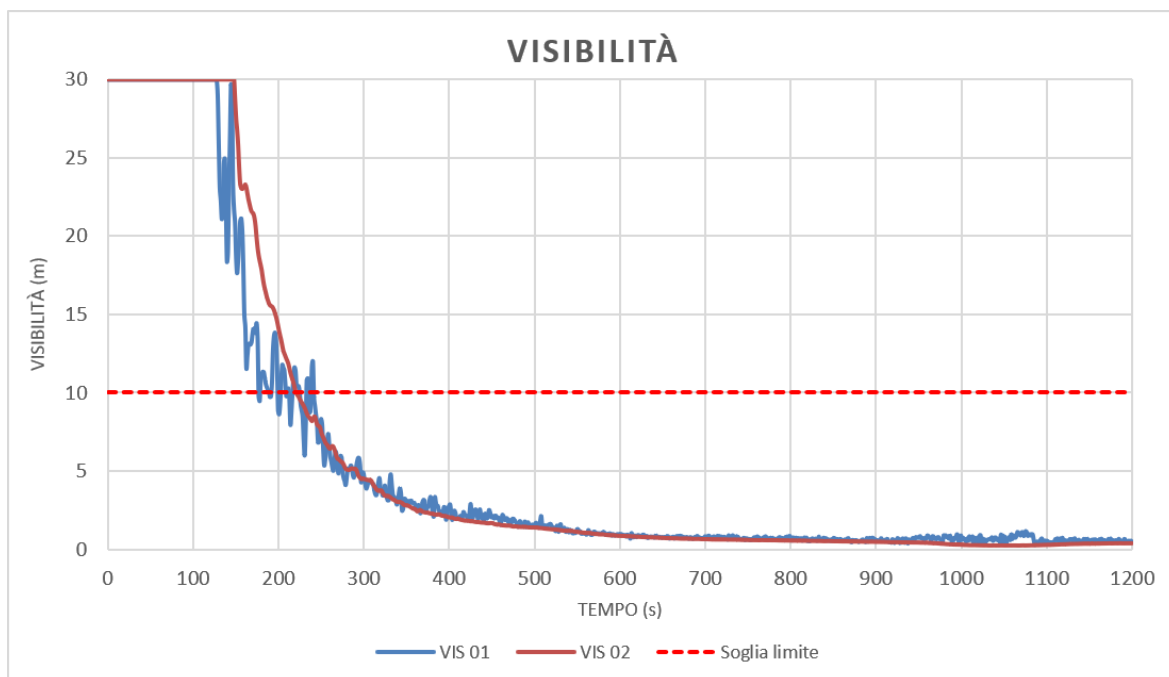


Figura 46: Modello di visibilità - Scenario 1 FCEV

TEMPERATURA

Nel grafico di Figura 47 sono riportate le temperature registrate dalle termocoppie posizionate nei punti di interesse definiti nel Capitolo3.

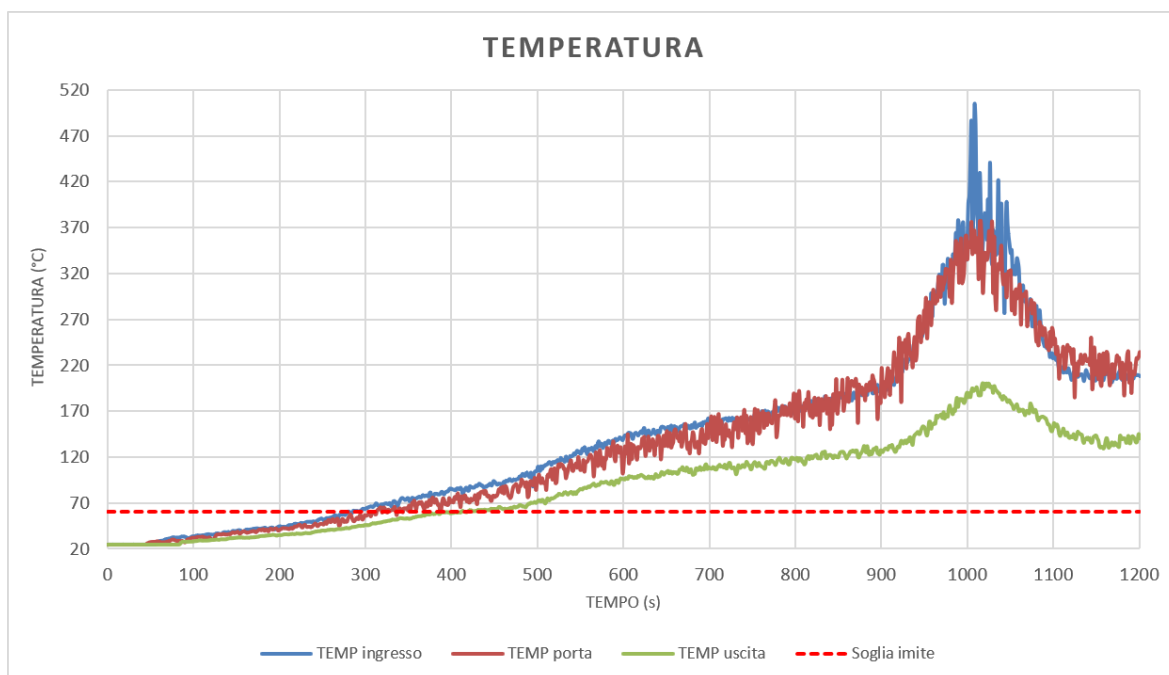


Figura 47: Modello del calore- Scenario 1 FCEV

La temperatura di fiamma essendo misurata in prossimità del focolare raggiunge valori massimi prossimi agli 820 °C, invece per quanto riguarda la temperatura all'ingresso e alla porta di uscita dal parcheggio si nota come le due curve siano praticamente sovrapposte fino al tempo di 1000 s in cui il sensore all'ingresso registra un picco più alto prossimo ai 500 °C. I valori misurati all'uscita sono nettamente più bassi durante tutta la simulazione, con un valore massimo pari a 200 °C registrato a 1000 s. Si ricorda che la soglia limite consentita per gli occupanti è 60 °C, temperatura che tutti i dispositivi, tranne quello relativo alla temperatura di fiamma, raggiungono nell'arco tra i 5-7 minuti. La massima temperatura raggiunta dal gas, come mostrato in *Figura 48* e *Figura 49*, è pari a 1000 °C.

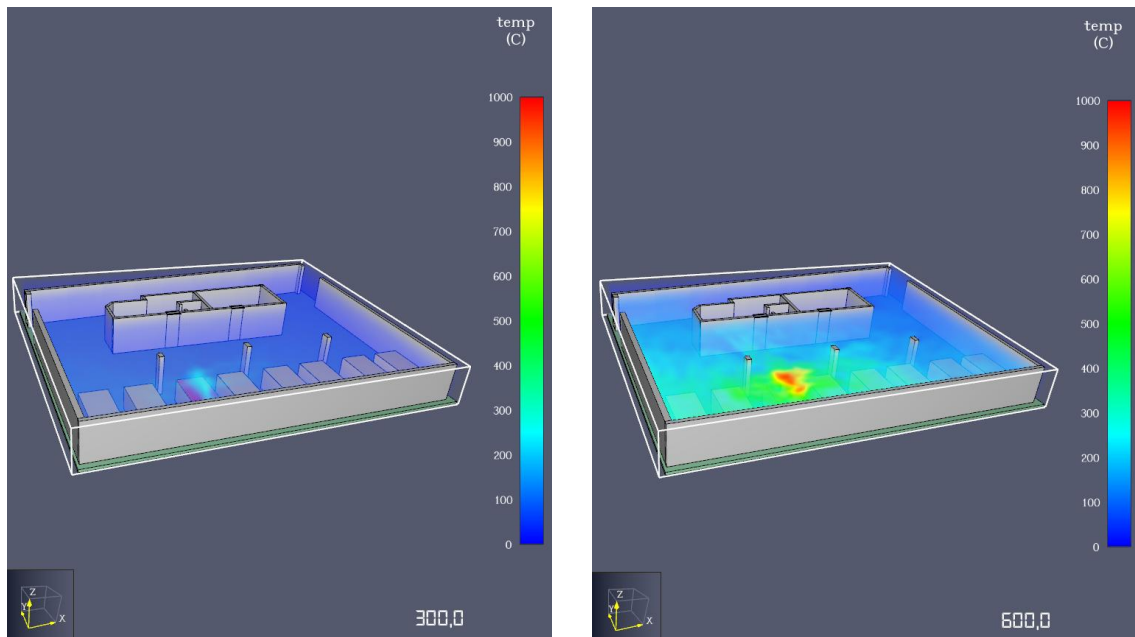


Figura 48: Andamento della temperatura a 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 1 FCEV

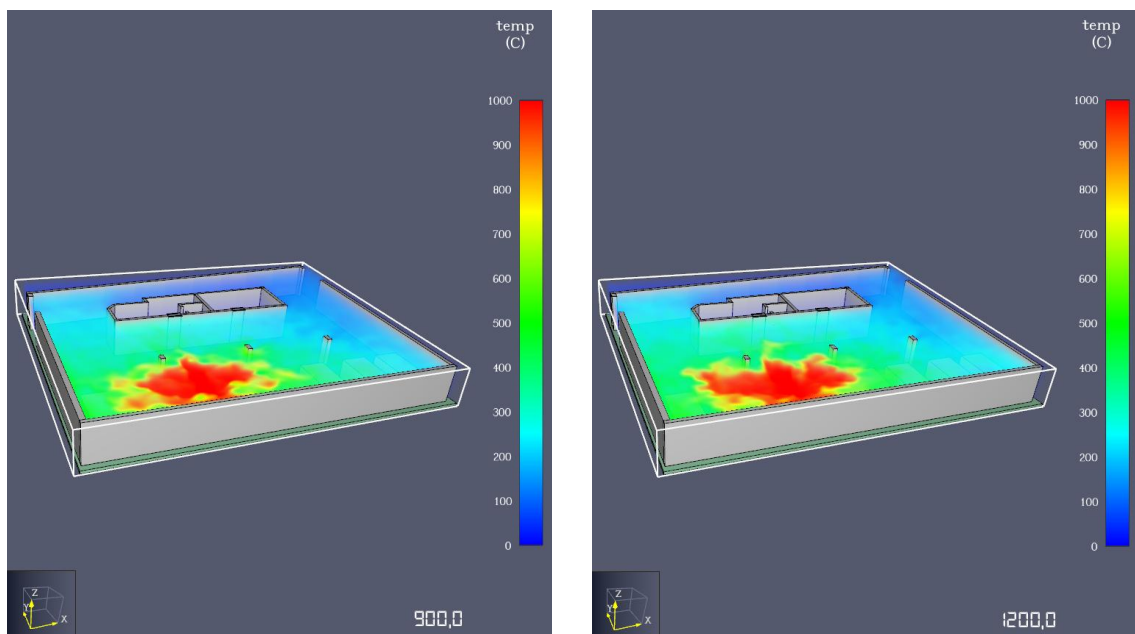


Figura 49: Andamento della temperatura a 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 1 FCEV

GAS TOSSICI

L'ultima grandezza considerata è la presenza di gas tossici, la principale causa di insufficienza respiratoria nelle casistiche di incendio in un ambiente chiuso. Sono presenti due sensori posizionati nel corridoio centrale del parcheggio in prossimità delle porte di servizio. Il primo dispositivo a raggiungere la soglia limite è il FED 02 ad 850 s poi il secondo a 1093 s, tempi in cui il parcheggio dovrebbe già essere privo di occupanti.

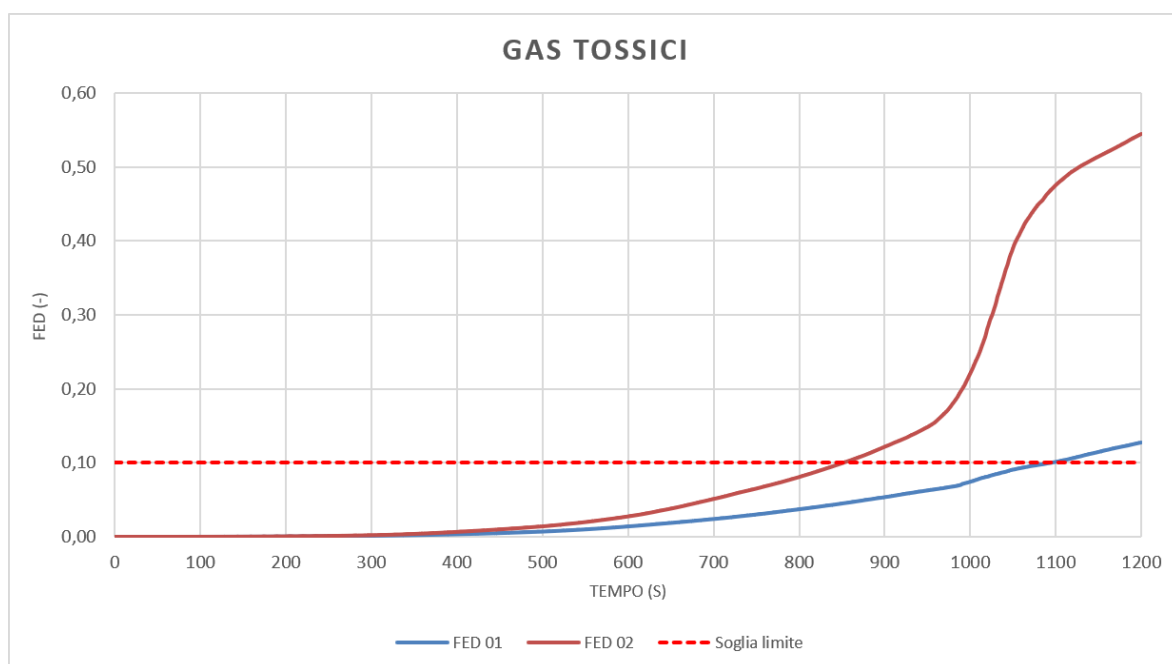


Figura 50: Modello dei gas tossici - Scenario 1 FCEV

4.1.2 Scenario 2

Il secondo scenario prevede l'installazione di un impianto antincendio della tipologia sprinkler, il quale servirà a contenere l'incendio ed abbattere l'incremento di temperatura. Il software FDS restituisce una curva HRR che rispetto allo *Scenario 1* risulta dimezzata dall'istante di attivazione delle testine erogatrici. Il loro intervento influirà molto sulle temperature in quanto vi è un effetto combinato tra riduzione della potenza di incendio e presenza del getto d'acqua. Un contro dell'impianto antincendio però può essere il peggioramento della visibilità, soprattutto a bassa quota, perché normalmente il fumo avendo una densità minore dell'aria tende a stratificare verso l'alto lasciando uno strato di aria fresca nella parte inferiore del volume; invece, con l'erogazione di particelle d'acqua che si trasformano in vapore a causa dell'alta temperatura, il fumo si miscela con il vapore acqueo e viene trasportato verso il basso. Purtroppo, non è possibile osservare il fenomeno dai dati poiché non sono stati posizionati dei sensori di visibilità ad altezze ridotte, ma solo dove fossero prescritti dalla norma. Si cercherà però di farlo notare attraverso le immagini restituite dalla simulazione.

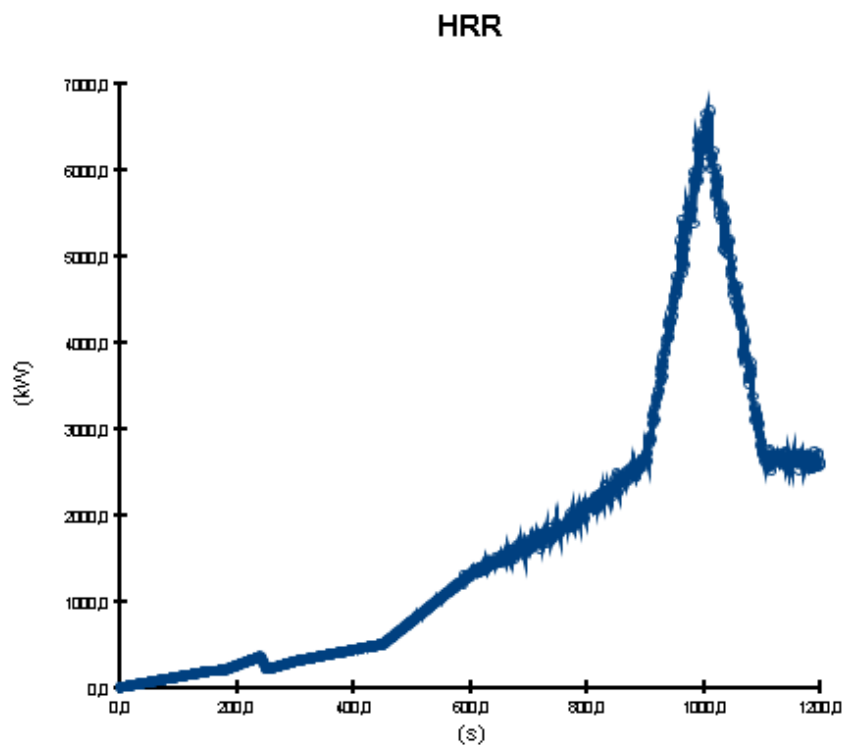


Figura 51: Curva HRR - Scenario 2 FCEV

VISIBILITÀ

Nelle immagini seguenti viene mostrata la produzione di fumi all'interno del parcheggio, con un'angolazione diversa rispetto a quella mostrata nello *Scenario 1*, in modo da far notare l'influenza degli sprinkler sulla visibilità.

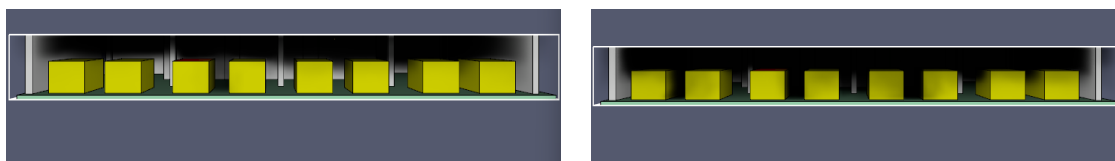


Figura 52: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) – Scenario 2 FCEV

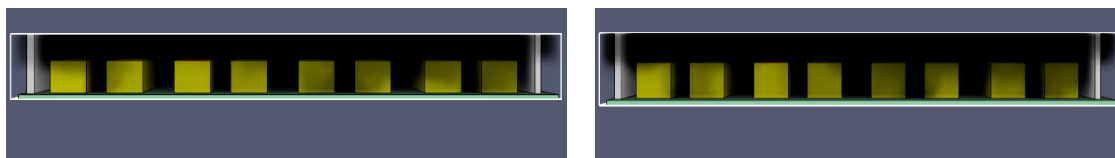


Figura 53: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 2 FCEV

Come si può evincere dalla *Figura 52* al tempo di 600 secondi la fumosità nella zona degli ultimi due veicoli è limitata alla superficie superiore delle auto perché non si è ancora attivato l'impianto sprinkler; invece, guardando attentamente la zona circoscritta alle altre tre coppie di veicoli si nota come il fumo abbia già raggiunto il pavimento proprio a causa dell'erogazione dell'acqua.

Nei grafici di seguito si mostreranno i risultati forniti dai sensori di visibilità posizionati esattamente come nello *Scenario 1*. Si può notare come l'andamento complessivo sia molto simile, se non uguale, a quello già mostrato nel caso senza gli sprinkler.

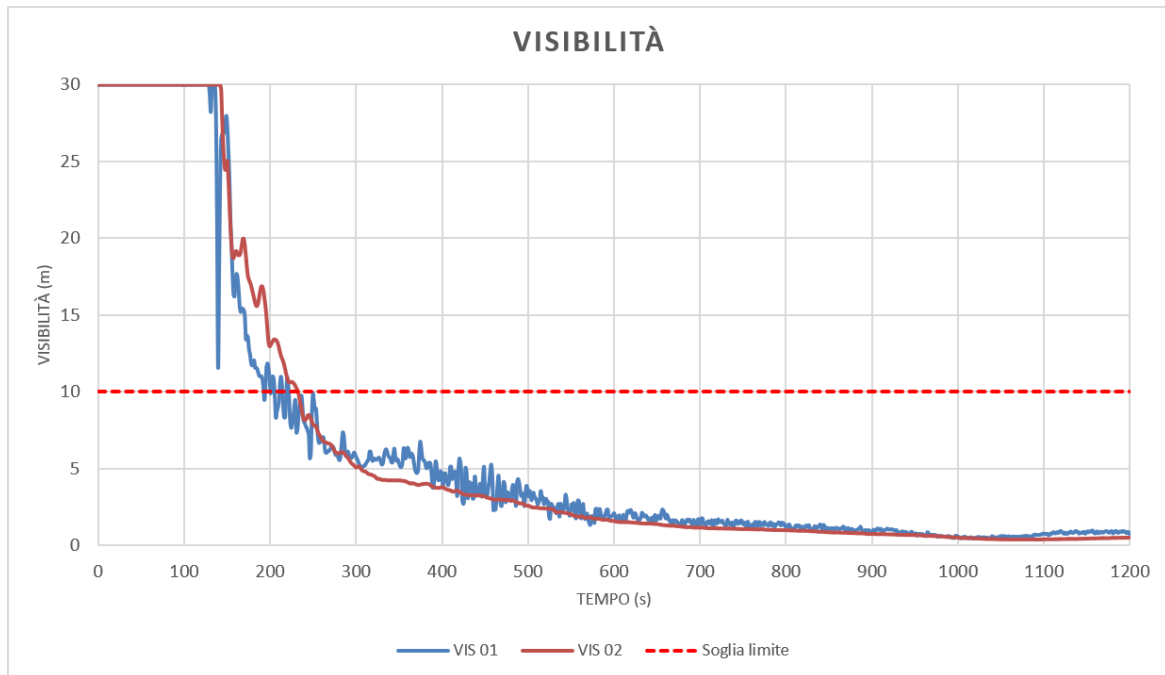


Figura 54: Modello di visibilità - Scenario 2 FCEV

TEMPERATURA

In *Figura 55* vengono mostrati i dati registrati dai sensori di temperatura posizionati nel parcheggio.

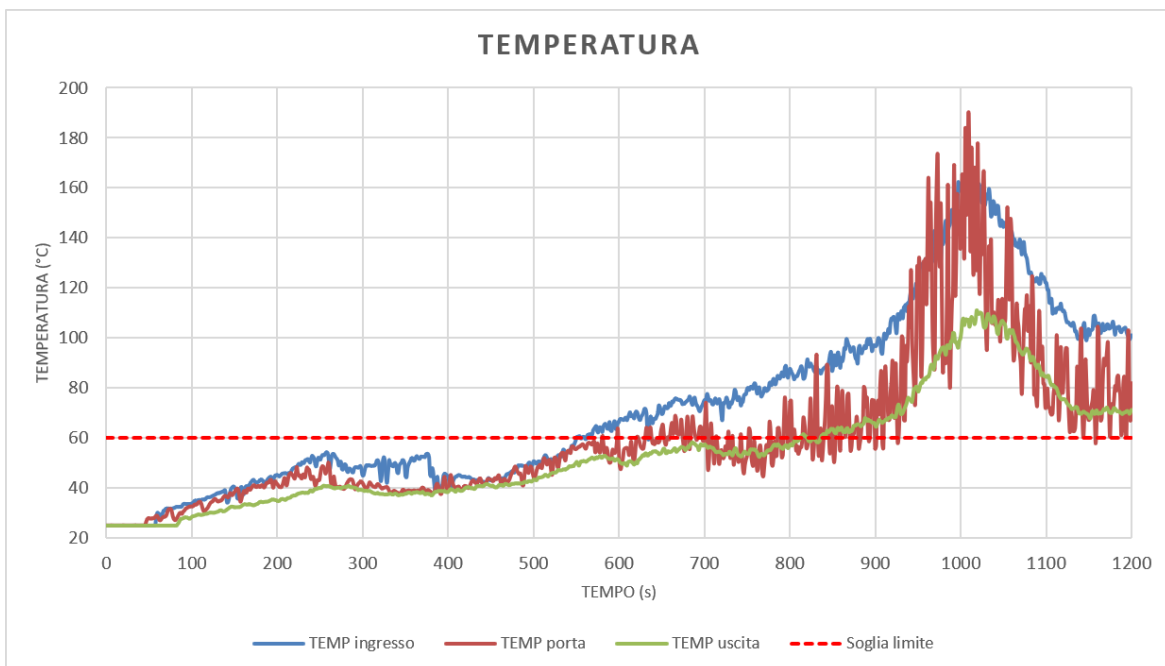


Figura 55: Modello del calore - Scenario 2 FCEV

A differenza dello *Scenario 1* si nota come le temperature relative all'ingresso, alla porta e all'uscita siano nettamente più basse, con un picco che raggiunge i 190 °C a 1010 s rispetto ai 500 °C del caso precedente. I valori più bassi si registrano sempre al portale di uscita con una temperatura massima pari a 106 °C. Proprio a causa della riduzione delle temperature, la soglia limite viene superata per la prima volta dalla termocoppia posizionata all'ingresso a circa 555 s dall'inizio dell'incendio. La massima temperatura raggiunta dal gas è di 375 °C, una diminuzione notevole rispetto a prima.

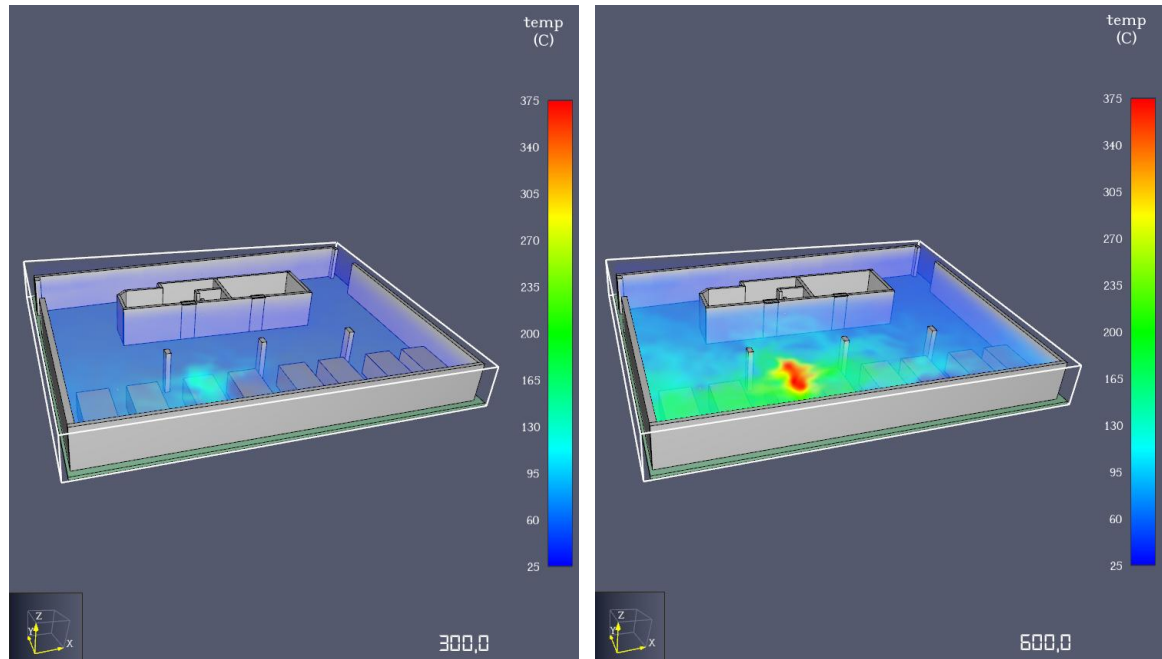


Figura 56: Andamento della temperatura a 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 2 FCEV

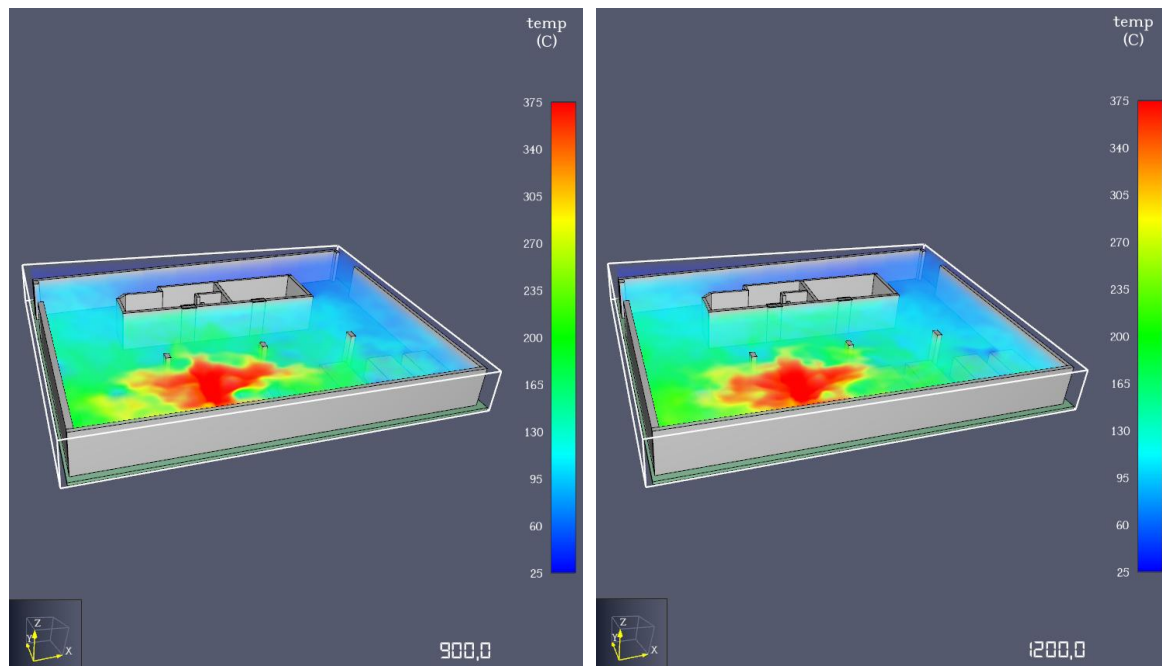


Figura 57: Andamento della temperatura a 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 2 FCEV

ATTIVAZIONE DEGLI SPRINKLER

Gli sprinkler si attivano in modo abbastanza uniforme nel corso della simulazione. Il primo ad attivarsi è lo SPRK 01, posizionato nello scomparto in cui è presente il focolare; successivamente scattano gli altri tre, ordinatamente da sinistra a destra.

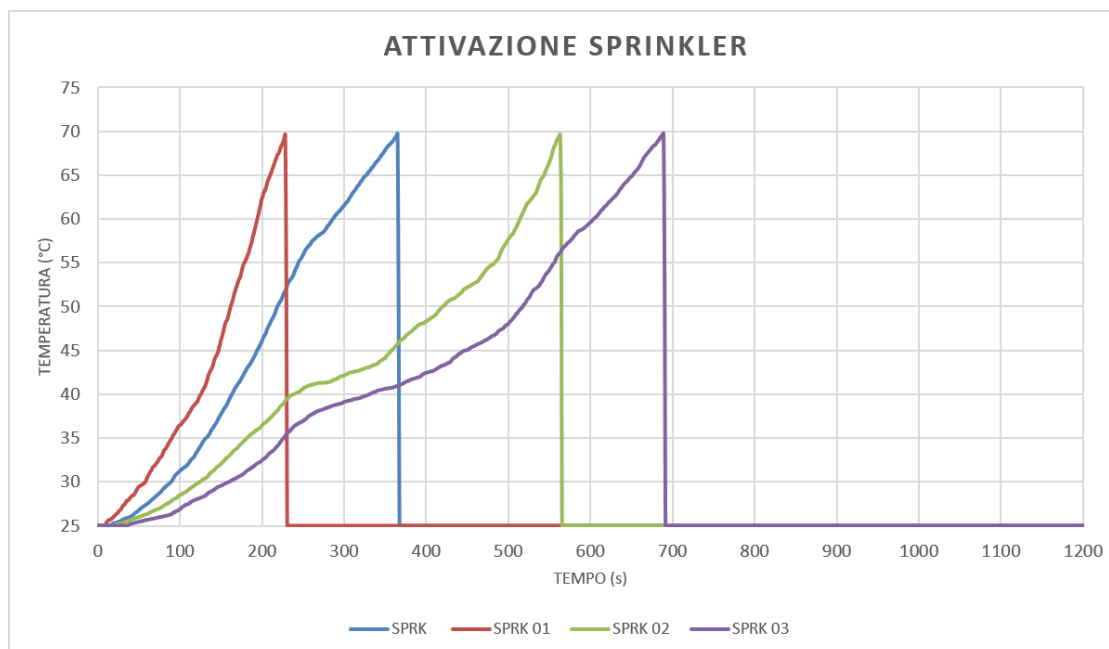


Figura 58: Attivazione degli sprinkler - Scenario 2 FCEV

GAS TOSSICI

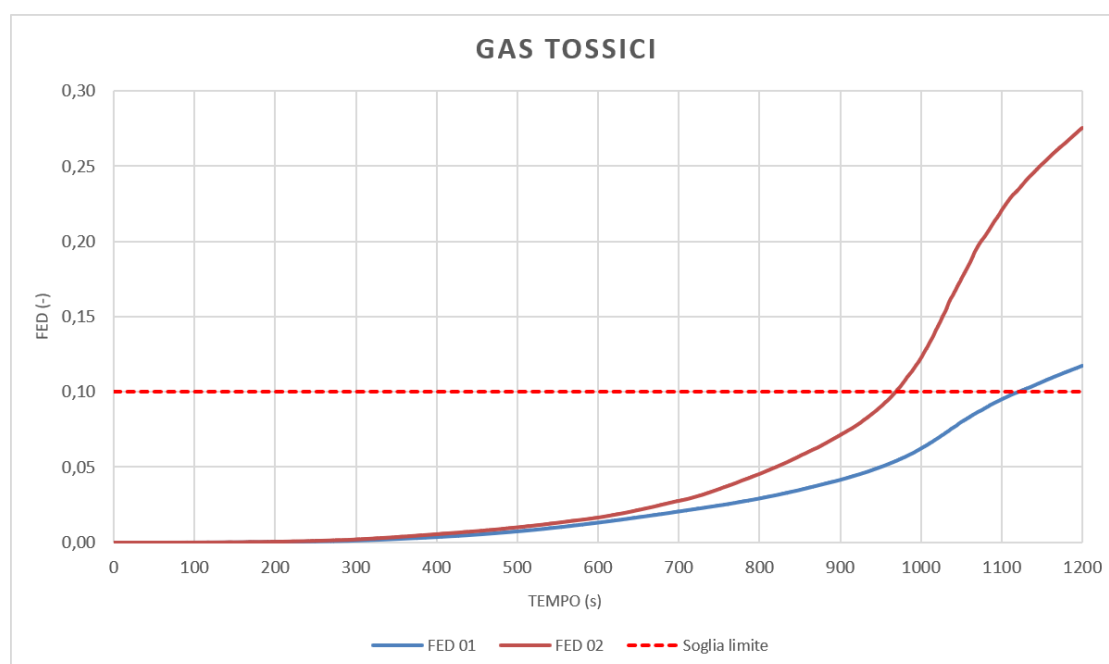


Figura 59: Modello dei gas tossici - Scenario 2 FCEV

L'andamento delle curve dei gas tossici rimane simile allo *Scenario 1* anche se il dispositivo FED 02 registra un superamento della soglia limite a 950 s, circa 100 s dopo rispetto al caso precedente. Il sensore FED 01 invece misura valori pressoché identici allo *Scenario 1*. FED 02 registra valori più elevati in entrambi gli scenari poiché si instaura un campo di moto all'interno del parcheggio che muove i gas verso la parte destra, provocandone un maggior accumulo.

4.1.3 Scenario 3

In questo scenario oltre alla presenza degli sprinkler, è previsto l'inserimento di un impianto di estrazione dei fumi che si attiva nel momento in cui la visibilità all'interno del parcheggio scende al di sotto dei 10 metri. La posizione delle griglie di estrazione viene mostrata nel *Paragrafo 3.1*. La curva HRR, riportata di seguito, è identica a quella mostrata nello *Scenario 2*.

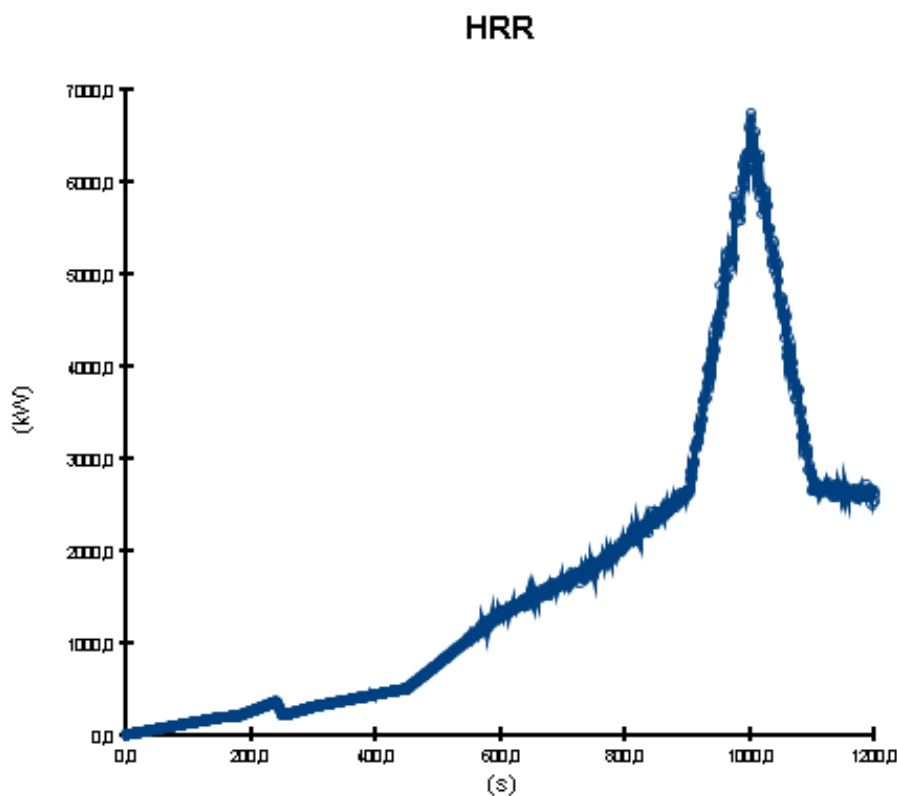


Figura 60: Curva HRR - Scenario 3 FCEV

VISIBILITÀ

Nelle immagini seguenti viene mostrata la densità dei fumi presenti all'interno del parcheggio in quattro istanti di tempo differenti. La prima differenza che si può notare rispetto agli scenari precedenti è la pulizia dello scompartimento, soprattutto nelle prime fasi dell'incendio, ovvero quelle più delicate dal punto di vista della sicurezza. Negli ultimi 300 secondi della simulazione, nonché il

momento con un HRR maggiore, la produzione di fumi è superiore alla capacità di estrazione dell'impianto, dimensionato per garantire la sicurezza nei primi minuti dell'incendio.

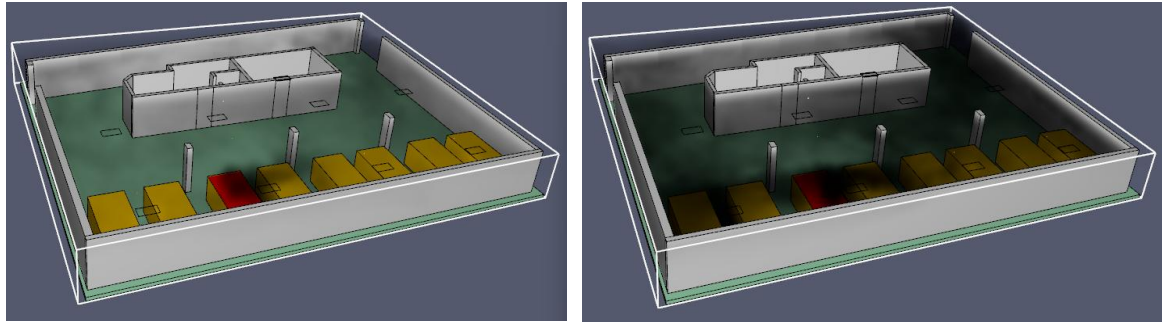


Figura 61: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 3 FCEV

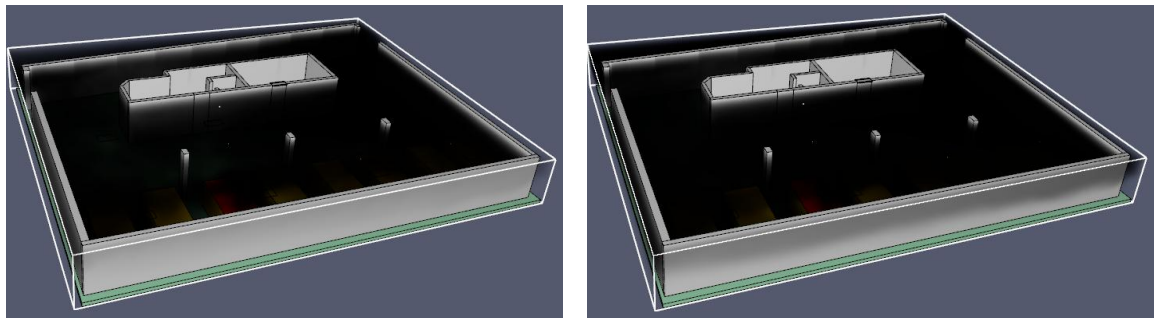


Figura 62: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 3 FCEV

Si osservi ora in *Figura 63* l'andamento della visibilità fornito dai dispositivi VIS 01 e VIS 02, in cui si nota che l'istante di superamento della soglia limite è uguale agli scenari precedenti, con un andamento negli istanti successivi invece completamente differente a causa della ventilazione.

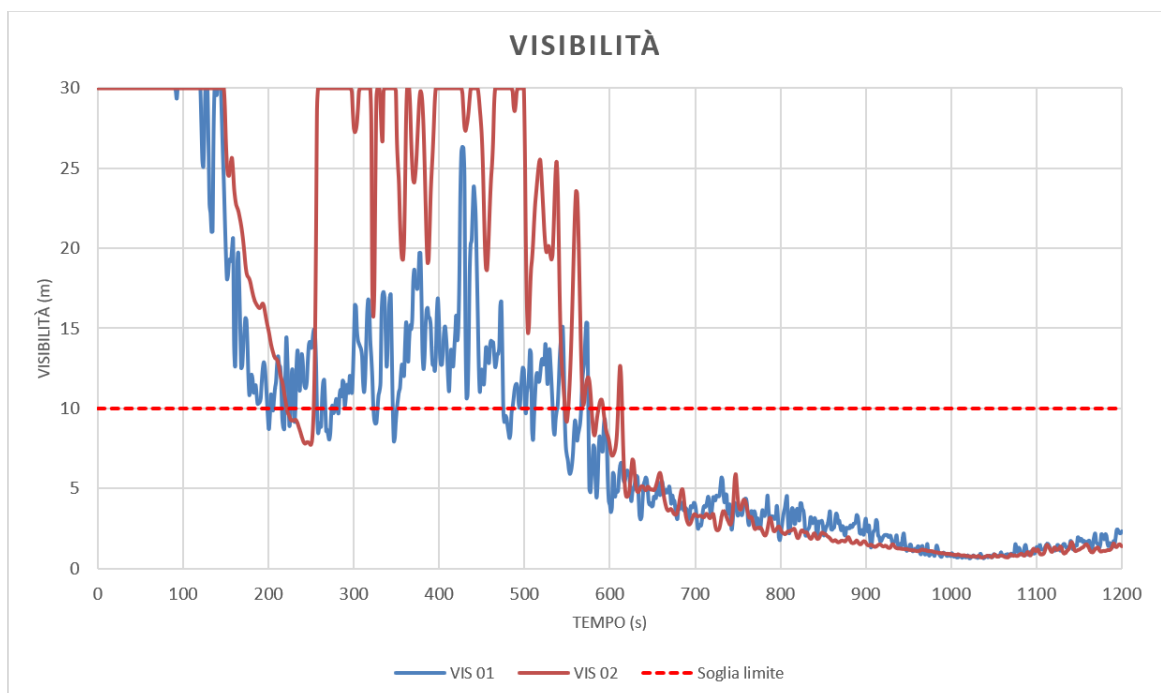


Figura 63: Modello della visibilità - Scenario 3 FCEV

Il sensore VIS 01 registra miglioramenti della visibilità nell'intervallo 250-550 secondi con un andamento più discontinuo rispetto al sensore VIS 02 a causa della vicinanza al focolare. Al contrario, il VIS 02 mostra un andamento più uniforme della curva, con una visibilità massima per un tempo superiore ai 200 secondi anche durante l'incendio. Dopo i 600 secondi, a causa dell'incremento della curva HRR e di conseguenza della produzione di fumi, l'impianto di ventilazione non è più in grado di smaltire tutta la fuliggine prodotta dall'incendio poiché è stato dimensionato per permettere agli occupanti di raggiungere un luogo sicuro nel minor tempo possibile; infatti, considerate le dimensioni del parcheggio, si presume che a 10 minuti dall'inizio del focolare tutti gli occupanti siano usciti.

TEMPERATURA

In *Figura 64* si mostrano le temperature registrate dalle termocoppie presenti nel modello.

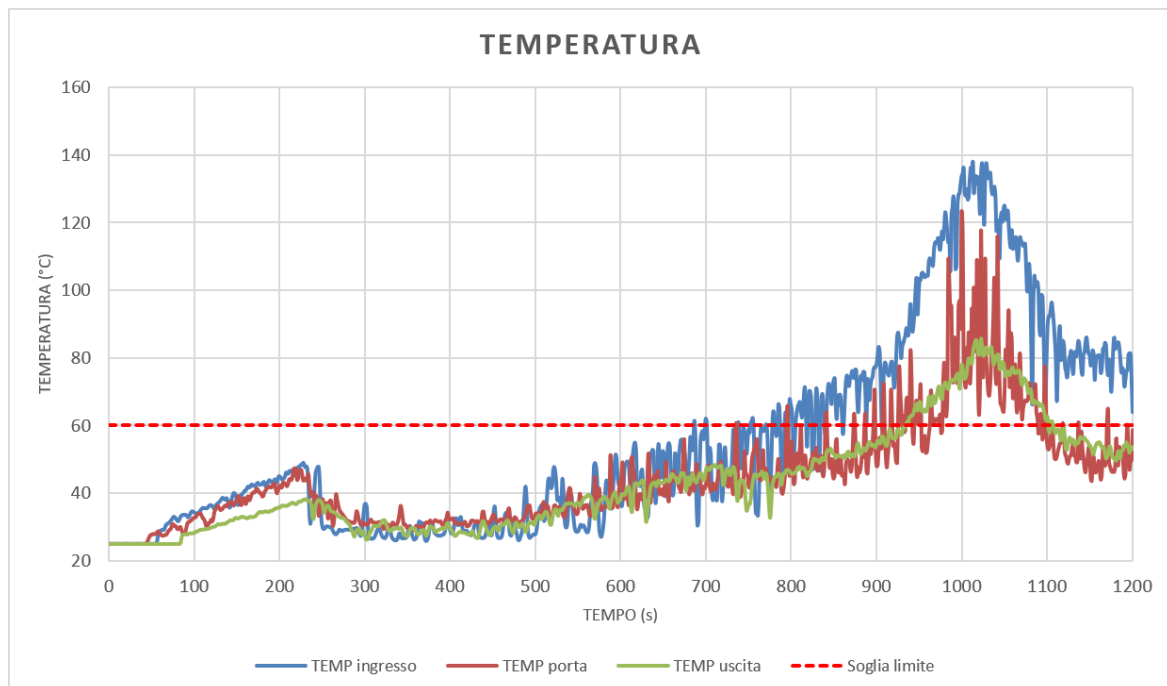


Figura 64: Modello del calore - Scenario 3 FCEV

La ventilazione contribuisce ulteriormente ad abbassare la temperatura nell'ambiente, infatti il valore massimo registrato è circa pari a 140 °C all'ingresso del parcheggio; invece, alla porta del vano scale e all'uscita si misurano temperature rispettivamente di 123 °C e 83 °C. Anche il tempo in cui si raggiunge la soglia limite per la prima volta migliora, passando da 550 secondi nello *Scenario 2* a 700 secondi in quello attuale. Esattamente come è stato fatto nei casi precedenti, di seguito si mostreranno le immagini relative alla variazione di temperatura fornite dalla simulazione.

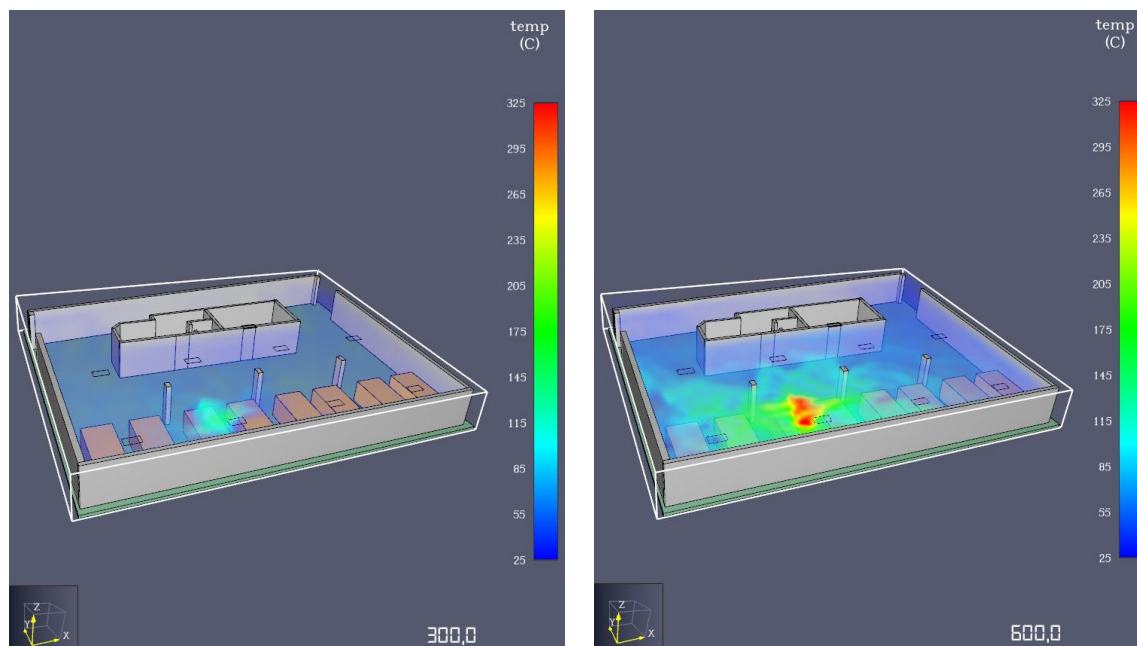


Figura 65: Andamento della temperatura all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 3 FCEV

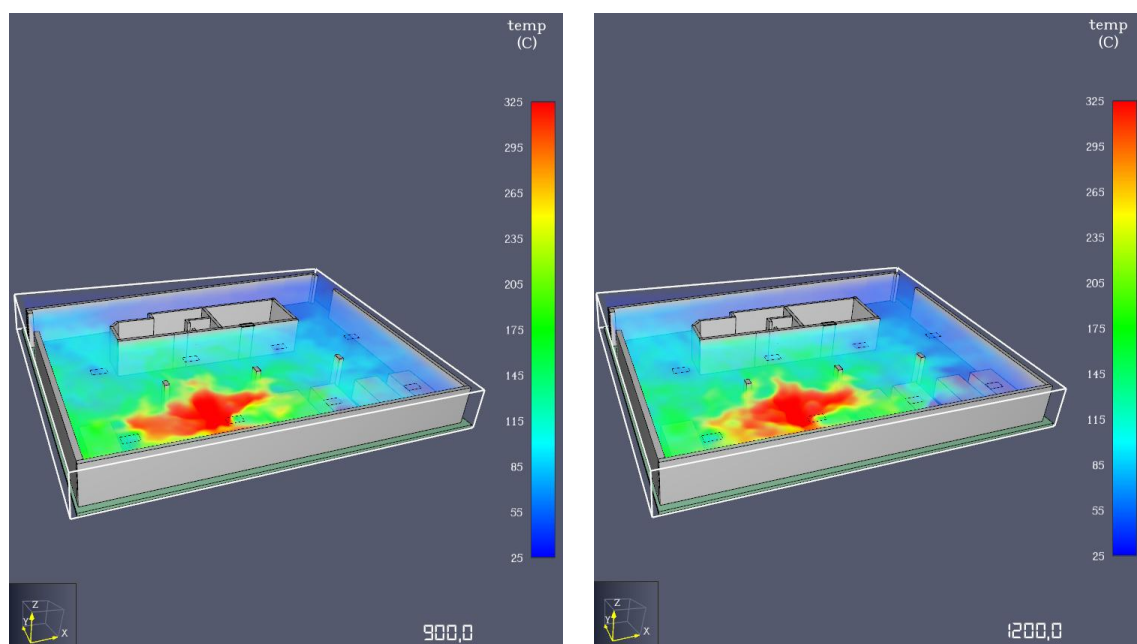


Figura 66: andamento della temperatura all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 3 FCEV

ATTIVAZIONE DEGLI SPRINKLER

A causa della riduzione di temperatura provocata sia dalla ventilazione sia dall'impianto antincendio, anche l'attivazione degli sprinkler subisce una variazione in termini di tempo. Infatti, tranne lo SPRK 01 che si attiva sempre nello stesso istante in quanto posizionato sopra al focolare, gli altri tre impiegano più tempo a raggiungere il punto di funzionamento fissato a 70 °C. Questo effetto si nota anche dai grafici riportati in *Figura 67* in cui lo SPRK, SPRK 02 e SPRK 03 presentano una concavità all'istante di attivazione dell'impianto di estrazione dei fumi, provocandone un abbassamento della temperatura misurata e di conseguenza un ritardo nell'attivazione.

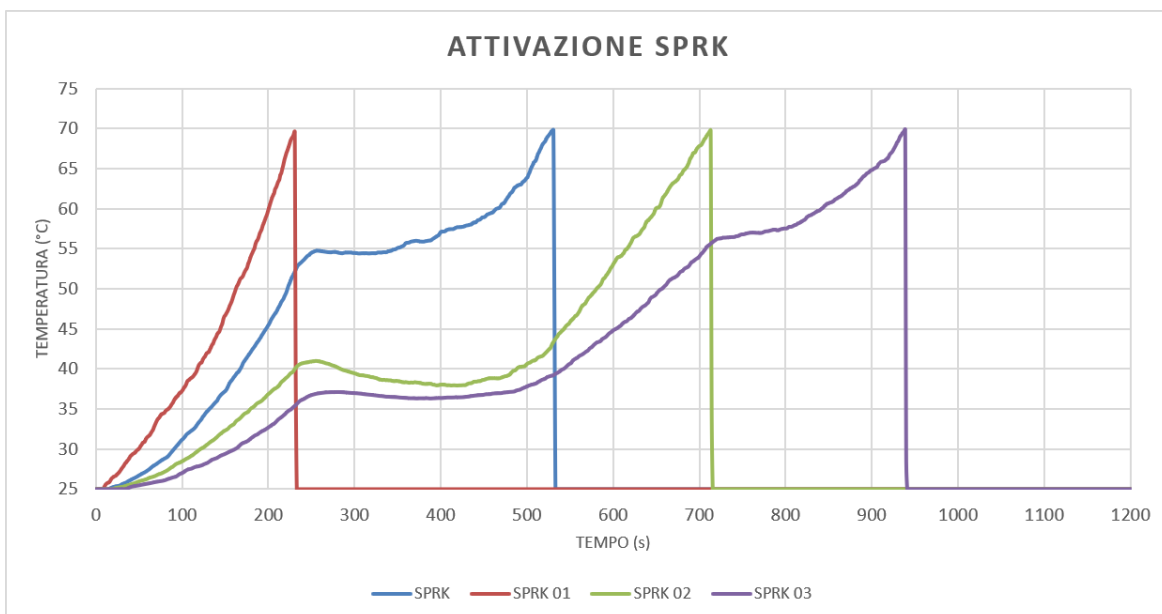


Figura 67: Attivazione degli sprinkler - Scenario 3 FCEV

GAS TOSSICI

Come ci si può aspettare, i gas tossici subiscono una variazione molto importante rispetto agli scenari precedenti in quanto la ventilazione permette l'estrazione dei fumi ricchi di sostanze dannose e l'ingresso di aria pulita dall'esterno che tende a ridurre le concentrazioni. In Figura 68 si nota come entrambi i sensori non raggiungano mai la soglia limite fissata a 0.1 durante tutta la simulazione.

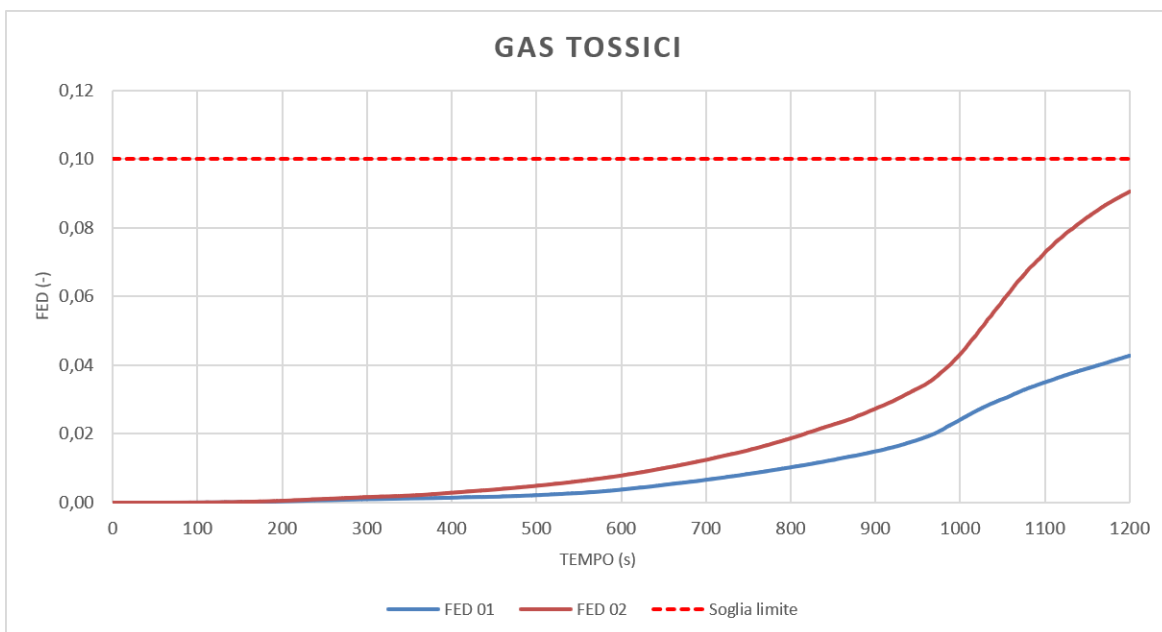


Figura 68: Modello dei gas tossici - Scenario 3 FCEV

4.2 Veicolo ICE

4.2.1 Scenario 1

Come per il veicolo FCEV anche in questo scenario l'incendio è libero di evolvere in quanto non è presente alcun tipo di impianto. La curva HRR utilizzata è diversa da quella precedentemente usata per l'auto ad idrogeno, la quale è rappresentata in *Figura 69*.

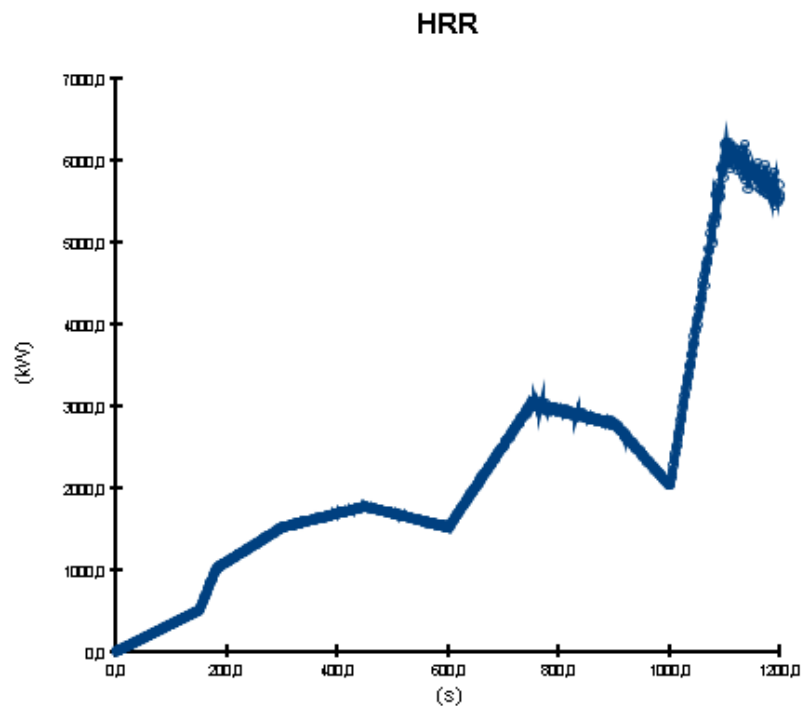


Figura 69: Curva HRR - Scenario 1 ICE

VISIBILITÀ

La visibilità a seguito dell'incendio di un veicolo a combustione interna è un parametro molto complicato da gestire, per due motivi principali:

- HRR del veicolo ICE
- Maggiore produzione di fuliggine

Il veicolo ICE ha un HRR che cresce velocemente nelle prime fasi dell'incendio raggiungendo un valore superiore ad 1 MW in meno di 200 secondi, motivo per cui anche la produzione di fumi dovuta alla combustione dei materiali cresce repentinamente. Il secondo motivo riguarda invece i combustibili utilizzati nel veicolo per garantirne il funzionamento, quali benzina e gasolio, che essendo miscele di idrocarburi producono un grande quantità di fuliggine se incendiati. Nelle immagini seguenti si mostra la densità dei fumi in quattro intervalli di tempo equi distanziati.

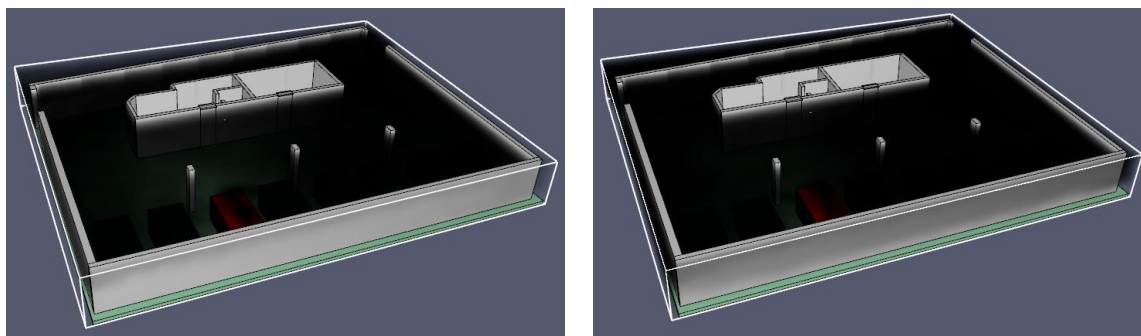


Figura 70: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 1 ICE

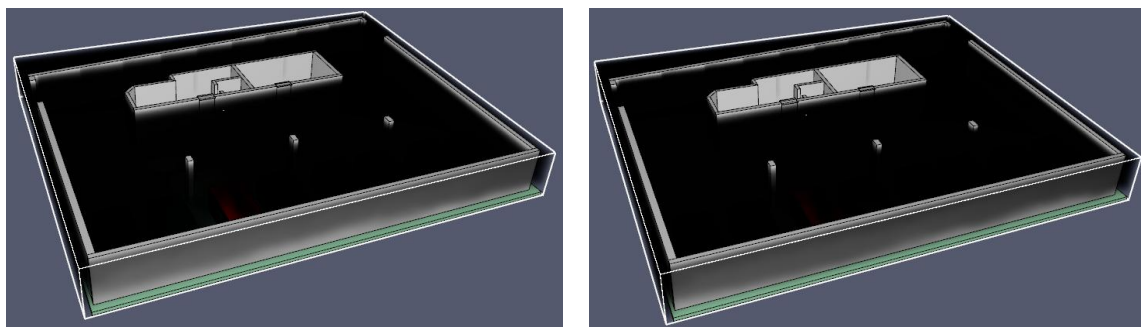


Figura 71: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 1 ICE

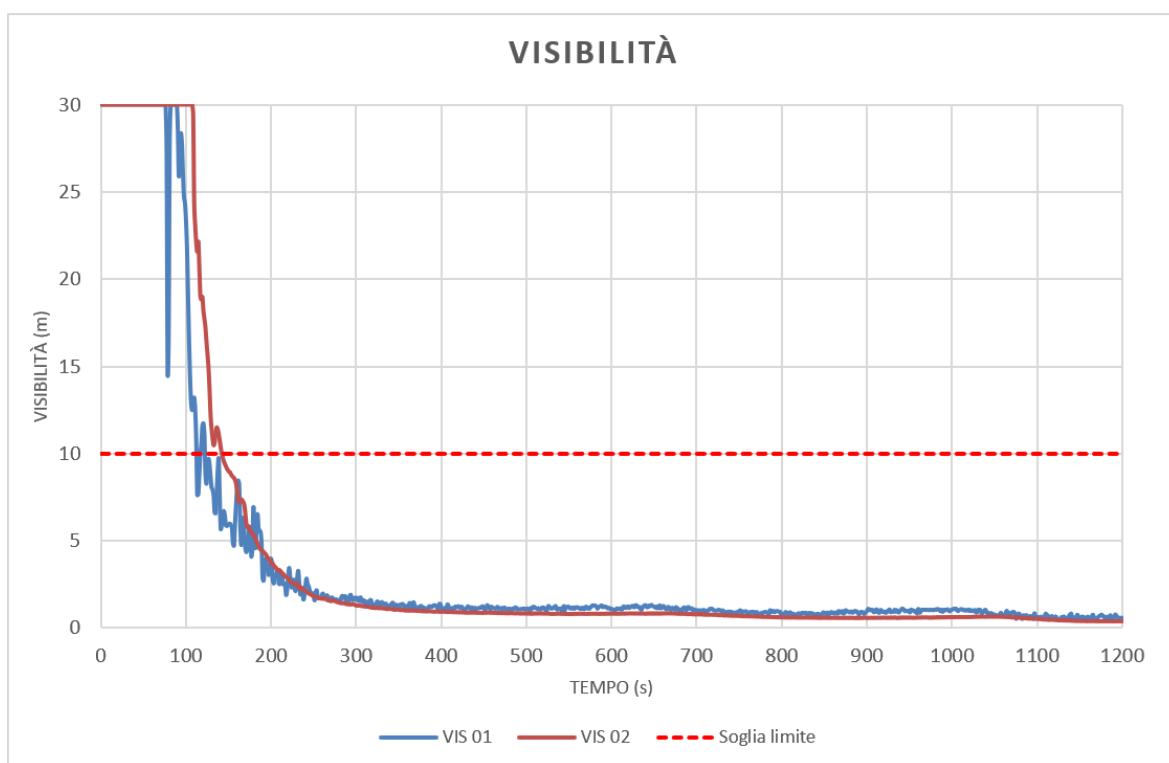


Figura 72: Modello di visibilità - Scenario 1 ICE

Come si può notare dalla *Figura 70*, ad un tempo di 300 secondi il parcheggio è quasi completamente pieno di fumo, cosa che non succedeva con il veicolo FCEV. Le immagini restituite dal software

CFD aiutano a capire la criticità del fenomeno però sono i grafici a permettere un'analisi più accurata, per questo motivo in *Figura 72* si mostrano i valori registrati dai sensori di visibilità.

Il dispositivo VIS 01 registra un superamento della soglia limite ad un tempo di 113 s oltre il quale l'andamento continua a decrescere in modo uniforme. Il VIS 02 raggiunge il valore limite poco dopo, ad un tempo di 143 s. Indicano entrambi una condizione critica ai fini della sicurezza delle persone.

TEMPERATURA

Si andrà ora a valutare l'andamento di temperatura registrato dalle termocoppie.

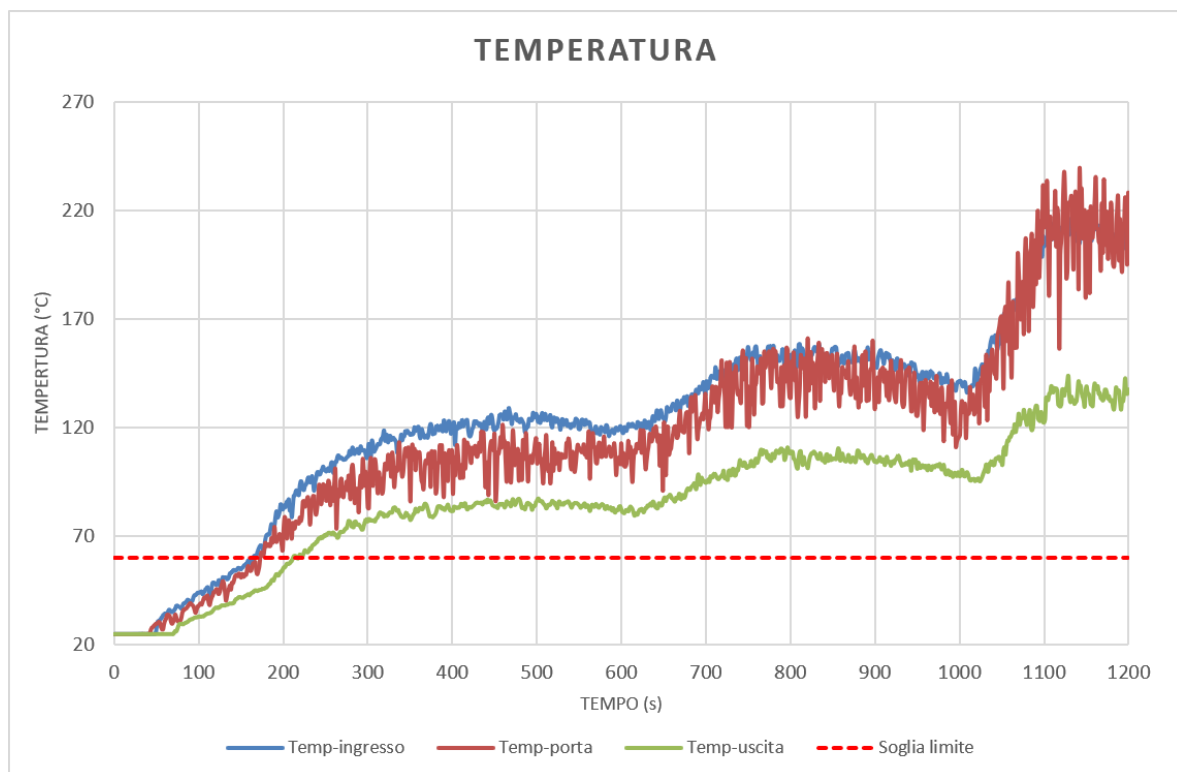


Figura 73: Modello del calore - Scenario 1 ICE

L'andamento della temperatura all'ingresso del parcheggio e nei pressi della porta che affaccia sul vano scale è molto simile, con la prima che raggiunge valori leggermente più alti ed un picco pari a 238 °C a 1142 secondi. La temperatura all'uscita mostra lo stesso andamento delle prime due ma con valori nettamente più bassi, rappresentati da un picco pari a 143 °C registrato a 1130 secondi. Anche il superamento della soglia limite avviene quasi contemporaneamente per i primi due dispositivi ad un tempo di 165 secondi, invece il sensore all'uscita a circa 220 secondi. Un ulteriore valore misurato, anche se non inserito nel grafico soprastante, è la temperatura di fiamma che registra un picco massimo a 600 °C oltre i 1110 secondi.

Sempre per fornire un'idea più chiara dell'andamento delle temperature all'interno del parcheggio, nelle immagini seguenti verranno mostrate le immagini restituite da Pyrosim durante il corso della simulazione.

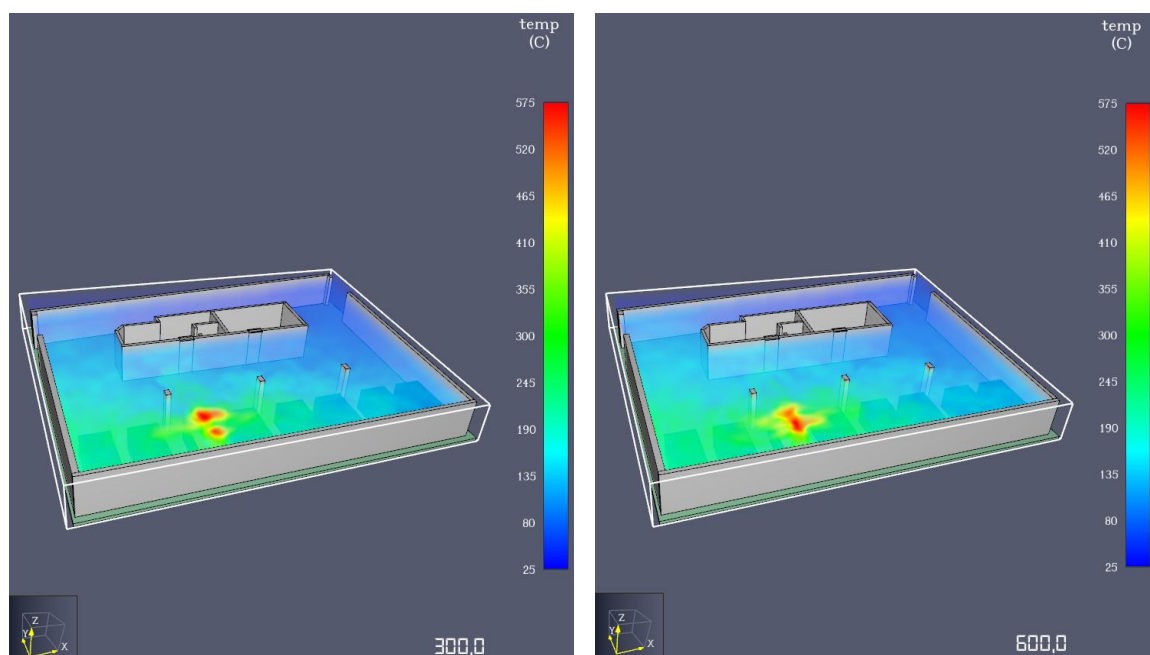


Figura 74: Andamento della temperatura all'istante 300s (sx) e 600s (dx) – Scenario 1 ICE

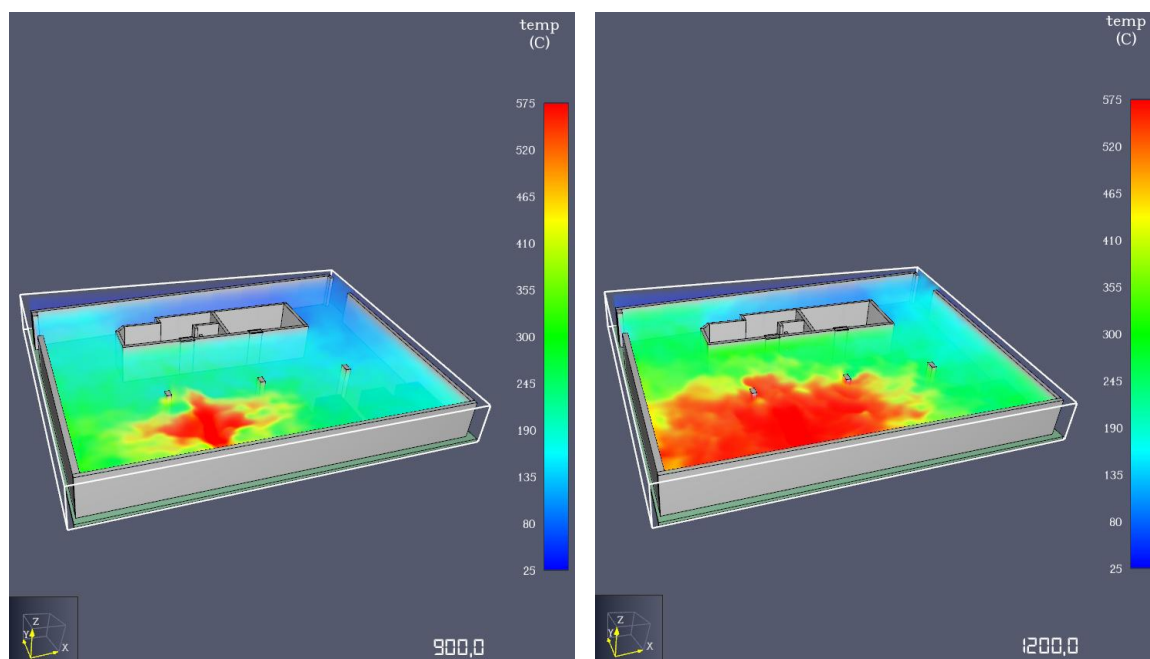


Figura 75: Andamento della temperatura all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 1 ICE

GAS TOSSICI

Il dispositivo FED 02 è il primo a superare la soglia limite fissata a 0.1 in un tempo di circa 830 secondi; invece, il sensore FED 01 non raggiunge il valore massimo consentito dal Codice neanche alla fine della simulazione, registrando un valore di picco pari a 0.098. Anche per questo veicolo si instaura un campo di moto che tende a far muovere i fumi verso la parte destra del parcheggio, motivo per il quale il dispositivo FED 02 raggiunge per primo la soglia limite e dei maggiori valori registrati.

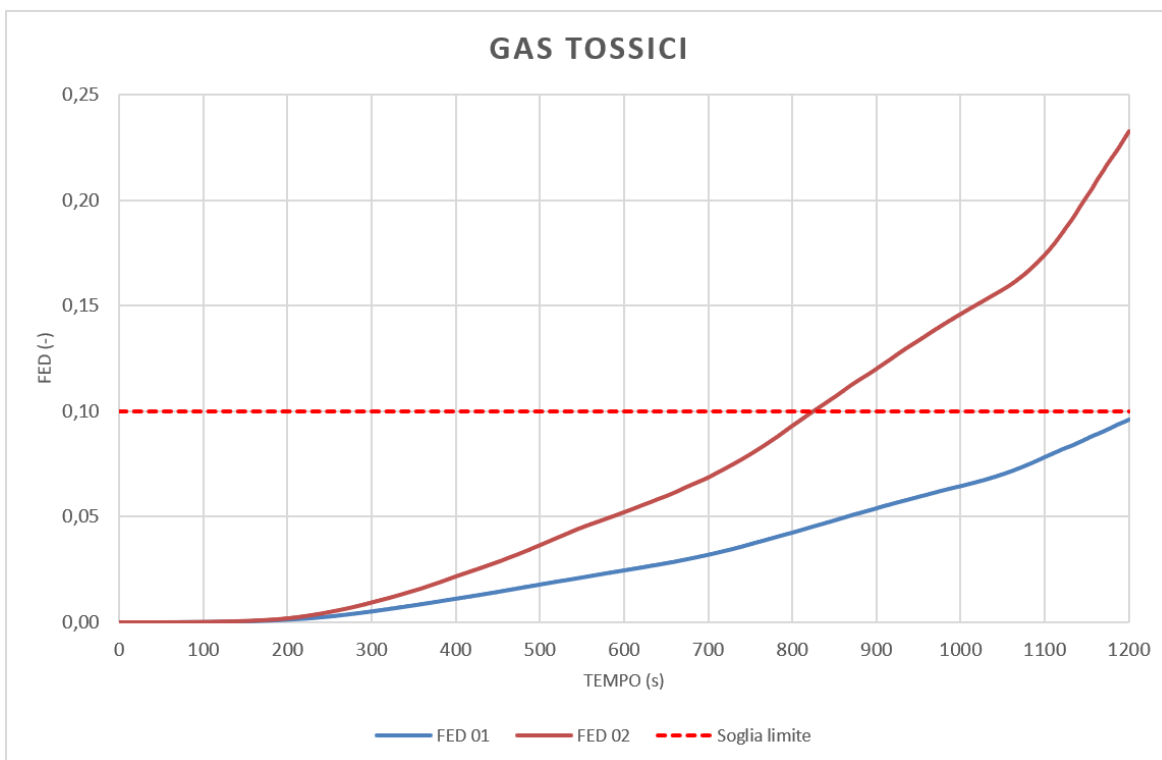


Figura 76: Modello dei gas tossici - Scenario 1 ICE

4.2.2 Scenario 2

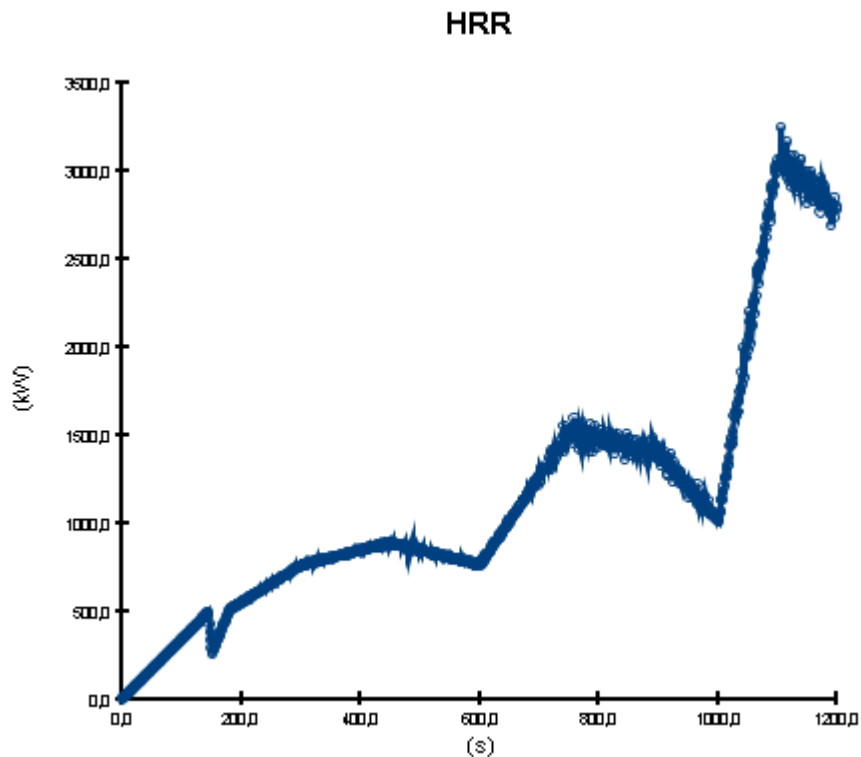


Figura 77: Curva HRR - Scenario 2 ICE

VISIBILITÀ

Esattamente come è stato fatto per il veicolo ad idrogeno, si mostreranno dei frame della vista frontale del parcheggio così da risaltare l'impatto dell'impianto sprinkler sulla visibilità. Eventuali confronti con il veicolo FCEV verranno eseguiti nel prossimo paragrafo.

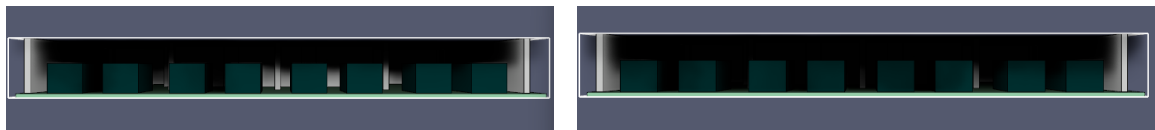


Figura 78: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 2 ICE

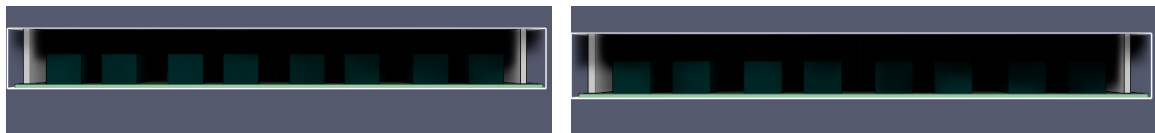


Figura 79: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 2 ICE

Dalla *Figura 78* al tempo 300 secondi si nota che gli sprinkler posizionati sopra le prime due coppie di veicoli sono già attivi poiché i fumi sono stati trasportati fino al livello del pavimento, invece per le ultime due coppie i fumi sono ancora stratificati nella parte superiore del parcheggio. Una volta attivati tutti gli sprinkler la visibilità peggiora in tutta la sezione.

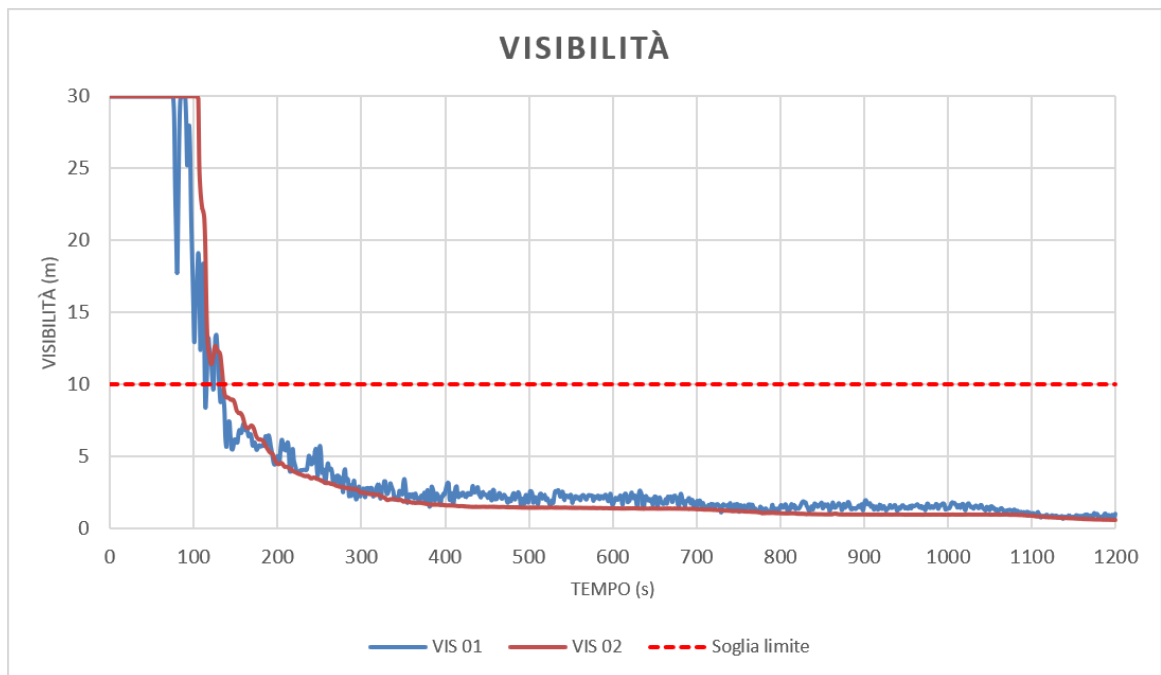


Figura 80: Modello di visibilità - Scenario 2 ICE

L'andamento dei valori di visibilità è molto simile allo *Scenario 1* in quanto i sensori sono installati ad 1.8 m da terra e non essendo presente un impianto di estrazione dei fumi la visibilità non migliora, anzi, peggiora ad altezze più basse come visto dalle immagini precedenti.

TEMPERATURA

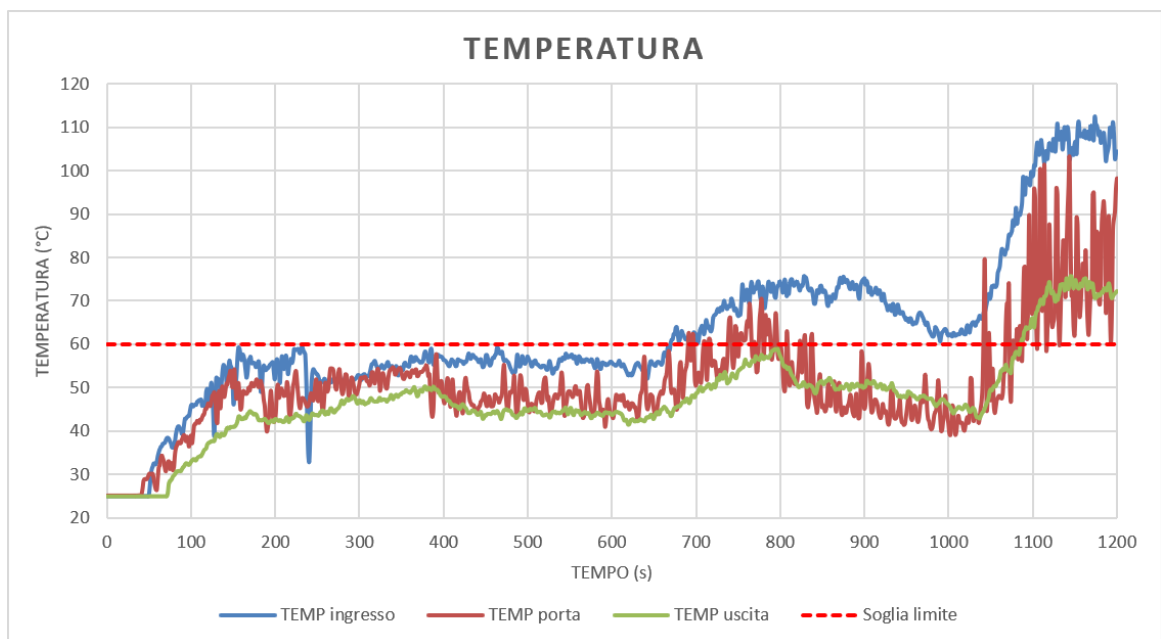


Figura 81: Modello del calore - Scenario 2 ICE

La presenza dell'impianto antincendio provoca una riduzione delle temperature, infatti da *Figura 81* si nota che il picco massimo raggiunto è pari a 110 °C per il sensore posto all'ingresso del parcheggio, invece che 243 °C come nello *Scenario 1*. Un cambiamento importante riguarda la temperatura alla porta, la cui curva precedentemente era quasi del tutto sovrapposta con quella relativa all'ingresso invece in questo scenario mostra dei valori nettamente più bassi, raggiungendo un picco inferiore ai 110 °C. Anche la temperatura all'uscita riduce il suo valore massimo di più di 40 °C. Di conseguenza cambiano i tempi di superamento delle soglie prestazionali, con il primo sensore che raggiunge i 60 °C ad un tempo di 675 secondi, rispetto ai 165 secondi ottenuti nello scenario precedente.

Di seguito vengono mostrate le immagini relative alle temperature raggiunte a soffitto dai gas presenti nell'ambiente, con la zona al di sopra del focolare in grado di raggiungere temperature superiori ai 225 °C nonostante la presenza dell'impianto antincendio. Si noti però come le temperature nel resto del parcheggio siano relativamente contenute e alla fine della simulazione, nonché uno degli istanti con l'HRR più elevato, la temperatura nei pressi della sezione di uscita sia inferiore agli 80 °C.

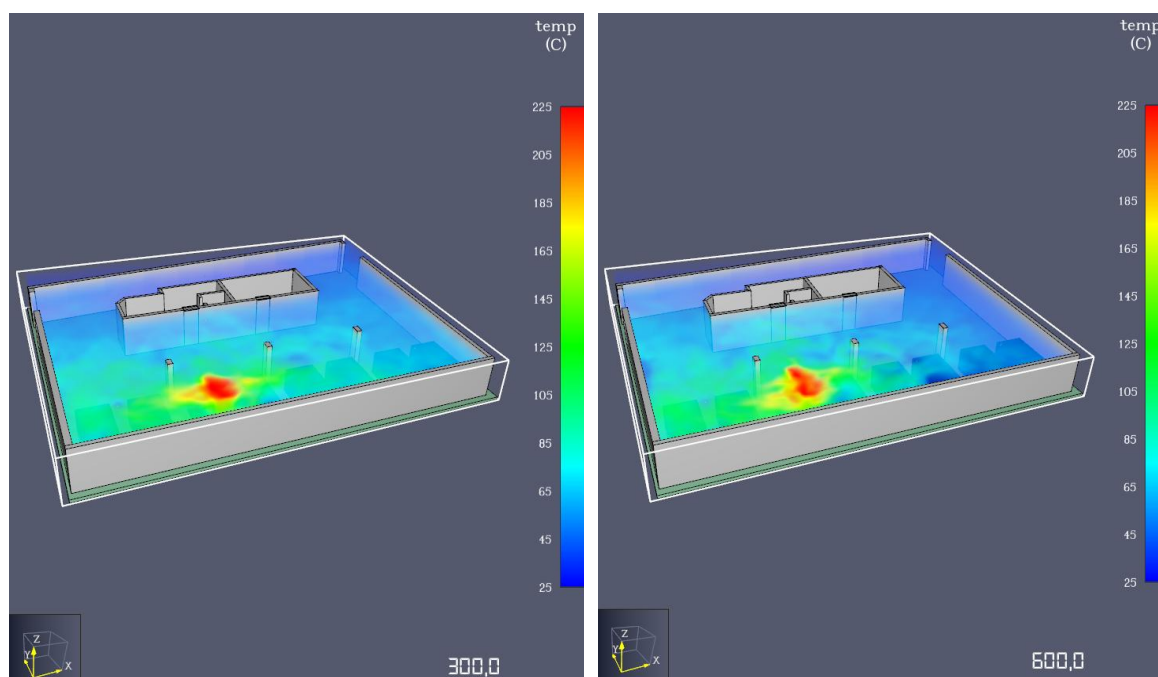


Figura 82: Andamento della temperatura all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 2 ICE

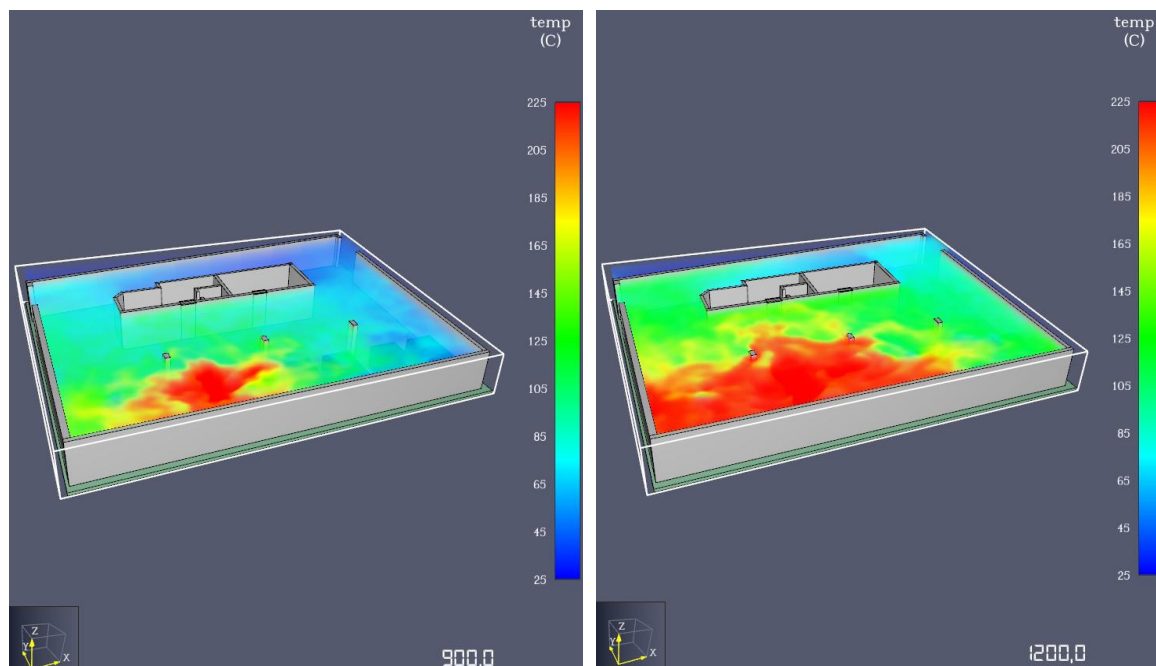


Figura 83: Andamento della temperatura all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 2 ICE

ATTIVAZIONE DEGLI SPRINKLER

A causa della crescita rapida del Heat Rate Release nella fase iniziale dell'incendio, la temperatura aumenta in modo tale da far scattare gli sprinkler repentinamente, infatti come si vede da *Figura 84* il primo di essi comincia ad erogare acqua a 145 secondi, seguito dal secondo a poco più di 200 secondi dall'innesco e dal terzo a 374 secondi. L'ultimo sprinkler scatta a quasi 800 secondi poiché la riduzione di temperatura avvenuta nell'ambiente ne ritarda l'attivazione, come si vede dalla presenza di un flesso sulla curva "viola".

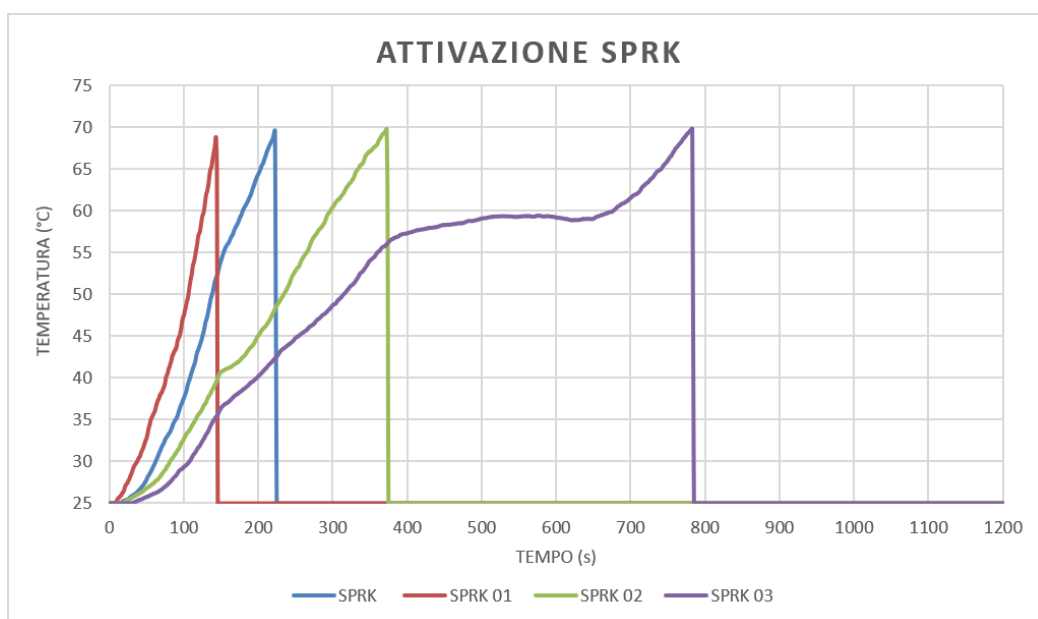


Figura 84: Attivazione degli sprinkler - Scenario 2 ICE

GAS TOSSICI

Il sensore FED 02 raggiunge la soglia limite consentita ad un tempo di 1076 secondi invece che 830 secondi come nello *Scenario 1*, poiché riducendosi la potenza di incendio si riduce anche il quantitativo di materiale che brucia e di conseguenza le sostanze tossiche da esso rilasciate. Anche in questo scenario il FED 01 continua a non superare il limite massimo, anzi raggiunge un picco di 0.08 a fine simulazione.

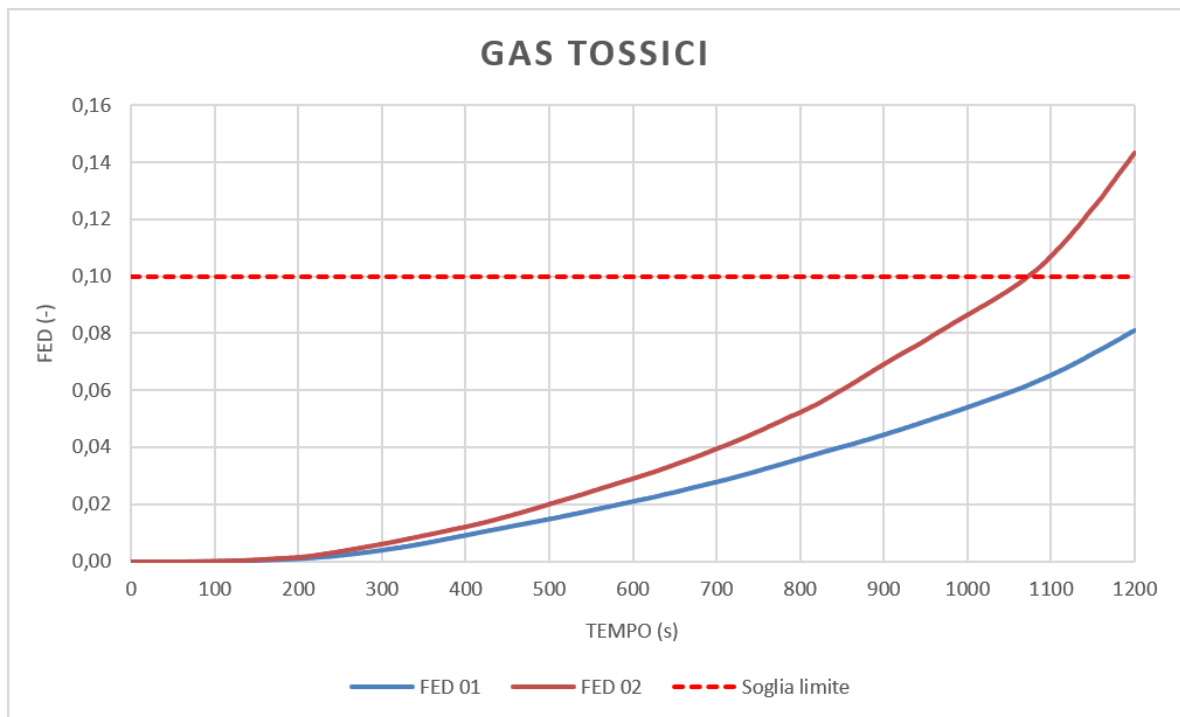


Figura 85: Modello dei gas tossici - Scenario 2 ICE

4.2.3 Scenario 3

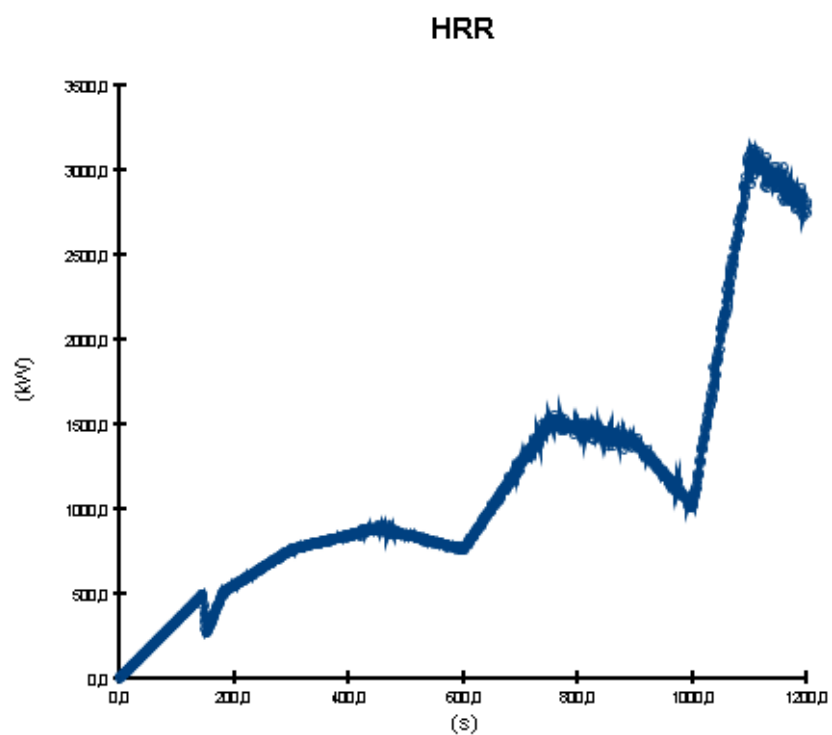


Figura 86: Curva HRR - Scenario 3 ICE

VISIBILITÀ

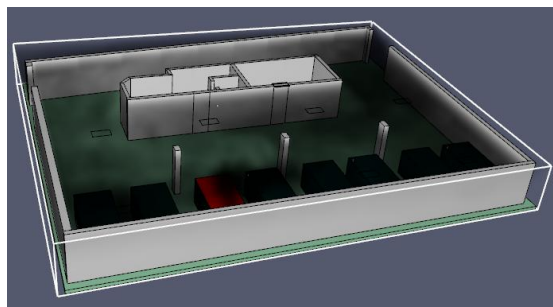
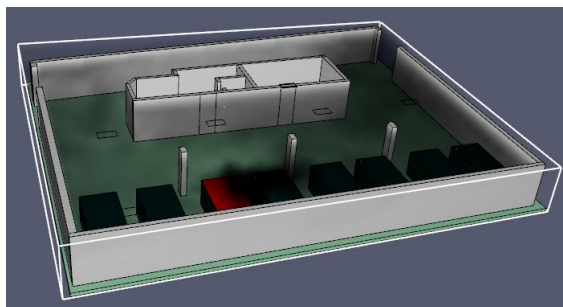


Figura 87: Densità dei fumi all'istante 300s (sx) e 600s (dx) – Scenario 3 ICE

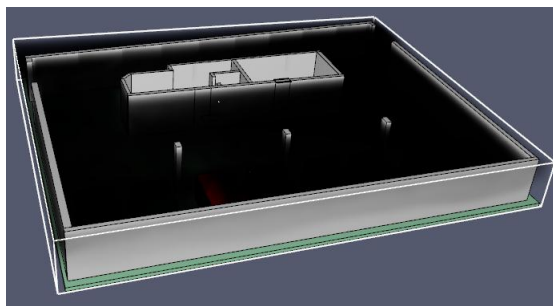
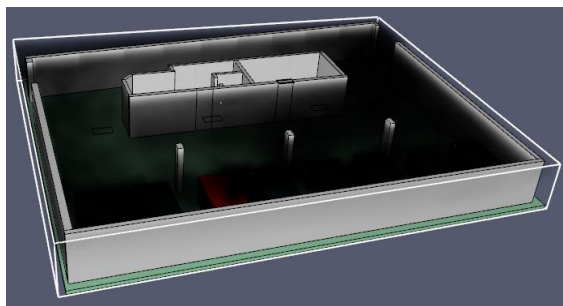


Figura 88: Densità dei fumi all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) – Scenario 3 ICE

A differenza dello *Scenari 1 e 2* in cui a 300 secondi il parcheggio risultava pieno di fumi, con l'impianto di estrazione si ha ancora una modesta visibilità a 600 secondi. Come sempre però è molto più utile andare a valutare i parametri registrati dai sensori installati ad 1.8 metri, visibili in *Figura 89*.

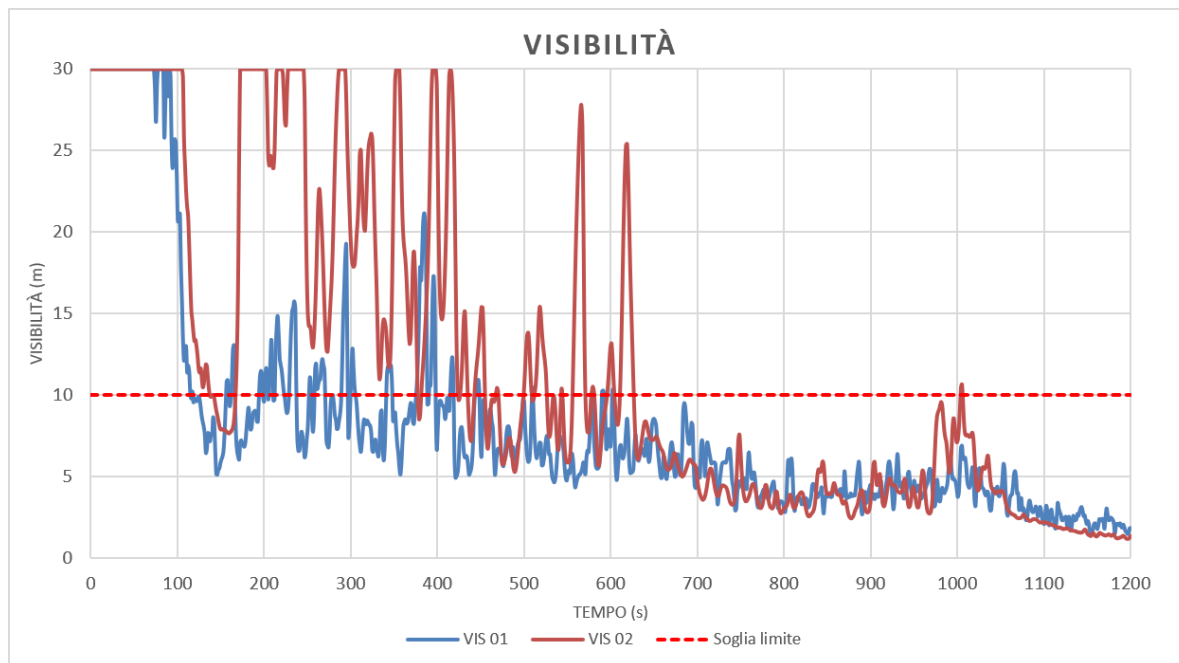


Figura 89: Modello di visibilità - Scenario 3 ICE

La visibilità misurata dal sensore VIS 01 mostra un miglioramento rispetto allo *Scenario 1* anche se i valori sono molto instabili a causa dell'elevata produzione di fumi nella fase iniziale dell'incendio. Il VIS 02 invece registra un miglioramento più marcato rispetto agli scenari precedenti risultando in grado di raggiungere nuovamente la massima visibilità intorno ai 180 secondi per poi scendere definitivamente al di sotto della soglia limite a 632 secondi.

TEMPERATURA

La presenza dell'impianto di estrazione dei fumi in accoppiata con l'impianto antincendio permette un'ulteriore riduzione delle temperature e di conseguenza del superamento delle soglie prestazionali. Si noti in *Figura 90* come la temperatura più alta sia stata registrata all'ingresso del parcheggio, esattamente come nello *Scenario 2*, ma con un valore inferiore; infatti, si ha un picco di 92 °C a 1190 secondi rispetto a 110 °C nel caso precedente. In questo scenario solo le temperature all'ingresso e alla porta superano la soglia limite oltre i 1000 secondi; invece, la temperatura misurata all'uscita non la supera mai, raggiungendo un valore massimo esattamente pari a 60 °C. Un ulteriore aspetto che si può analizzare dal grafico seguente è l'istante in cui si verifica una netta riduzione delle

temperature, che è rappresentato proprio dall'attivazione del sistema di ventilazione insieme agli sprinkler.

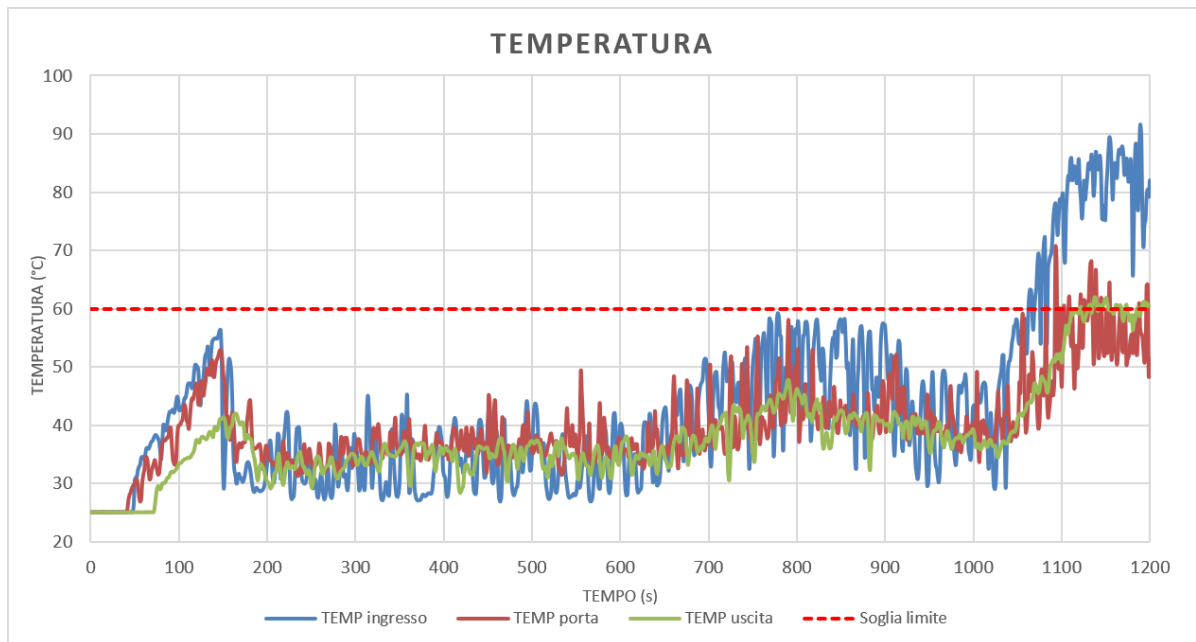


Figura 90: Modello del calore - Scenario 3 ICE

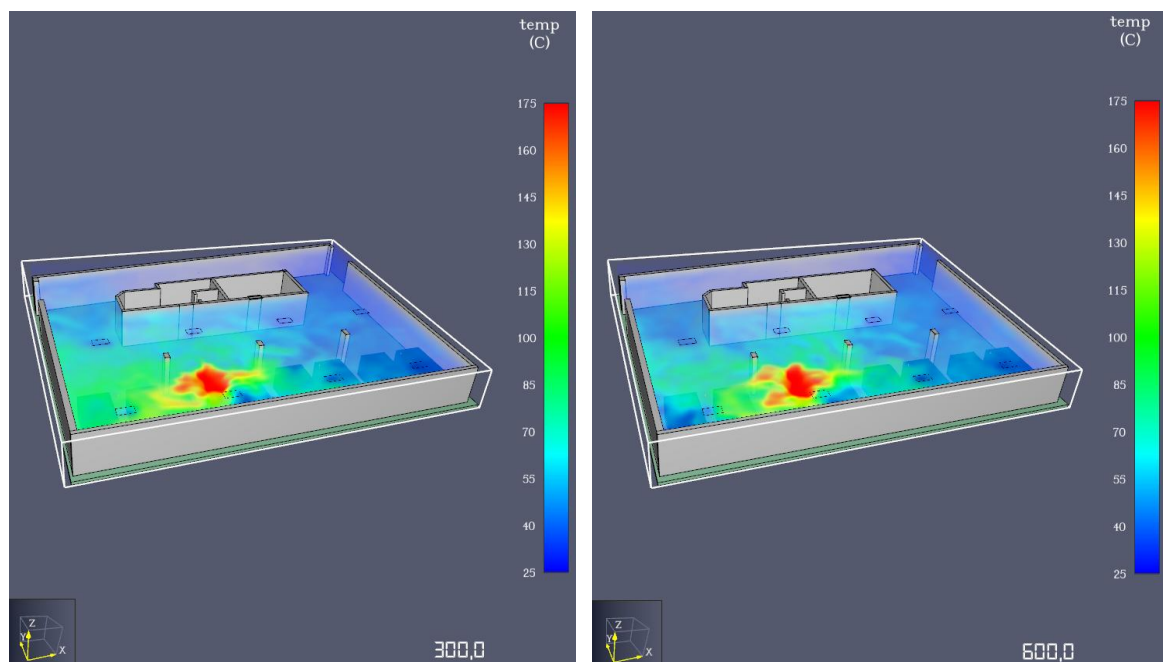


Figura 91: Andamento delle temperature all'istante 300s (sx) e 600s (dx) - Scenario 3 ICE

La temperatura dei gas presenti nell'ambiente si è ridotta di 50 °c rispetto allo *Scenario 2* come si può notare dalla scala graduata a destra di *Figura 91*. L'intervento della ventilazione garantisce

temperature contenute anche a 900 s, tranne nella zona in cui è presente il focolare. A 1200 secondi, l'unica zona a “bassa” temperatura resta quella della rampa di uscita.

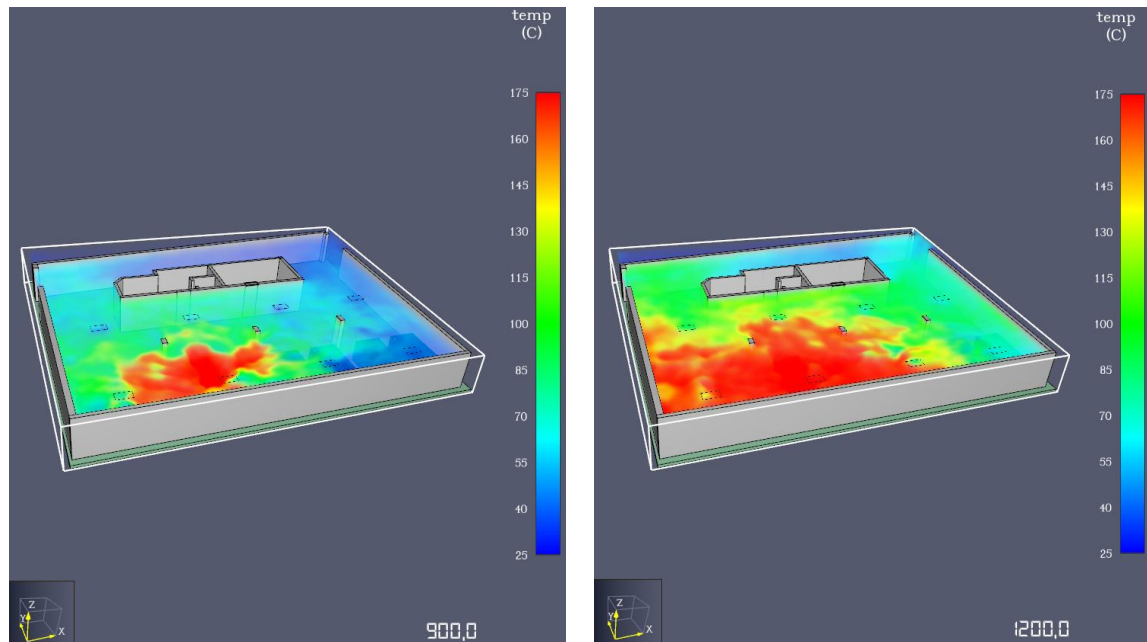


Figura 92: Andamento della temperatura all'istante 900s (sx) e 1200s (dx) - Scenario 3 ICE

ATTIVAZIONE DEGLI SPRINKLER

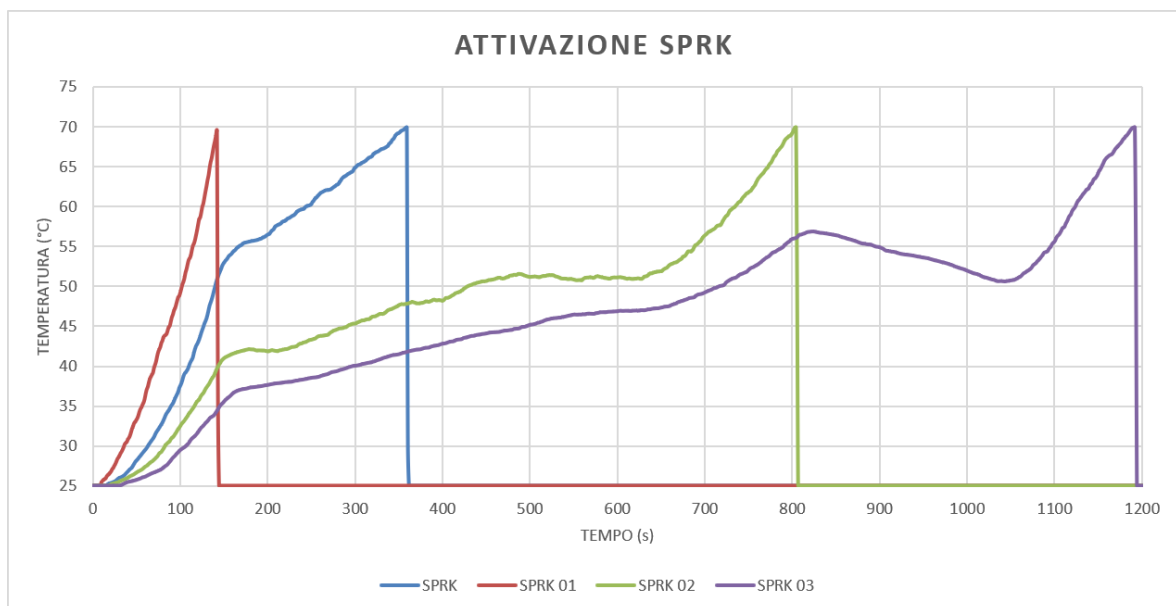


Figura 93: Attivazione degli sprinkler - Scenario 3 ICE

Rispetto allo *Scenario 2* si nota subito l'allungamento dei tempi soprattutto per SPRK 02 e SPRK 03 che si attivano entrambi circa 400 secondi più tardi. Lo SPRK si attiva a 361 secondi, anch'esso in ritardo rispetto allo scenario analizzato in precedenza.

GAS TOSSICI

L'impianto di ventilazione permettendo l'estrazione dei fumi e l'ingresso di aria pulita in grado di diluire le concentrazioni di inquinanti, garantisce un abbassamento dei valori relativi ai gas tossici. Infatti, come mostrato in *Figura 94*, si nota che il FED 02 raggiunge a fine simulazione un valore di 0,5, invece nello *Scenario 2* superava la soglia limite a 1076 secondi. Anche il FED 01 non supera mai il limite, così come nello *Scenario 2*.

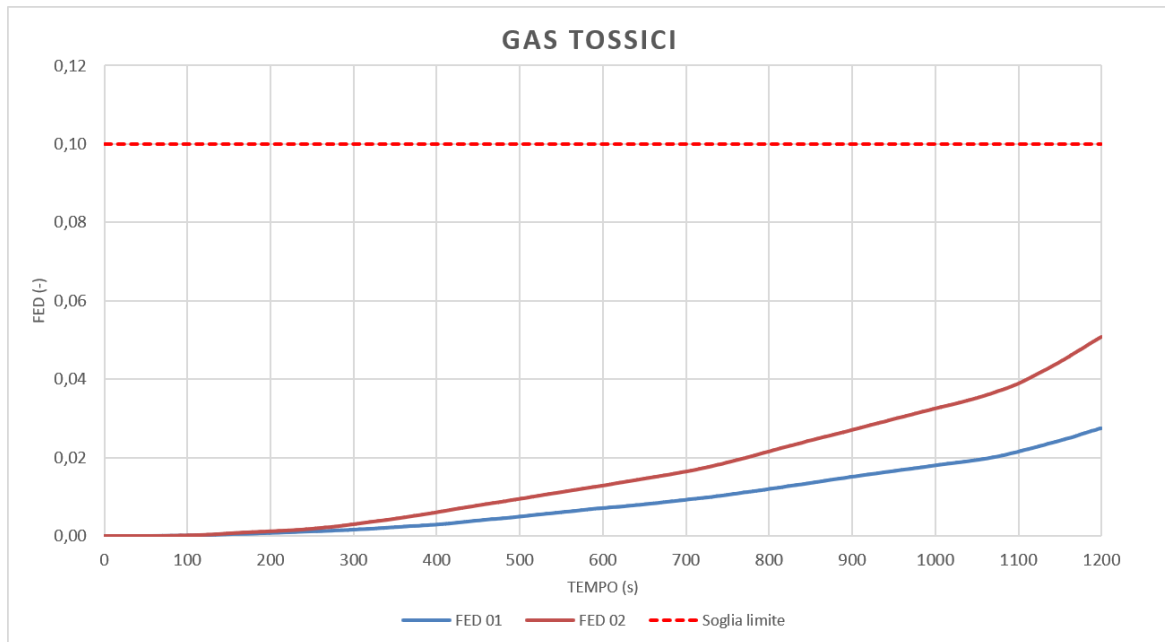


Figura 94: Modello dei gas tossici - Scenario 3 ICE

4.3 Confronto FCEV-ICE

Ai fini della trattazione risulta interessante confrontare gli output ottenuti nelle varie simulazioni di incendio per le due tipologie di veicoli. Si seguirà lo stesso schema utilizzato in precedenza, ovvero confronti in termini di visibilità- temperatura e gas tossici.

4.3.1 Scenario 1

VISIBILITÀ

Si nota subito che l'andamento delle curve dei veicoli ICE e FCEV sono simile tra loro ma con dei tempi di raggiungimento delle soglie limiti diversi. Infatti, nel caso del veicolo ICE si raggiunge il limite pari a 10 metri a 127 secondi per il VIS 01 e a 147 secondi per il VIS 02, invece nel caso del veicolo FCEV si superano i 223 secondi per il VIS 01 e i 241 secondi per il VIS 02, garantendo una maggiore sicurezza degli occupanti. Dai 600 secondi in avanti, quando l'incendio è completamente sviluppato, entrambi i veicoli raggiungono lo stesso livello di visibilità.

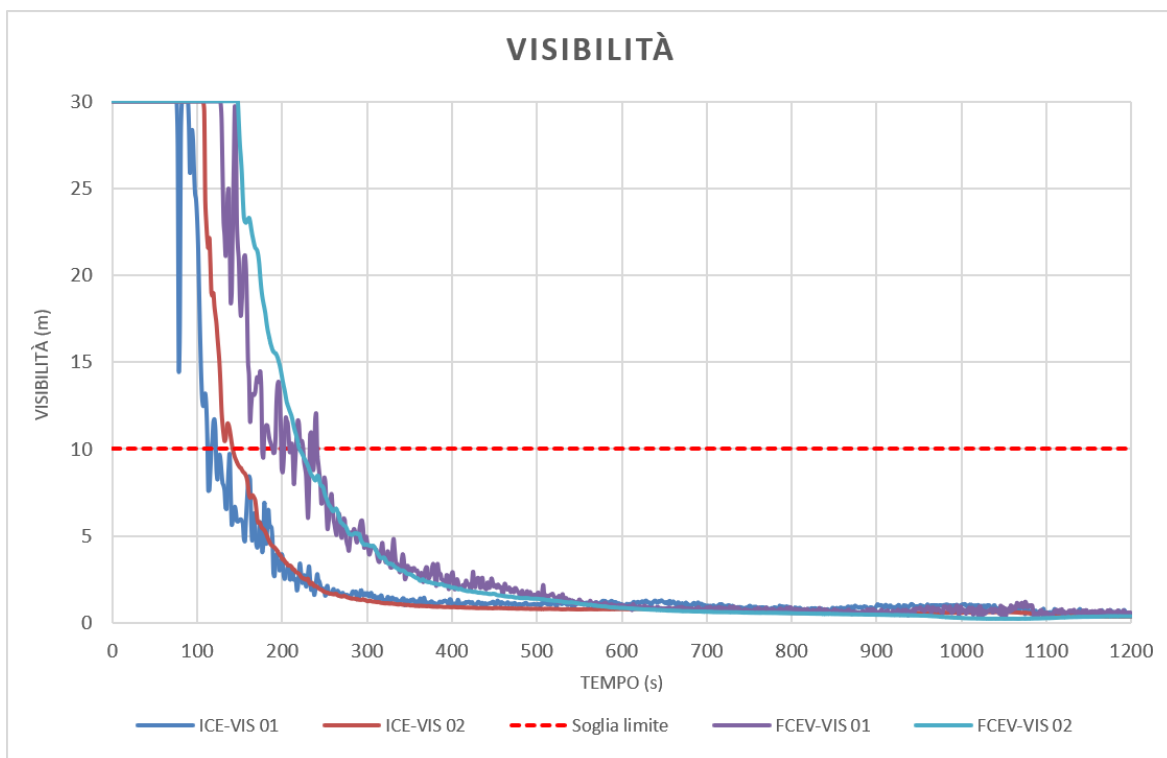


Figura 95 Modello di visibilità - Scenario 1 FCEV vs ICE

TEMPERATURA

In Figura 96 sono presenti tutte le temperature misurate nel modello.

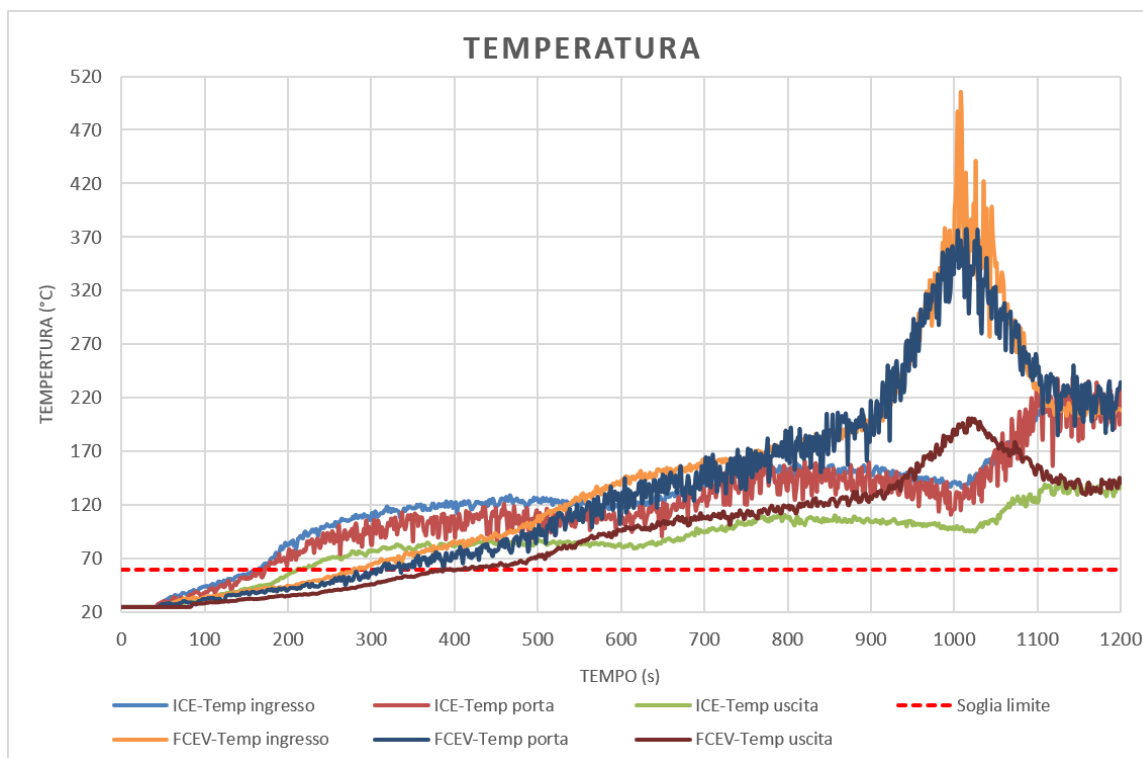


Figura 96: Modello del calore - Scenario 1 FCEV vs ICE

Si nota subito che i valori massimi sono stati registrati nel caso di incendio del veicolo FCEV, dovuti al picco di HRR raggiunto a 1000 secondi. Un altro aspetto interessante da sottolineare è l'andamento delle curve nei primi istanti dell'incendio in cui le temperature più alte sono rappresentate dal veicolo ICE, fino ad un tempo di circa 540 secondi, oltre il quale l'incremento della potenza di incendio del veicolo FCEV ne provoca un innalzamento delle temperature.

GAS TOSSICI

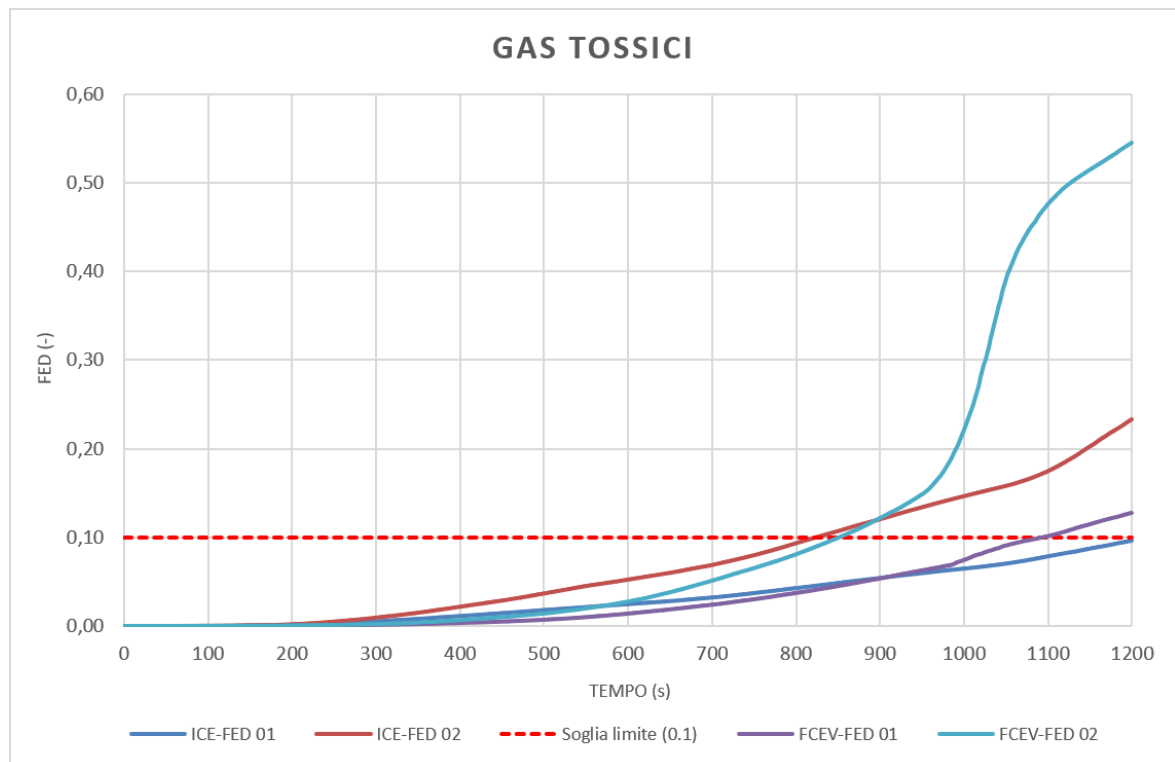


Figura 97: Modello dei gas tossici - Scenario 1 FCEV vs ICE

La produzione di gas tossici è sbilanciata a favore del veicolo FCEV; infatti, nonostante il sensore FED 02 del veicolo ICE raggiunga un'istante prima la soglia limite rispetto al veicolo FCEV, la dose effettiva risulta molto più alta per quest'ultimo caso. I risultati ottenuti sono coerenti con quelli riportati in letteratura, poiché il veicolo ad idrogeno avendo una componentistica simile a quella del veicolo elettrico tende a produrre una maggiore quantità di sostanze tossiche, dovuta principalmente all'incendio delle batterie e della componentistica che permette di alimentare il motore elettrico.

4.3.2 Scenario 2

VISIBILITÀ

I risultati forniti dai dispositivi nello *Scenario 2*, come già discusso in precedenza, sono pressoché identici a quelli dello *Scenario 1*. Gli sprinkler peggiorano la visibilità nel loro raggio di azione e soprattutto a quote basse; i sensori essendo installati a 1.8 m non risentono particolarmente di questo peggioramento. Di seguito si riportano le curve.

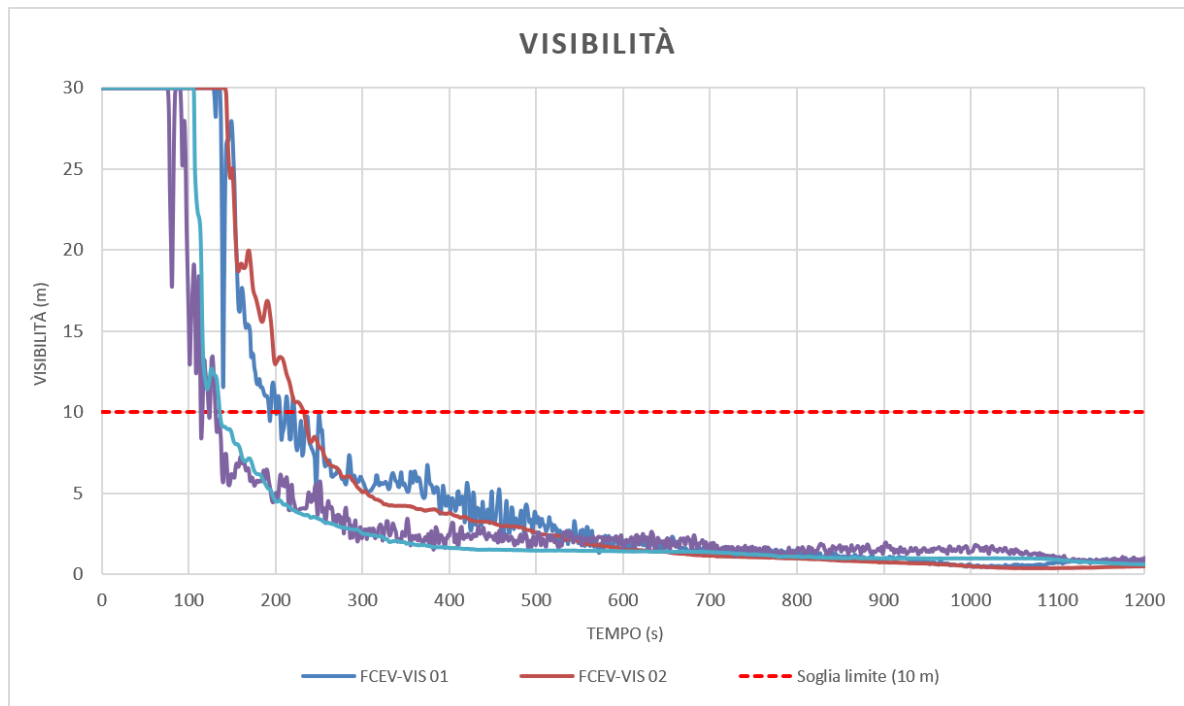


Figura 98: Modello di visibilità - Scenario 2 FCEV vs ICE

TEMPERATURA

Con l'intervento degli sprinkler le temperature si abbassano complessivamente, con il veicolo FCEV che raggiunge sempre valori più alti rispetto al veicolo ICE. I picchi, come si vede in *Figura 99*, vengono raggiunti a 1000 secondi con valori prossimi ai 200 °C nei pressi della porta; invece, vicino all'ingresso si ottiene una temperatura massima di 164 °C e all'uscita di 110 °C. Nei primi istanti dopo l'incendio i valori maggiori si registrano sempre per il veicolo ICE fino ad un tempo di circa 500-550 secondi, oltre il quale il veicolo ad idrogeno raggiunge temperature elevate dovute all'aumento dell'HRR.

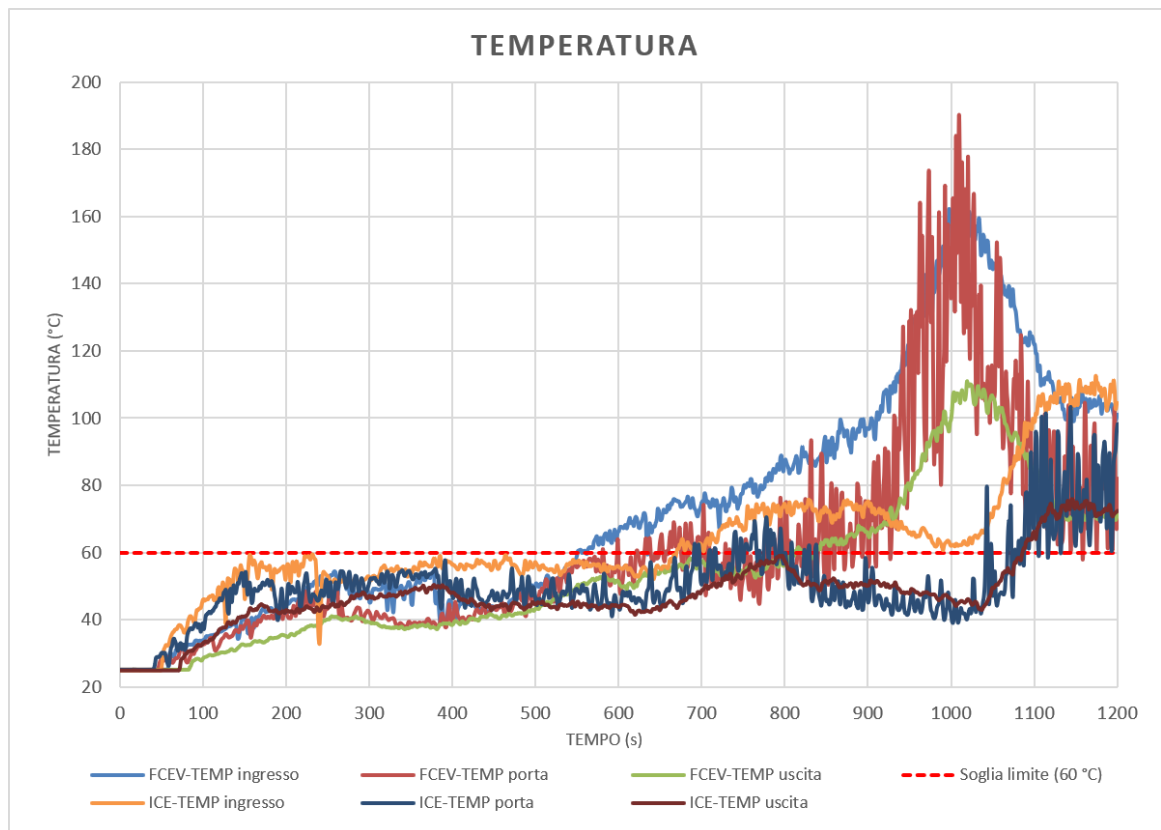


Figura 99: Modello del calore - Scenario 2 FCEV vs ICE

GAS TOSSICI

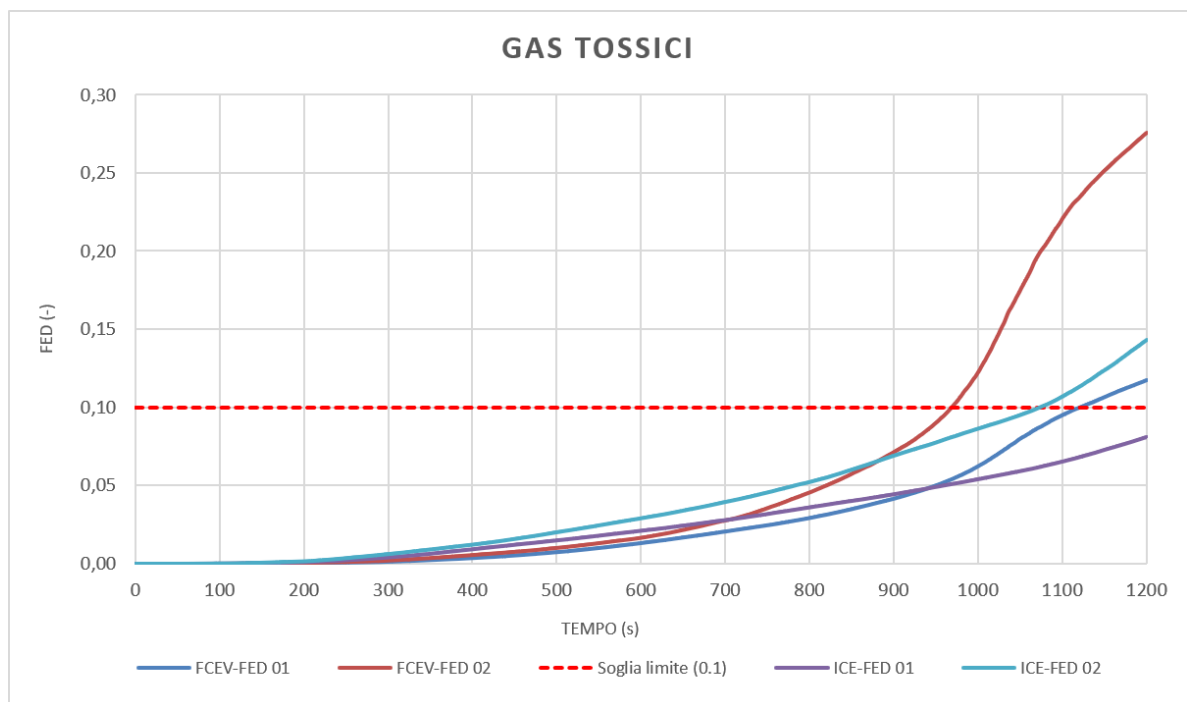


Figura 100: Modello dei gas tossici - Scenario 2 FCEV vs ICE

4.3.3 Scenario 3

VISIBILITÀ

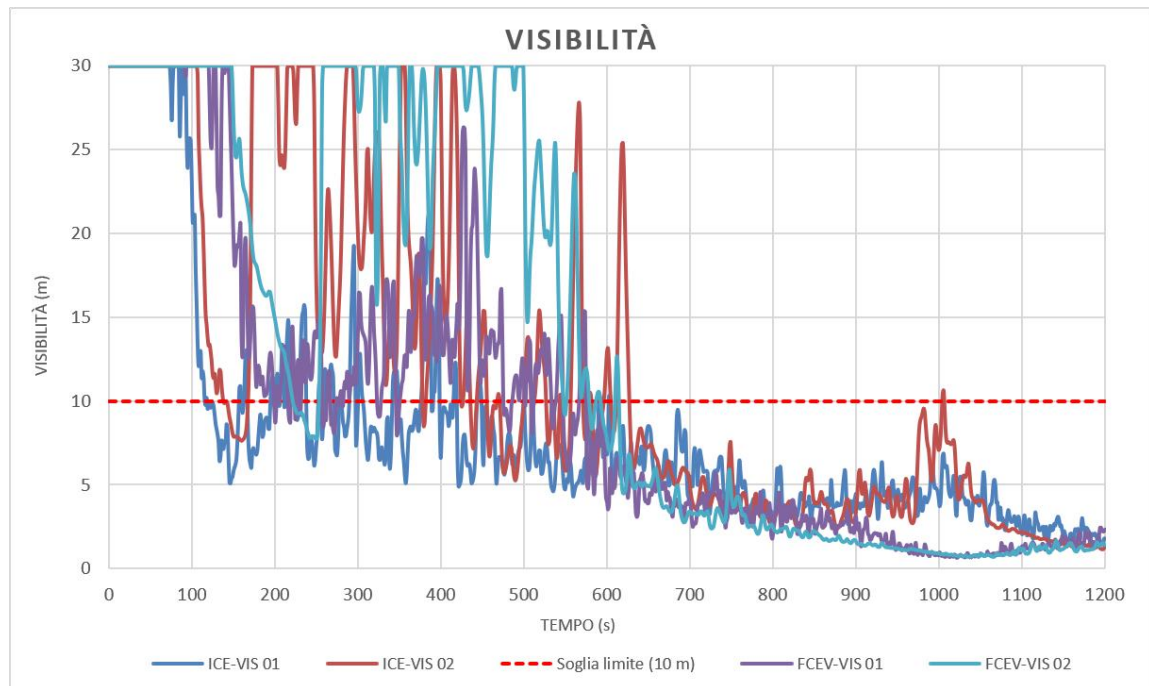


Figura 101: Modello di visibilità - Scenario 3 FCEV vs ICE

TEMPERATURA

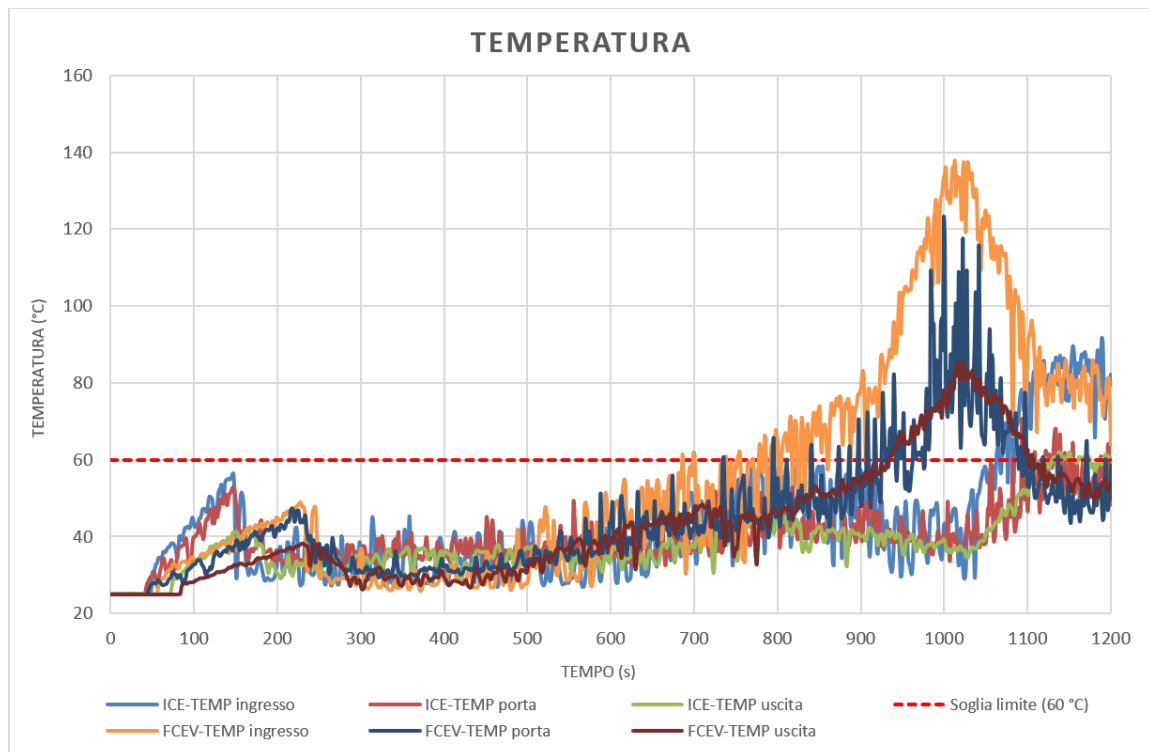


Figura 102: Modello del calore - Scenario 3 FCEV vs ICE

La presenza della ventilazione ha permesso una riduzione ulteriore della temperatura; infatti, il valore massimo registrato dal sensore all'ingresso nel caso di veicolo FCEV è di circa 40 °C inferiore rispetto allo *Scenario 2*. Così come i tempi necessari al superamento delle soglie prestazionali si allungano ulteriormente.

GAS TOSSICI

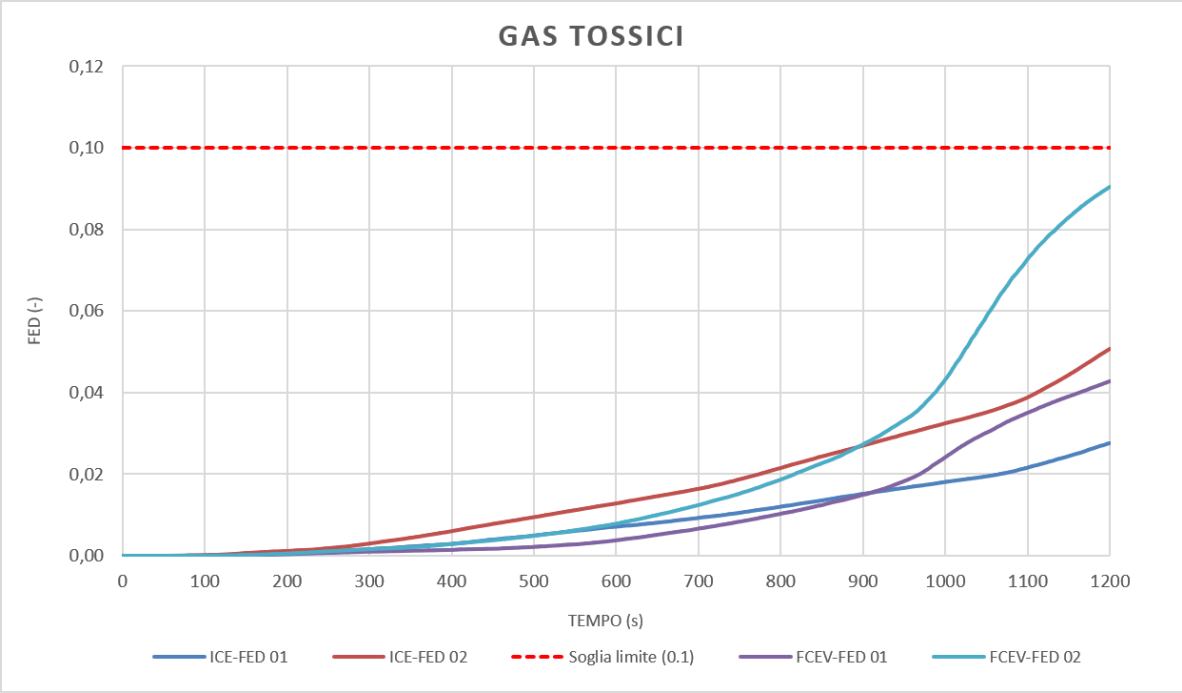


Figura 103: Modello dei gas tossici - Scenario 3 FCEV vs ICE

L'intervento dell'impianto di estrazione dei fumi permette un abbassamento dei valori al di sotto della soglia limite per entrambe le tipologie di veicolo analizzate, fornendo comunque misure più alte per il veicolo FCEV.

		FCEV			ICE		
Grandezze	Soglia limite	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Visibilità	10 m	223 s	224 s	574 s	127 s	135 s	420 s
Temperatura	60 °C	285 s	550 s	778 s	164 s	670 s	1063 s
Gas tossici	0,1	840 s	961 s	Mai	807 s	1050 s	Mai

Tabella 6: Tabella riassuntiva dei tempi di superamento delle soglie limite

I tempi considerati in *Tabella 6* fanno riferimento al primo istante dopo il quale l'andamento dei diversi parametri continua a decrescere.

5. Conclusioni

Dopo aver illustrato il ruolo dell'idrogeno nello scenario energetico mondiale e analizzato il suo sviluppo nei principali settori industriali quali energia e trasporto, si è cercato di comprendere al meglio quali possano essere le conseguenze dovute all'incendio di un veicolo alimentato da questo nuovo vettore energetico all'interno di uno spazio chiuso come un parcheggio.

Si intende precisare nuovamente che il modello utilizzato per lo studio non rappresenta un parcheggio esistente, così come l'impianto di ventilazione inserito non sarebbe sufficiente a garantire la visibilità per l'intera durata della simulazione. Infatti, lo scopo di questa trattazione è capire le conseguenze dovute all'incendio di un veicolo FCEV e confrontarle con un veicolo a combustione interna (ICE) in diversi scenari.

La prima cosa che si nota è la curva HRR, che nello studio analizzato ha fornito valori più elevati per il veicolo ICE nella prima parte di propagazione dell'incendio fino al raggiungimento di un valore massimo pari a 6.1 MW, coerente con la maggior parte dei valori presenti in letteratura che variano da 1.5 MW a 8 MW, a seconda della taglia del veicolo che si considera. Al contrario, il veicolo FCEV è caratterizzato da una curva di rilascio termico più graduale all'inizio per poi aumentare in modo repentino quando si verifica il *Jet Fire*, superando valori di 13 MW per un tempo limitato. L'andamento della potenza di incendio si rispecchia direttamente sulle grandezze prestazionali scelte, quali visibilità, temperatura e gas tossici. Infatti, nel caso del veicolo ICE a causa dell'elevata potenza negli istanti iniziali la quantità di materiale che brucia è maggiore, di conseguenza lo è anche la produzione di fumi e di gas tossici. Per il veicolo FCEV i valori misurati peggiorano verso la metà della simulazione; infatti, nel *Capitolo 4* si è notato come da quell'istante in avanti ci fosse un'intersezione con le curve del veicolo ICE, provocando temperature più alte ed una produzione di gas tossici più elevata. L'intervento degli impianti antincendio e di ventilazione fornisce un contributo non trascurabile in termini di riduzione di temperatura, gas tossici ed aumento della visibilità. Un aspetto importante, infatti, si nota nello *Scenario 3* in cui l'impianto di estrazione dei fumi, così dimensionato, non è in grado di garantire una visibilità adeguata per tempi lunghi nel caso del veicolo ICE, cosa che invece succede per il veicolo FCEV. Nella realtà questo risultato è confermato dal fatto che i veicoli a combustione interna durante un incendio bruciano sia materiale plastico, principale responsabile della fumosità, sia idrocarburi, aumentando così la quantità di fumi e polveri sottili; nel caso dei veicoli FCEV invece la fumosità è data solo dalle materie plastiche che si incendiano e non dal carburante, in quanto l'idrogeno ha l'acqua come unico prodotto della combustione.

Dai risultati ottenuti si può concludere che la criticità maggiore nel caso di veicoli ad idrogeno è l'elevata temperatura che si genera nella zona circostante all'auto a seguito del *Jet Fire*, problematica che però viene risolta in buona parte dalla presenza dell'impianto antincendio di tipo sprinkler. La

visibilità risulta migliore rispetto al veicolo ICE, per quanto già detto in precedenza; invece, la produzione di gas tossici è simile al veicolo ICE tranne nella fase di crescita rapida della potenza di incendio, in cui raggiunge valori molto elevati nel caso senza ventilazione.

In conclusione, si può dire che il veicolo FCEV producendo una quantità di fumi minori rispetto al veicolo tradizionale garantisce una maggiore sicurezza per l'esodo degli occupanti, ma a causa dell'elevata temperatura che raggiunge può creare seri danni termici e strutturali.

Considerato l'interesse futuro per questa tipologia di veicoli, soprattutto nel coprire lunghe distanze, è opportuno valutare tutti i rischi connessi alla tecnologia ed analizzare se gli impianti già presenti nei parcheggi sotterranei così come nelle gallerie autostradali siano sufficientemente dimensionati da poter garantire la sicurezza in caso di incidente. Potrebbe essere di particolare interesse applicare le curve ottenute nel corso della trattazione in un parcheggio sotterraneo già esistente e verificare il rispetto dei requisiti di sicurezza confrontando i tempi ASET (*Available Safe Escape Time*) e RSET (*Required Safe Escape Time*).

Bibliografia

- [1] «Global Energy Review,» IEA, Paris, 2025.
- [2] «Global Hydrogen Review,» IEA, Paris, 2025.
- [3] C. Valdinosi, «vehicleclue,» 1 Dicembre 2025. [Online]. Available: <https://www.vehicleclue.it/2025/12/01/veicoli-a-idrogeno-come-funzionano-vantaggi-e-sfide-della-mobilita-h2>. [Consultato il giorno 11 Aprile 2026].
- [4] P. Leone e M. Cavana, «Dimensionamento del sistema di raffreddamento di un dispenser da idrogeno,» 2025/2026.
- [5] P. Mocellin, «Prevenzione e gestione del rischio nella produzione e distribuzione di idrogeno,» CNI, Padova, 2023.
- [6] S. Park, B. Hashim, U. Zahid e J. Kim, «Global risk assessment of hydrogen refueling stations: Trends, challenges, and future directions,» *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1462-1479, 2025.
- [7] Z. Gholami, F. Gholami, J. Šimek, K. Svobodová e M. Vakili, «Hydrogen production for a decarbonized future: a review of production technologies,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, pp. 240-278, 2026.
- [8] F. Pruvost, S. Cloete, C. A. d. Pozo e A. Zaabout, «Blue, green, and turquoise pathways for minimizing hydrogen production costs from steam methane reforming with CO₂ capture,» *Energy Conversion and Management*, 2022.
- [9] W. M. S. M. Latif, N. M. Sabdullah, S. N. Aenun e N. A. Bosamah, «A review of global carbon capture and storage (CCS) and carbon capture, utilization, and storage (CCUS),» *Web of conferences*, 2024.
- [10] F. R. Malik, Hai-Bo Yuanc, J. C. Morana e N. Tippayawong, «Overview of hydrogen production technologies for fuel cell utilization,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, n. 43, 2023.
- [11] «Hydrogen Europe,» Ottobre 2022. [Online]. Available: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2022/10/ewp_kompakt_pyrolyse_english_web.pdf. [Consultato il giorno 14 Aprile 2026].
- [12] «Unica,» [Online]. Available: <https://sites.unica.it/fitogen/pirolisi-e-pirogassificazione-delle-biomasse/>. [Consultato il giorno 14 Aprile 2026].

- [13] O. Mašek, «Biochar in thermal and thermochemical biorefineries—production of biochar as a coproduct,» *Handbook of Biofuels Production*, pp. 655-671, 2016.
- [14] A. P. Pavlos Nikolaidis, «A comparative overview o fhydrogen production processes,» *Renewable and Suitable Energy Reviews*, pp. 597-611, 2017.
- [15] «European Hydrogen Observatory,» [Online]. Available: https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/cost-hydrogen-production?utm_source. [Consultato il giorno 15 Aprile 2026].
- [16] F. Siciliani, «InElettrico,» 17 Ottobre 2024. [Online]. Available: https://www.inelettrico.com/2024/10/17/ma-quanto-costa-fare-un-pieno-a-un-auto-a-idrogeno/?utm_source. [Consultato il giorno 15 Aprile 2026].
- [17] AIDIC, «Mobilità ad idrogeno,» 2022.
- [18] A. Nedelea, «InsideEvs,» 9 Giugno 2021. [Online]. Available: <https://insideevs.it/news/512979/electrovan-fuel-cell-idrogeno-1966/>. [Consultato il giorno 15 Aprile 2026].
- [19] G. Mancini, «NewsAuto,» 21 Maggio 2024. [Online]. Available: <https://www.newsauto.it/guide/auto-ad-idrogeno-come-funzionano-con-le-fuell-cell-fcev-2024-499819/>. [Consultato il giorno 16 aprile 2026].
- [20] «European Alternative Fuels Observatory,» [Online]. Available: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>. [Consultato il giorno 15 Aprile 2026].
- [21] F. Laudadio, «Modellizzazione e ottimizzazione di un serbatoio composito di idrogeno ad alta pressione per applicazioni aerospaziali,» Politecnico di Torino, 2022.
- [22] E. Galvagna, «EnergyCUE,» 1 Luglio 2020. [Online]. Available: <https://www.energycue.it/2020/07/01/idrogeno-stoccaggio-mondo-applicazioni-fisse-mobili/>. [Consultato il giorno 16 Aprile 2026].
- [23] T. Yoshida e K. Kojima, «Toyota MIRAI Fuel Cell Vehicle and Progress Toward a Future Hydrogen Society,» *the Electrochemical Society Interface*, vol. 24, n. 2, pp. 45-49, 2015.
- [24] [Online]. Available: <https://www.toyota.it/gamma/nuova-mirai/nuova-mirai-idrogeno-nella-sua-forma-migliore>. [Consultato il giorno 16 Aprile 2026].

- [25] «Hyundai,» 25 Luglio 2025. [Online]. Available: <https://www.hyundai.news/eu/articles/stories/hyundai-hydrogen-fuel-cell-cars.html>. [Consultato il giorno 16 Aprile 2026].
- [26] A. Singh, «Mobility Outlook,» 3 aprile 2025. [Online]. Available: <https://www.mobilityoutlook.com/news/hyundai-nexo-advances-hydrogen-mobility-with-new-generation-fuel-cell-system/#:~:text=All-new%20NEXO%20offers%20over%20700%20km%20range%2C%20stronger,electric%20vehicle%20%28FCEV%29%20in%20the%20spotlight%20once%20agai>. [Consultato il giorno 16 Aprile 2026].
- [27] «Fuel Cells Works,» 11 Novembre 2025. [Online]. Available: <https://fuelcellsworks.com/2025/11/11/fuel-cells/hyundai-motor-s-all-new-2026-nexo-sets-new-standards-in-hydrogen-technology-and-electrified-mobility>. [Consultato il giorno 16 Aprile 2026].
- [28] «Wikipedia,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Honda_Clarity. [Consultato il giorno 17 Aprile 2026].
- [29] K. KIMURA, Y. ATSUMI, T. KAWASAKI, K. SHIMIZU e T. OHMURA, «Development of new Fuel Cell vehicle Carity Fuel Cell,» 2016.
- [30] J. Andúja e F. Segura, «Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n. 9, pp. 2309-2322, 2009.
- [31] R. Taccani, «Impiego dell'idrogeno nelle celle a combustibile: termodinamica fondamentale ed efficienza degli impianti».
- [32] G. Sandstede, E. J. Cairns, V. S. Bagotsky e K. Wiesener, *Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, vol. 1, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2003, pp. 145-218.
- [33] M. C. F. G. Sonia Longo, M. Ferraro, V. Antonucci e G. Squadrito, «Chapter 6 - Life Cycle Assessment of Solid Oxide Fuel Cells and Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: A review,» *Hydrogen Economy*, pp. 139-169, 2017.
- [34] M. Romagnoli, «Introduzione alle celle a combustibile: i principi di funzionamento».
- [35] 7 Giugno 2025. [Online]. Available: <https://it.hfsinopower.com/direct-methanol-fuel-cell-dmfc-science>. [Consultato il giorno 18 Aprile 2026].

- [36] H. Hussein, S. Brennan e VladimirMolkov, «Hydrogen Jet Fire from a Thermally Activated Pressure Relief Device (TPRD) from Onboard storage in a Naturally Ventilated Covered Car Park,» *Hydrogen*, pp. 343-361, 2021.
- [37] 24 Ottobre 2024. [Online]. Available: <https://ctif.org/news/1600-hydrogen-cars-recalled-due-potential-fire-risk-faulty-pressure-valve>. [Consultato il giorno 11 Giugno 2026].
- [38] F. Yang, T. Wang, X. Deng, J. Dang, Z. Huang, S. Hu, Y. Li e M. Ouyang, «Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, n. 61, pp. 31467-31488, 2021.
- [39] «Mobility Plaza,» 26 Dicembre 2024. [Online]. Available: <https://www.mobilityplaza.org/news/39892>. [Consultato il giorno 11 Giugno 2026].
- [40] «Hydrogen Insight,» 19 Luglio 2023. [Online]. Available: <https://www.hydrogeninsight.com/transport/engulfed-in-flames-fuel-cell-bus-in-california-destroyed-after-explosion-during-refuelling/2-1-1488705>. [Consultato il giorno 11 Giugno 2026].
- [41] «Autoevolution,» 25 Settembre 2015. [Online]. Available: <https://www.autoevolution.com/news/toyota-mirai-has-first-crash-with-xbox-executive-behind-the-wheel-100371.html>. [Consultato il giorno 11 Giugno 2026].
- [42] F. Caruso, «OrdIngegneri,» [Online]. Available: https://ravenna.ordinegneri.it/wp-content/uploads/sites/98/2023/11/02-Impianti_Sprinkler.pdf. [Consultato il giorno 20 Aprile 2026].
- [43] «UNI-EN 12845,» 2015.
- [44] D. m. l. f. 1986, «Norme di sicurezza antincendi per la costruzione e l'esercizio di autorimesse e simili,» 1986.
- [45] M. Hajjawi, «Underground Car park Smoke Management system Design Validation Using CFD Simulation: Car Fire Products Yields Rates,» 2022.
- [46] HM government, «Approved Document F: Volume 2 applies to buildings other than dwellings,» 2021.
- [47] «FSeng,» [Online]. Available: <https://fseng-antincendio.it/capitolo-m-3-salvaguardia-della-vita-con-la-progettazione-prestazionale/>. [Consultato il giorno 20 Aprile 2026].
- [48] A. L. Malfa, «FSE: il metodo dell'ingegneria della sicurezza antincendio».

- [49] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot e G. Marlair, «Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle,» pp. 183-194, 2012.
- [50] S. Kang, K. M. Lee, M. Kwon, O. K. Lim e J. Y. Choi, «A Quantitative Analysis of the Fire Hazard Generated from Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles,» *International Journal of Fire Science and Engineering*, vol. 36, n. 2, pp. 26-39, 2022.
- [51] S. Kang, M. Kwon, J. Y. Choi e S. Choi, «Full-scale fire testing of battery electric vehicles,» *Applied Energy*, vol. 332, 2023.
- [52] A. Robbins e C. Wade, «Soot Yield Values for Modelling Purposes-Residential Occupancies,» 2007.
- [53] «Pieffe Auto,» 8 Novembre 2024. [Online]. Available: https://www.pieffeautogroup.it/auto-a-idrogeno/?utm_source. [Consultato il giorno 15 Aprile 2026].