

**Cláudio Maciel
Estima Coelho
da Rocha**

**Incêndios com Veículos Elétricos em Parques
de Estacionamento Subterrâneos**

**Cláudio Maciel
Estima Coelho
da Rocha**

**Incêndios com Veículos Elétricos em Parques
de Estacionamento Subterrâneos**

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Ciências da Informação e Administração para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão de Emergência, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Carla Pimentel Rodrigues, Professora Coordenadora do ISCIA.

Júri

Presidente	Professor Especialista João Santos, Professor Coordenador do ISCIA
Arguente	Eng. Especialista Pedro Carreira da EDP – eRedes
Orientadora	Professora Doutora Carla Pimentel Rodrigues, Professora Coordenadora do ISCIA

Agradecimentos

Quero expressar a minha mais profunda gratidão aos meus colegas de curso, tanto aos que me acompanham desde a licenciatura como aos que tive o privilégio de conhecer durante o mestrado. A vossa camaradagem, apoio e partilha de conhecimentos foram fundamentais ao longo deste percurso. Um agradecimento igualmente especial aos meus amigos pessoais, cuja amizade e incentivo me ajudaram a enfrentar os desafios mais exigentes deste caminho académico.

À minha orientadora científica, Professora Doutora Carla Rodrigues, deixo um reconhecimento sincero pela orientação, paciência e dedicação, que foram essenciais para alcançar este marco.

Aos meus pais, pelo homem que me tornaram, pelo amor incondicional, e pelo exemplo de valores, integridade e perseverança que me transmitiram. A todos os familiares que, com o seu apoio constante e orgulho nas minhas escolhas, me fortaleceram ao longo desta jornada, a minha eterna gratidão.

À minha esposa, Tânia, o meu pilar inabalável, o meu refúgio e a minha força nos momentos mais difíceis. A tua estabilidade, o teu apoio incondicional e o peso das responsabilidades familiares que assumiste permitiram-me focar nos estudos. Este trabalho não teria sido possível sem o teu sacrifício, compreensão e amor. És, sem dúvida, parte integrante desta conquista.

Finalmente, aos meus filhos, Tomás, Gustavo e Carolina: que este trabalho do pai seja para vocês um motivo de orgulho e um exemplo de que, com determinação e esforço, é possível alcançar os nossos sonhos. Tudo isto foi feito com vocês no pensamento e no coração.

resumo

Durante a última década, devido às políticas de transição energética que procuram responder à emergência do combate às alterações climáticas o veículo elétrico alterou significativamente a indústria automóvel a nível global, impulsionado pelo rápido desenvolvimento da tecnologia das baterias de iões de lítio.

A crescente importância da mobilidade elétrica, aliada à tendência para o estacionamento subterrâneo do tráfego nas áreas urbanas, torna a disponibilidade e a segurança das infraestruturas subterrâneas cada vez mais cruciais.

Os incêndios em veículos elétricos representam um desafio emergente no âmbito da segurança em infraestruturas subterrâneas, como parques de estacionamento subterrâneos.

Este trabalho explora a natureza destes incidentes, abordando as características únicas dos veículos elétricos e as implicações das suas baterias de iões de lítio em cenários de incêndio.

A análise conduzida revela a necessidade de uma revisão profunda das normativas de segurança, com a implementação de sistemas avançados de deteção e combate a incêndios. Além disso, destaca-se a relevância da formação especializada para equipas de emergência e a introdução de materiais de construção resilientes ao fogo.

Este estudo propõe medidas concretas para mitigar os riscos associados aos incêndios em veículos elétricos, contribuindo para a segurança das pessoas e das infraestruturas em ambientes urbanos.

Note-se que transição para uma mobilidade sustentável não deve comprometer a segurança das pessoas nem das infraestruturas. Este estudo constitui um contributo significativo para a compreensão dos desafios e das oportunidades associados aos VEs, apontando para um futuro mais seguro e adaptado à mobilidade elétrica em ambientes urbanos densamente ocupados

Palavras-chave

veículos elétricos, segurança contra incêndios, baterias de iões de lítio, parques de estacionamento subterrâneos, medidas de mitigação

Abstract

Over the past decade, due to energy transition policies aimed at addressing the urgency of combating climate change, electric vehicles have significantly transformed the global automotive industry, driven by the rapid advancement of lithium-ion battery technology.

The growing importance of electric mobility, combined with the trend towards underground parking in urban areas, makes the availability and safety of underground infrastructures increasingly crucial.

Fires in electric vehicles represent an emerging challenge in the safety of underground infrastructures, such as underground car parks.

This study explores the nature of these incidents, addressing the unique characteristics of electric vehicles and the implications of their lithium-ion batteries in fire scenarios.

The conducted analysis highlights the need for a thorough review of safety regulations, including the implementation of advanced fire detection and suppression systems. Additionally, it emphasises the importance of specialised training for emergency response teams and the introduction of fire-resilient construction materials.

This study proposes concrete measures to mitigate the risks associated with electric vehicle fires, contributing to the safety of both people and infrastructures in urban environments.

It should be noted that the transition to sustainable mobility must not compromise the safety of people or infrastructures. This study represents a significant contribution to understanding the challenges and opportunities associated with EVs, pointing towards a safer future adapted to electric mobility in densely populated urban environments.

Keywords

Electric vehicles, fire safety, lithium-ion batteries, underground parking facilities, mitigation measures.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Justificação do tema.....	2
1.3 Objetivos e questão de investigação.....	3
1.4 Metodologia	4
1.5 Estrutura do trabalho	5
2. Segurança Contra Incêndio em parques de estacionamento	7
2.1 Introdução	7
2.2 Avaliação de riscos.....	18
2.3 Fatores relevantes para os parques de estacionamento	19
3. Veículos Elétricos	22
3.1. Introdução	22
3.2. Mercado mundial de automóveis elétricos.....	25
3.3 Acontecimentos no mundo	27
3.4. Simulações de Incêndios em Parques de Estacionamento Subterrâneos	28
3.5. Avaliação da Intervenção dos Bombeiros em Incêndios	32
3.6. Perigos no manuseamento de veículos elétricos danificados	32
3.7. Libertação de Calor em Veículos Elétricos	33
3.8. Comparação com Veículos Convencionais	33
3.9. Incêndios causados por danos no PCVE/cabo de carregamento	35
3.10. Integração na rede	36
3.11 Aumento dos incêndios	38
4. Resultados e discussão.....	41
6. Trabalhos futuros	46
7. Bibliografia.....	47

Índice de Figuras

Figura 1 - Considerações gerais para um parque de estacionamento subterrâneo com pontos de carregamento de VE (Department for Transport, 2024)	20
Figura 2 - Hierarquia de medidas de mitigação (Department for Transport, n.d.)	21
Figura 3 - Venda mensal de veículos plug-in [2021-2023] (EV Volumes, 2024)	25
Figura 4 - Veículos 100% elétricos e híbridos plug-in (EV Volumes, 2024)	26
Figura 5 - Vendas de veículos elétricos e híbridos plug-in por região (EV Volumes, 2024)	26
Figura 6 - Viatura elétrica arde em estacionamento subterrâneo	27
Figura 7 - Viatura elétrica arde em garagem particular	27
Figura 8 - Células típicas de baterias para VE: a) em bolsa; b) prismática; c) cilíndrica; d) comparação do tamanho e) conjunto de baterias de 60 kW f) bateria da Tesla, com células cilíndricas; g) Bateria do Nissan LEAF (Sun et al., 2020)	31
Figura 9 - TLC (HRR) para testes de incêndio veículos de combustível tradicional e veículos elétricos (Gov.UK, 2024)	32

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Tabela Resumo de recursos.....	7
Tabela 2 - Propostas e impacto esperado.....	44

Lista de Siglas, abreviaturas e acrónimos

VE – veículos elétricos

PCVE: Pontos de carregamento de veículos eletricos - Electric Vehicle Charging Points

SGB: Sistema de Gestão de baterias - Battery Management System.

HRR: Heat Release Rate (Taxa de Libertação de Calor)

PHRR: Peak Heat Release Rate (Taxa Máxima de Libertação de Calor)

SCIE: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios

MW: Megawatt (Unidade de Potência)

HF: Ácido Fluorídrico

CO: Monóxido de Carbono

DFC: Dinâmica de Fluidos Computacional - Computational Fluid Dynamics

Li-ion: Lítio-íon

SOx: Óxidos de Enxofre

NOx: Óxidos de Azoto

HCl: Ácido Clorídrico

SDF: Simulador de Dinâmica do Fogo - Fire Dynamics Simulator

COV: Compostos Orgânicos Voláteis (Volatile Organic Compounds)

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Os veículos elétricos (VE) são fundamentais para a eletrificação da sociedade e a sustentabilidade da mobilidade, numa primeira fase para mobilidade urbana. Os VE desempenham um papel central na transição para fontes de energia renováveis, mas é necessário garantir a segurança das suas infraestruturas de carregamento.

Assim, a eletrificação dos transportes é uma medida importante para mitigar as alterações climáticas, mas as infraestruturas devem ser preparadas para lidar com os riscos, como incêndios, associados a estas tecnologias (CBE, 1994).

Os veículos elétricos (VE) têm vindo a transformar significativamente o setor automóvel nas últimas décadas, principalmente devido ao desenvolvimento das baterias de íões de lítio, que proporcionam maior autonomia e eficiência energética.

No entanto, essa inovação tecnológica traz consigo novos desafios, particularmente em relação à segurança, que se tornam mais evidentes quando, por exemplo, se analisam os incêndios que podem ocorrer em parques de estacionamento subterrâneos.

Os veículos elétricos representam um risco significativo de incêndio em espaços fechados, como parques de estacionamento subterrâneos.

Por sua vez, os parques de estacionamento subterrâneos enfrentam desafios adicionais devido ao espaço confinado, que dificulta o acesso das equipas de emergência e a circulação do ar.

A ventilação nestes espaços pode ser insuficiente para dissipar rapidamente o calor e os gases tóxicos resultantes de um incêndio, aumentando o risco para as pessoas e para as estruturas do edifício.

À medida que a adoção de VE aumenta, torna-se crucial compreender e mitigar estes riscos de incêndio em espaços fechados.

1.2 Justificação do tema

Durante a última década, o veículo elétrico alterou significativamente a indústria automóvel a nível global, impulsionado pelo rápido desenvolvimento da tecnologia das baterias de iões de lítio.

A crescente importância da mobilidade elétrica, aliada à tendência para a deslocação subterrânea do tráfego nas áreas urbanas, torna a disponibilidade e a segurança das infraestruturas subterrâneas cada vez mais cruciais.

Prevê-se que uma grande parte do tráfego urbano do futuro será eletrificado e ocorrerá no subsolo, seja através de túneis ou em parques de estacionamento subterrâneos com pontos de carregamento.

No entanto, o risco de incêndio e os perigos associados a este tipo de bateria, caracterizada pela sua alta densidade energética, tornaram-se uma grande preocupação no que diz respeito à segurança dos veículos elétricos.

A ocorrência de incêndios em locais confinados, como os estacionamentos subterrâneos, pode resultar em danos significativos à infraestrutura e riscos elevados para a segurança de pessoas e bens.

Enquanto não forem totalmente conhecidos os efeitos dos incêndios em veículos elétricos nestas infraestruturas, estes continuarão a representar um risco significativo e difícil de prever para as entidades responsáveis.

Este trabalho pretende caracterizar o tipo de riscos de incêndio associados aos veículos elétricos e propostas mitigadoras para garantia da segurança de pessoas e bens.

1.3 Objetivos e questão de investigação

O objetivo desta dissertação é compreender se os equipamentos e sistemas de segurança existentes nos parques de estacionamento são adequados para lidar com os incêndios em veículos elétricos e apresentar medidas que promovam a resposta dos sistemas de segurança contra incêndio.

A questão central de investigação desta dissertação é a seguinte: *serão os equipamentos e sistemas de segurança existentes nos parques de estacionamento adequados para lidar com os incêndios em veículos elétricos?*

Para além da questão central, destacam-se outras questões igualmente relevantes:

- Como diferem os incêndios de veículos elétricos em infraestruturas subterrâneas em comparação com os incêndios de veículos convencionais?
- São necessárias medidas especiais para lidar com os componentes técnicos e com a água utilizada no combate a incêndios em veículos elétricos?
- Quais são os impactos a longo prazo no funcionamento e segurança das infraestruturas subterrâneas após um incêndio em veículos elétricos?

1.4 Metodologia

A metodologia científica aplicada neste trabalho baseia-se num conjunto de procedimentos objetivos que visam produzir novos conhecimentos e integrá-los aos já existentes (Fontelles et al., 2009). Este trabalho descreve as estratégias adotadas para conduzir a investigação, de modo a permitir a sua replicabilidade, garantir a transparência e a qualidade da pesquisa, e possibilitar a avaliação crítica por futuros investigadores.

Segundo o Council of Biology Editors (CBE, 1994) o texto científico deve apresentar informações suficientes para que os pares possam observar o estudo, repetir experiências (se houver) e avaliar os processos intelectuais envolvidos.

Assim, a investigação realizada foi categorizada como pesquisa exploratória, uma vez que o seu objetivo foi aprofundar o estudo do tema e analisá-lo sob diferentes perspetivas, conforme defendido por Prodanov e Freitas (2013).

Foram consultados os principais livros técnicos e artigos científicos, bem como legislação e normas relacionadas com a temática abordada pese embora a falta de bibliografia associada a este assunto, o que dificultou a elaboração do mesmo.

Para a recolha de dados, foi amplamente utilizada a pesquisa bibliográfica, que consistiu em fontes impressas e digitais, como livros, artigos e teses. Estes textos foram utilizados como referência teórica para explorar as contribuições de outros autores e avançar na compreensão do tema.

O método dedutivo foi aplicado, partindo de uma análise geral para, em seguida, afunilar para questões específicas. Através deste método, procurou-se identificar padrões e melhores práticas, com o intuito de chegar a conclusões formais, baseadas em lógica e evidências.

A pesquisa foi aplicada, focada em resolver problemas práticos, como a prevenção e o combate a incêndios em veículos elétricos dentro de parques de estacionamento subterrâneos.

A recolha de informações foi realizada em várias fases. Uma análise exaustiva de publicações científicas permitiu a identificação de requisitos que foram posteriormente agrupados em medidas ou estratégias específicas. Estes dados ajudaram a avaliar o nível de preparação das infraestruturas de estacionamento para enfrentar possíveis incidentes.

A investigação focou-se na análise de incêndios em veículos elétricos com baterias de lítio em parques de estacionamento subterrâneos.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos consecutivos, que servem de enquadramento para o desenvolvimento do projeto.

O Capítulo 1 aborda a Introdução, onde se define o contexto e a problemática em estudo, bem como os objetivos e metodologia.

O Capítulo 2 apresenta as limitações da segurança contra incêndios, os riscos e os fatores relevantes nos parques de estacionamento.

O Capítulo 3 apresenta o estado da arte, referenciando acontecimentos na Europa e no Mundo relacionados com incêndios em veículos elétricos, e explora os fundamentos teóricos relativos às emissões e riscos associados a incêndios em baterias e infraestruturas subterrâneas.

O Capítulo 4 reflete sobre os resultados no contexto da crescente mobilidade elétrica em infraestruturas subterrâneas.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais, abordando as lacunas identificadas e a necessidade de investigação futura.

O Capítulo 6 apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2. Segurança Contra Incêndio em parques de estacionamento

2.1 Introdução

É imperativo ajudar os proprietários de parques de estacionamento, engenheiros e técnicos responsáveis pelas instalações, bem como arquitetos e mesmo os avaliadores de risco de incêndio, quais as disposições de segurança contra incêndios existentes nos parques de estacionamento e como estas devem funcionar em caso de incêndio.

É importante estabelecer uma estratégia de segurança contra incêndios no parque de estacionamento subterrâneos que deverá ir desde o projeto, conceção, construção, operação e manutenção.

De acordo com a legislação nacional em vigor, foi elaborada uma Tabela resumo relativa, que descreve os recursos existentes no âmbito da segurança contra incêndios em parques de estacionamento cobertos:

Tabela 1 – Tabela Resumo de recursos

Segurança contra incêndios	Recursos comuns de segurança contra incêndio
Meios de fuga e alerta	Vias de Evacuação: nos parques cobertos, são necessárias vias de evacuação com largura mínima variando conforme a categoria de risco, com 1,2m para a primeira categoria e 1,4m para categorias superiores (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107). Caminhos Horizontais de Evacuação: estes devem ser sinalizados e ter um passeio adjacente às rampas, com saída permanente para o exterior. As portas nestes acessos abrem no sentido da evacuação e possuem fecho acionável pelo interior e por chave no exterior (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).

	<p>Vias Verticais de Evacuação: em parques automáticos, é permitida uma única via vertical de evacuação por compartimento corta-fogo, desde que os impasses não ultrapassem 40 metros (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Meios de Alerta</p> <p>Sinalização: toda sinalização de evacuação e localização dos meios de intervenção deve ser claramente visível, com placas de emergência feitas de material fotoluminescente (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107)</p> <p>Iluminação de Emergência: nos parques cobertos, a iluminação de emergência deve ser operada manualmente a partir do posto de segurança ou nas entradas e saídas de veículos. Dispositivos de iluminação são distribuídos de forma a garantir visibilidade adequada em caso de emergência (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).</p> <p>Controlo de Fumo: nos parques cobertos, um sistema de controlo de fumo pode ser acionado manualmente a</p>
--	--

	<p>partir do posto de segurança, garantindo uma evacuação mais segura ao reduzir a densidade de fumo (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p>
<p>Propagação interna do fogo (forro e estrutura)</p>	<p>Compartimentação Corta-Fogo</p> <p>Portas e compartimentos corta-fogo são obrigatórios para limitar a propagação do fogo. Nos parques de estacionamento cobertos, as estruturas que servem de ligação entre diferentes pisos ou compartimentos devem ter portas com resistência mínima ao fogo, como E 30 C (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Os vãos em paredes de compartimentação devem estar equipados com portões ou painéis que fecham automaticamente e com classe de reação ao fogo A1, garantindo que a propagação do incêndio seja limitada a compartimentos específicos (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Materiais de Construção e Revestimento</p> <p>A estrutura e o forro dos parques devem</p>

	<p>ser compostos de materiais com alta resistência ao fogo, como materiais de classe A2, nos elementos visíveis, especialmente em condutas de água e ductos que não estão permanentemente cheios. Esses materiais devem minimizar a propagação do fogo ao longo das superfícies internas (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Nos parques de maior dimensão, a utilização de ductos com materiais de classe REI 120 é exigida para proteger condutas de líquidos inflamáveis, ajudando a impedir que o fogo se propague internamente pela estrutura do parque (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).</p>
<p>Propagação do fogo externamente</p>	<p>Isolamento e Compartimentação Corta Fogo:</p> <p>As paredes de compartimentação em parques de estacionamento devem incluir portões de correr, painéis ou telas com uma classe de reação ao fogo de A1. Estes dispositivos devem ser de abertura manual e fecho automático, ativados pelo sistema de deteção de incêndios (0905009127).</p> <p>Em parques automáticos, as ligações entre pisos e escadas protegidas devem ser feitas através de portas com resistência ao fogo E 30 C, garantindo</p>

	<p>que a propagação do fogo entre os diferentes compartimentos seja limitada (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Proteção das Conduitas de Líquidos Inflamáveis:</p> <p>As conduitas que transportam líquidos inflamáveis precisam ser protegidas com materiais de classe de resistência ao fogo não inferior a EI 120 e construídas em materiais de classe A1. Estas conduitas são preenchidas com materiais que retardam a propagação do fogo (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250). (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Desenfumagem e Controlo de Fumo:</p> <p>Nos parques cobertos, o sistema de controlo de fumo deve ser ativado com um caudal específico, de 600 m³/hora por veículo, no compartimento corta-fogo afetado pelo incêndio. Este sistema é essencial para evitar que o fumo e o calor se propaguem e comprometam as áreas adjacentes (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança</p>
--	---

	<p>Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).</p> <p>Em parques com ventilação natural, a regulamentação exige que haja aberturas de ventilação nas fachadas opostas, garantindo um fluxo de ar adequado e reduzindo o risco de propagação de fumo (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p>
<p>Sistema de ventilação de fumos</p>	<p>Desenfumagem Passiva</p> <p>Em parques que dispõem de ventilação natural, como os parques cobertos abertos ou semienterrados, considera-se desenfumagem passiva se houver aberturas para admissão de ar e saída de fumo. Estas devem ter uma área mínima de 0,06 m² por lugar de estacionamento para garantir o varrimento eficaz do ar (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>2. Desenfumagem Ativa</p> <p>Nos parques cobertos fechados, deve ser instalado um sistema de desenfumagem ativa que extrai fumo com um caudal de 600 m³/hora por veículo no compartimento afetado pelo incêndio (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da</p>

	<p>República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Além disso, a insuflação é desativada no compartimento sinistrado e ativada nos compartimentos adjacentes, com caudais de 60% do caudal de extração do compartimento afetado (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Distribuição das Bocas de Extração</p> <p>As bocas de extração de fumo devem estar distribuídas à razão de uma por cada 320 m² de área e proporcionar um caudal de 1 m³/s por cada 100 m², com um mínimo de 1,5 m³/s para assegurar a eficiência do sistema de desenfumagem (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Controlo Manual e Automático</p> <p>O sistema de controlo de fumo deve permitir comando manual, localizado no posto de segurança ou junto às entradas e saídas de veículos. Este controlo manual é reservado ao uso dos bombeiros em caso de emergência (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).</p>
--	---

<p style="text-align: center;">Combate a incêndios acesso e instalações</p>	<p>Acesso de Combate a Incêndios</p> <p>Parques com altura superior a 18 metros: O acesso é realizado através de um sistema de combate a incêndios composto por uma escada protegida, um hall de entrada ventilado e equipado com conduta de incêndio e elevador de combate a incêndios (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).</p> <p>Parques subterrâneos a mais de 10 metros abaixo do nível de acesso: é necessária a instalação de uma caixa de combate a incêndios que inclua uma escada protegida, hall ventilado com rede de incêndio e um elevador de combate a incêndios (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).</p> <p>Parques subterrâneos com menos de 10 metros de profundidade: quando existem dois ou mais pisos subterrâneos, cada um com área superior a 900 m², devem ser instalados poços de combate a incêndios, dispensando o elevador de combate a incêndios (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).</p>
--	--

	<p>Instalações para Combate a Incêndios</p> <p>Extintores: nos parques de estacionamento, devem ser disponibilizados extintores móveis de CO₂ ou pó ABC, localizados junto ao acesso a cada escada existente. Nos parques exteriores, o posto de controlo deve ter pelo menos um extintor portátil de eficácia mínima (República Portuguesa, 2008) (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1.ª série, N.º 250).</p> <p>Sistema de Extinção Automática: em parques automáticos, é obrigatória a existência de sistemas de extinção automática de incêndios por água em todos os pisos, conforme especificado nas condições técnicas do regulamento (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p> <p>Cortinas de Água: Elementos de fecho de vãos que não possuam uma classe mínima de resistência ao fogo devem ser complementados por uma cortina de água para evitar a propagação do incêndio (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho: Alteração ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Diário da República, 1.ª série, N.º 107).</p>
--	--

A Tabela apresenta de forma detalhada as medidas de segurança contra incêndios em parques de estacionamento cobertos, destacando os recursos mais relevantes para a mitigação de riscos e a garantia da segurança de ocupantes e estruturas.

No que concerne às vias de evacuação, é enfatizada a necessidade de caminhos horizontais e verticais devidamente dimensionados e sinalizados, sendo as portas corta-fogo concebidas para abrir no sentido da evacuação.

Adicionalmente, sublinha-se a importância da iluminação de emergência e da sinalização fotoluminescente como elementos cruciais para assegurar uma evacuação segura e eficiente.

Nos parques com sistemas de ventilação mecânica, torna-se essencial o recurso a dispositivos de controlo de fumos, com vista à redução da densidade de fumos e à melhoria das condições de visibilidade durante os procedimentos de evacuação.

Quanto à propagação interna do fogo, destaca-se o papel da compartimentação corta-fogo, garantida através de portas resistentes ao fogo e materiais de construção com classificação A1 ou A2. Em parques de maiores dimensões, recomenda-se o uso de ductos com classe de resistência REI 120 para proteger condutas de líquidos inflamáveis e limitar a propagação de incêndios. Externamente, são salientados os sistemas de proteção, como portões automáticos e cortinas de água, que contribuem para impedir a propagação do fogo para áreas adjacentes.

Os sistemas de desenfumagem, quer passivos, quer ativos, assumem um papel essencial na gestão de fumos em caso de incêndio. Enquanto os parques abertos beneficiam de ventilação natural, os parques fechados exigem sistemas ativos de extração, dimensionados em função da quantidade de veículos afetados, garantindo a eficiência do controlo de fumos.

Estes sistemas, por sua vez, devem ser projetados para permitir a operação manual em situações de emergência.

No domínio do combate a incêndios, destaca-se a necessidade de assegurar acessos adequados às equipas de emergência, sobretudo em parques com alturas superiores a 18 metros ou estruturas subterrâneas de maior profundidade. Sublinha-se ainda a obrigatoriedade de instalar extintores móveis, sistemas automáticos de extinção por água e cortinas de água em áreas críticas, sendo estas medidas distribuídas estrategicamente para maximizar a eficácia da resposta.

Torna-se imperativa, que a implementação de sistemas de segurança rigorosos, aliados a um planeamento cuidadoso das infraestruturas, é indispensável para a prevenção e controlo de incêndios em parques de estacionamento. O cumprimento destas diretrizes contribui significativamente para a proteção de vidas humanas, bens materiais e do ambiente.

Para determinar quais as medidas de mitigação que devem ser consideradas ao introduzir VE/PCVE num parque de estacionamento coberto, os objetivos e restrições de segurança contra incêndios devem ser estabelecidos primeiro.

Mantendo como objetivos principais a garantia da segurança das pessoas, minimizando os riscos para os ocupantes e pessoal de emergência em caso de

incêndio; a proteção da estrutura física do parque com vista à redução dos danos na estrutura do parque de estacionamento e na propriedade envolvente; o facilitar o combate ao fogo, assegurando que os bombeiros tenham os recursos necessários para atuar rapidamente e com segurança bem como minimizar o impacto ambiental, controlando e evitando a contaminação por águas residuais usadas no combate ao incêndio.

Restrições e considerações específicas:

1. Parques já existentes:

- Avaliação de riscos: é necessário realizar uma avaliação de risco detalhada para identificar se a introdução de veículos elétricos (VE) ou pontos de carregamento de viaturas elétricos (PCVE) cria novos perigos ou aumenta os riscos existentes.
- Adaptações necessárias: podem ser exigidas alterações, como instalação de sistemas de ventilação mecânica, sistemas automáticos de supressão de incêndios e aumento da resistência estrutural.
- Distância entre veículos: é recomendado considerar a distância mínima entre veículos para evitar a propagação rápida de fogo.

2. Parques novos:

- Planeamento futuro: A construção deve já considerar a futura introdução de 100% de PCVE.
- Mitigações adicionais: Uso de câmaras de monitorização térmica, sprinklers automáticos e sistemas de deteção precoce de incêndios para melhor resposta.
- Design resiliente: incluir elementos como zonas de contenção de água de combate ao incêndio e materiais resistentes ao fogo.

Medidas de mitigação comuns (aplicáveis a ambos os casos):

- Sistemas de deteção precoce e alarmes automáticos.
- Supressão de incêndios com sistemas de aspersão baseados em água.
- Implementação de estratégias de evacuação eficazes, com rotas claramente sinalizadas.
- Separação estrutural adequada para evitar a propagação do fogo para edifícios adjacentes com a segmentação de mais zonas com portas corta-fogo.

- Formação de pessoal para lidar com situações específicas de incêndios em EV, que podem diferir dos veículos tradicionais.

Estas medidas e objetivos são especialmente importantes para abordar os desafios específicos associados aos incêndios em veículos elétricos, como a possibilidade de reignição e os diferentes padrões de crescimento do fogo.

2.2 Avaliação de riscos

Para estabelecer medidas de mitigação eficazes em parques de estacionamento, é essencial realizar uma avaliação de riscos abrangente e estruturada, com o objetivo de identificar e tratar os perigos associados a incêndios, sobretudo em contextos onde estejam presentes veículos elétricos (VE) e pontos de carregamento (PCVE).

O primeiro passo consiste em definir claramente os objetivos de segurança. Estes devem incluir a proteção de pessoas, garantindo a segurança de ocupantes, trabalhadores e equipas de socorro; a minimização dos danos à estrutura do parque, veículos e bens adjacentes; a redução do impacto ambiental, particularmente no que diz respeito a águas residuais contaminadas por incêndios; e a salvaguarda da continuidade operacional, para evitar interrupções prolongadas no uso do espaço.

Seguidamente, é necessário identificar os potenciais perigos. Entre estes, destacam-se as possíveis fontes de ignição, como falhas nas baterias dos VE, nomeadamente no sistema de gestão de baterias (SGB), e problemas elétricos em pontos de carregamento ou cabos.

Outros riscos incluem a propagação do fogo devido à proximidade de veículos e materiais inflamáveis, à ausência de barreiras adequadas ou à separação insuficiente entre os automóveis. Além disso, deve considerar-se a complexidade do combate ao fogo em veículos elétricos, nomeadamente a possibilidade de reignição das baterias por *thermal runaway*, a emissão de vapores tóxicos e inflamáveis e as dificuldades de acesso para os bombeiros em áreas confinadas.

A análise do contexto é também essencial e deve incluir a avaliação das condições do parque, como o tipo de estrutura (subterrânea), a ventilação disponível (natural ou mecânica) e os materiais de construção utilizados, nomeadamente a sua resistência ao fogo. Deve ainda avaliar-se a proporção de VE em relação aos veículos tradicionais, bem como o estado e a idade das baterias dos veículos elétricos.

As instalações de segurança existentes, como sistemas de deteção de incêndios e equipamentos de supressão, devem igualmente ser analisadas para determinar a sua eficácia.

Posteriormente, procede-se à classificação dos riscos identificados, considerando a probabilidade de ocorrência de cada evento e a gravidade das suas consequências.

Esta análise pode ser feita através da criação de matrizes de risco, que permitem estabelecer prioridades e definir quais os perigos mais críticos.

Com base nesta avaliação, devem ser selecionadas medidas de mitigação adequadas, aplicando o modelo ERIC. Estas medidas podem incluir a eliminação de riscos sempre que possível, como a substituição de pontos de carregamento inseguros, e a redução da probabilidade ou do impacto dos incidentes, por exemplo, através da instalação de sistemas de monitorização térmica para deteção precoce de *thermal runaway* e de sprinklers automáticos para conter a propagação do fogo.

Outras estratégias incluem a implementação de barreiras físicas ou o aumento da separação entre veículos, bem como a criação de sistemas de contenção para resíduos de água usados no combate a incêndios. Por fim, deve garantir-se que as consequências de um incidente sejam minimizadas, através de sistemas de alarme eficazes para evacuação rápida e da formação das equipas responsáveis pela gestão do parque e pela resposta a emergências.

É fundamental que esta avaliação de riscos seja monitorizada e revista periodicamente, de forma a refletir novas informações, alterações no uso do parque ou avanços tecnológicos.

Recomenda-se também a realização de auditorias externas para assegurar a conformidade com as normas locais e internacionais. Este processo permite identificar vulnerabilidades e implementar estratégias que aumentem a segurança dos ocupantes, preservem a integridade da propriedade e protejam o meio ambiente.

2.3 Fatores relevantes para os parques de estacionamento

Existem vários fatores a considerar ao realizar a avaliação do risco de incêndio, que podem influenciar e impactar os resultados.

Uma série de características de segurança contra incêndios em parques de estacionamento existentes podem ter sido baseadas em dados históricos de incêndios para ICEVs ou desenvolvidas através de análises de segurança contra incêndios personalizadas, utilizando pressupostos de que os incêndios não se espalham para além de um ou de um pequeno número de carros. Estes podem não ser mais apropriados para carros modernos maiores (e, conseqüentemente, maiores tamanhos de incêndio) em geral.

Esses recursos são, por exemplo:

1. Tipologia do parque: deve-se considerar se o parque é subterrâneo, pois isso influencia diretamente os sistemas de ventilação e segurança necessários.
2. Estrutura e compartimentação: A compartimentação corta-fogo, os materiais de construção, e a resistência ao fogo das estruturas são fundamentais para

evitar a propagação de incêndios. Portas e paredes devem ter uma classe mínima de resistência ao fogo compatível com o regulamento.

3. Ventilação e controlo de fumo: A ventilação, seja natural ou mecânica, deve garantir um adequado varrimento do ar e controle de fumo em caso de incêndio, considerando as dimensões e características do espaço.
4. Capacidade e ocupação: A densidade de ocupação influencia os requisitos de evacuação. Deve ser garantida uma distância adequada entre veículos e vias de evacuação acessíveis.
5. Instalações técnicas e medidas de supressão: Equipamentos como sprinklers, extintores e sistemas de deteção precoce devem estar instalados em locais estratégicos para permitir a intervenção rápida.
6. Evacuação e acessibilidade: as vias de evacuação devem ser dimensionadas para garantir a evacuação segura dos ocupantes, com sinalização adequada e portas que abram no sentido da saída.
7. Compatibilidade com veículos elétricos: A introdução de veículos elétricos e de infraestruturas de carregamento deve ser analisada, pois estes apresentam riscos específicos como falhas em baterias e incêndios por *thermal runaway*.

A figura 1 apresenta um exemplo de um parque de estacionamento subterrâneo com postos de carregamento de VE.

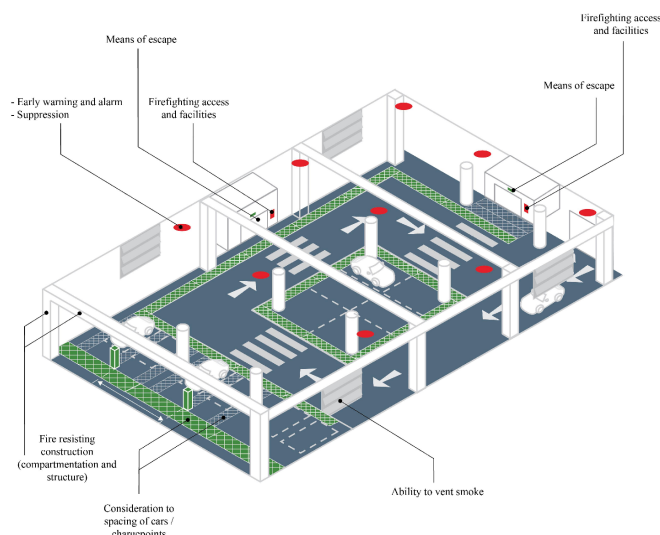


Figura 1 - Considerações gerais para um parque de estacionamento subterrâneo com pontos de carregamento de VE (Department for Transport, 2024)

É da responsabilidade daqueles que necessitam de cumprir na realização da avaliação (bem como o cumprimento de outra legislação), demonstrando como irão cumprir, fornecendo uma proposta de projeto ou uma avaliação do risco, apoiada por provas apropriadas de uma pessoa competente e certificada.

Para tal, pode utilizar-se a hierarquia eliminar, reduzir, isolar, controlar ou “ERIC” para categorizar os métodos de mitigação (Fig. 2).

Eliminar – Remover completamente o perigo e evitar que ele ocorra, identificando perigos com base no parque de estacionamento específico em questão, incluindo as pessoas presentes no parque, e pessoas noutros edifícios nas suas proximidades. Isso deve ser adaptado para incluir considerações de proteção de propriedade/continuidade de negócio

Reduzir – Diminuir a probabilidade de ocorrência do perigo.

Como os VE e os PCVE são tecnologias novas que estão sujeitas a extensa investigação a nível mundial, a fase de revisão é muito importante à medida que novas evidências e orientações relativas à segurança contra incêndios dos VE e dos EVCP se tornam disponíveis.

Isolar - implementando medidas de forma a reduzir e a limitar o efeito do perigo.

Controlar - adotando medidas de gestão do perigo quando se verificar a incapacidade de aplicabilidade das anteriores.

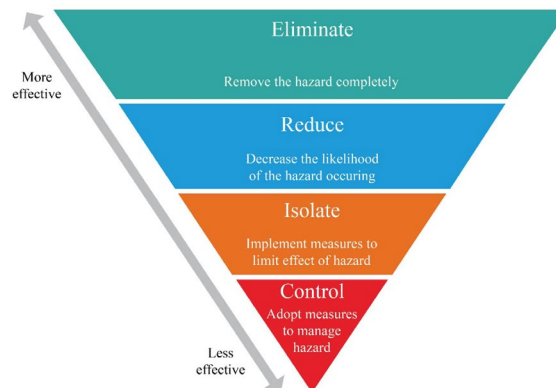


Figura 2 - Hierarquia de medidas de mitigação (Department for Transport, n.d.)

3. Veículos Elétricos

3.1. Introdução

Um número crescente de veículos automóveis está a ser eletrificado com a ajuda de baterias de tração de íões de lítio. Podem ser uma fonte para a deslocação do veículo, pelo que são designadas por baterias de tração ou podem desempenhar um papel mais subtil, por exemplo, num sistema micro-híbrido, em que auxiliam os motores de combustão tradicionais, permitindo, por exemplo, sistemas de arranque/paragem.

Considera-se que a sua crescente popularidade está ligada a algumas vantagens da eletrificação.

Os veículos automóveis elétricos podem reduzir as emissões e funcionar de forma mais eficiente do que os veículos movidos a combustíveis fósseis.

Especificamente, podem ser utilizadas baterias mais pequenas no tráfego local das cidades, uma vez que existem percursos curtos com paragens frequentes.

No entanto, em contrapartida, os autocarros de longo curso, exigem baterias muito grandes e, portanto, pesadas, requerendo carregamento contínuo.

Com base no site do World Economic Forum (WEF, 2024), a partir de 2020, as vendas de bicicletas elétricas aumentaram globalmente, crescendo 145% apenas nos Estados Unidos entre 2019 e 2020.

Na Europa, espera-se que as vendas anuais de bicicletas (incluindo as elétricas) sejam 47% maiores até 2030 em comparação com 2019, prevendo-se a venda de até 17 milhões de bicicletas elétricas por ano. Esses números destacam um crescimento significativo impulsionado pela pandemia, principalmente devido às vantagens de transporte seguro e sustentável oferecidas pelas bicicletas elétricas.

Entre 2006 e 2019, as vendas aumentaram de 98 mil para 3,3 milhões de unidades na União Europeia (UE). As bicicletas elétricas representaram 17% das vendas de bicicletas na União Europeia, com previsão de crescimento para 13,5 milhões de unidades por ano até 2030 (WEC, 2024).

A indústria europeia vende cerca de 20 milhões de bicicletas anualmente, gerando mais de 60.000 empregos diretos. Em 2019, a faturação anual da indústria chegou a 14 milhões de euros (Bicycle Industry: Growing at Speed European Mobility Atlas 2021, 2021).

No documento da (Energy Agency, 2024), os valores referentes a veículos elétricos de duas e três rodas mostram que este segmento está em rápido crescimento, especialmente na Ásia.

Em 2023, mais de 200 milhões de veículos elétricos de duas e três rodas estavam em circulação, sendo o maior crescimento na China e em mercados emergentes, como a Índia e o Sudeste Asiático.

Estes veículos são considerados essenciais para reduzir as emissões em áreas urbanas densas devido à sua acessibilidade e custo relativamente baixo em comparação com os veículos convencionais.

As baterias de íões de lítio, pela sua alta densidade energética, podem ser propensas a um fenómeno chamado fuga térmica, que ocorre em situações de sobrecarga, choque mecânico ou exposição a temperaturas elevadas. Esse fenómeno pode resultar na libertação de gases tóxicos e inflamar rapidamente, levando a incêndios difíceis de controlar.

Em espaços fechados, como os parques de estacionamento subterrâneos, o perigo é amplificado pela menor ventilação, o que permite a acumulação de substâncias tóxicas, aumentando o risco para os ocupantes e para os bombeiros (Król & Król, 2021).

Os incêndios em veículos elétricos diferem significativamente dos incêndios em veículos a combustão. As baterias de íões de lítio podem libertar uma quantidade considerável de calor e, uma vez inflamadas, são difíceis de extinguir.

O risco de reignição é também uma preocupação real, exigindo grandes quantidades de agentes extintores para arrefecer as baterias e prevenir novos focos de incêndio. Além disso, em parques de estacionamento subterrâneos, a proximidade entre veículos pode facilitar a propagação do fogo e tornar o combate ao incêndio ainda mais complicado (Ouyang et al., 2019).

Estudos sugerem que a falta de medidas adequadas pode levar ao colapso parcial ou total das estruturas em casos de incêndio prolongado (Brzezinska & Bryant, 2022).

Para reduzir os riscos associados a incêndios de veículos elétricos em parques subterrâneos, é necessário adotar novas tecnologias e medidas preventivas. Sistemas avançados de deteção de calor e fumo, melhorias nos sistemas de ventilação e a implementação de câmaras de monitorização térmica são algumas das soluções que podem ser implementadas para aumentar a segurança.

Além disso, recomenda-se que os veículos sejam estacionados com distâncias de segurança adequadas entre si para minimizar a propagação de chamas (Gavryliuk, A. et al., 2023).

Também é crucial que sejam desenvolvidas novas tecnologias de baterias que ofereçam maior segurança e que os sistemas de gestão de baterias (SGB) sejam otimizados para prevenir situações de sobrecarga ou falha térmica. O desenvolvimento de aditivos retardadores de chama para as baterias também tem sido explorado como uma forma de reduzir os riscos de incêndio (Ouyang et al., 2019).

As baterias de íões de lítio (BIL) são amplamente utilizadas em veículos elétricos devido à sua alta densidade energética e capacidade de armazenamento. No entanto, a sua composição química e construção particular tornam-nas suscetíveis a incêndios e explosões em condições extremas, como sobrecarga, curto-circuito e danos mecânicos.

Esses fatores podem levar ao fenómeno de fuga térmica, que é um processo descontrolado de reação química dentro da célula da bateria. Durante a fuga térmica, a libertação de calor e gases inflamáveis, como hidrogénio e monóxido de carbono, aumenta significativamente, criando um risco de incêndio considerável em ambientes confinados, como parques de estacionamento subterrâneos (Z. Huang et al., 2021).

A fuga térmica é desencadeada quando a taxa de dissipação de calor do sistema de gestão térmica de uma bateria é insuficiente para compensar o calor gerado internamente. Estudos demonstram que, uma vez que a fuga térmica se inicia, torna-se difícil de controlar, especialmente devido ao aumento exponencial da temperatura interna, que pode ultrapassar os 1000°C, tornando os métodos convencionais de combate a incêndios menos eficazes (Zhang et al., 2022).

Os parques de estacionamento subterrâneos representam um cenário de risco elevado para incêndios de veículos elétricos devido à ventilação limitada e à proximidade entre veículos.

Estes fatores aumentam a probabilidade de propagação do fogo, bem como a acumulação de gases tóxicos, como o fluoreto de hidrogénio (HF), que é libertado em grandes quantidades durante a combustão de baterias de iões de lítio.

A exposição a esses gases pode ser extremamente perigosa, tanto para os ocupantes como para as equipas de emergência, tornando essencial o desenvolvimento de sistemas de ventilação e deteção mais eficientes (Larsson et al., 2014; Mao et al., 2020).

Estudos recentes têm explorado a eficácia de diferentes agentes de extinção para combater incêndios de baterias de iões de lítio. O uso de métodos convencionais, como dióxido de carbono e pó químico, tem-se mostrado ineficaz na maioria dos casos, devido à natureza contínua da fuga térmica e à geração de calor residual mesmo após a extinção da chama visível.

Em contrapartida, o uso de spray de água e de neblina de água tem demonstrado maior eficácia na supressão de incêndios em baterias de iões de lítio. A aplicação de água proporciona uma maior capacidade de arrefecimento, reduzindo a temperatura da superfície da bateria e impedindo a propagação da fuga térmica para células adjacentes (Cui & Liu, 2021; Zhang et al., 2021).

Contudo, a utilização de água apresenta também desvantagens, como o aumento da concentração de gases tóxicos, como o monóxido de carbono (CO) e o fluoreto de hidrogénio (HF), durante o processo de extinção.

Este facto reforça a necessidade de medidas de segurança rigorosas para proteger as equipas de combate a incêndios e os ocupantes em caso de incêndios de veículos elétricos em ambientes fechados (Zhang et al., 2022).

Além dos métodos convencionais, várias investigações propuseram novas técnicas de combate a incêndios em BIL.

O uso de azoto líquido tem sido estudado como um método eficaz para arrefecer rapidamente as baterias e prevenir a fuga térmica antes que atinja temperaturas críticas.

Experiências indicam que a aplicação de pequenas quantidades de azoto líquido pode reduzir a temperatura da bateria de cerca de 700 °C para menos de 100°C em menos de 80 segundos, suprimindo eficazmente a propagação da fuga térmica (Z. Huang et al., 2021)

Outra técnica promissora é o uso de spray de emergência para arrefecer rapidamente as baterias e interromper o processo de fuga térmica. Experiências demonstram que, ao ajustar a temperatura de disparo do spray e a sua duração, é possível alcançar uma extinção eficaz com menor utilização de fluido, garantindo uma resposta rápida e eficiente em cenários de incêndio (Y. Huang et al., 2021)

Embora décadas de desenvolvimento tenham gerado várias tecnologias e variantes, os fabricantes de automóveis utilizam, principalmente, baterias de iões de lítio como dispositivos de armazenamento eletroquímico recarregável para veículos elétricos — uma tendência que provavelmente se manterá no futuro.

3.2. Mercado mundial de automóveis elétricos

Atualmente, o mercado mundial de automóveis elétricos está em constante crescimento, com uma quota significativa de veículos elétricos (VE) a nível global. Conforme apresentado na Figura 3, em 2023, as vendas globais de veículos elétricos (incluindo veículos 100% elétricos, BEVs, e híbridos plug-in, PHEVs) atingiram aproximadamente 14 milhões de unidades, representando cerca de 16% de todas as vendas de veículos ligeiros a nível mundial (Figura 1).

Este número reflete um crescimento de cerca de 33% em relação a 2022, num mercado global que também se expandiu, mas a um ritmo menor (EV Volumes, 2024).



Figura 3 -Venda mensal de veículos plug-in [2021-2023] (EV Volumes, 2024)

Até dezembro de 2023, o número total de veículos elétricos vendidos globalmente quase atingiu 14,3 milhões, representando um crescimento de 38% em relação ao ano anterior. Esta contagem inclui veículos totalmente elétricos (BEVs) e híbridos plug-in (PHEVs) (Figura 4).

A quota de mercado dos EVs nas vendas globais de automóveis novos aumentou para 18%, com a China e a Europa a liderarem, enquanto os EUA registaram o crescimento mais rápido.

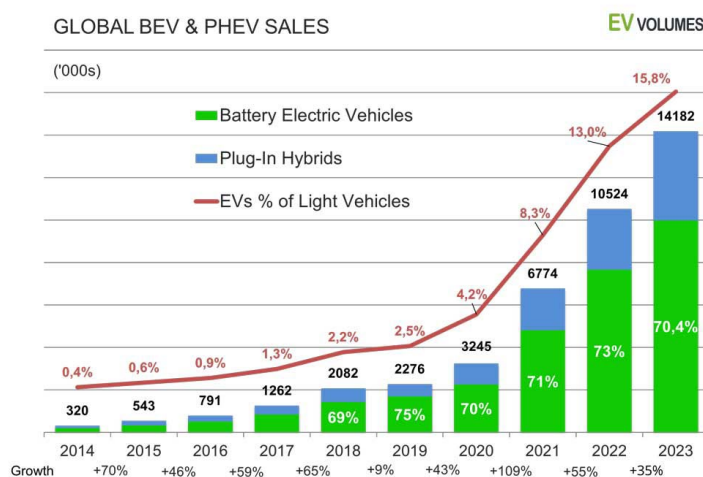


Figura 4 - Veículos 100% elétricos e híbridos plug-in (EV Volumes, 2024)

Em 2024, espera-se que as vendas globais de veículos elétricos (VEs) cresçam 25% (Figura 5), totalizando 17,8 milhões de unidades, com 12,8 milhões de veículos totalmente elétricos (BEVs) e 5 milhões de híbridos plug-in (PHEVs). A participação de mercado dos EVs deverá alcançar 19,6% das vendas globais de veículos leves. A China continuará a liderar o mercado, com uma participação de 41%, enquanto os EUA e Canadá devem crescer 56% as suas vendas de EVs.

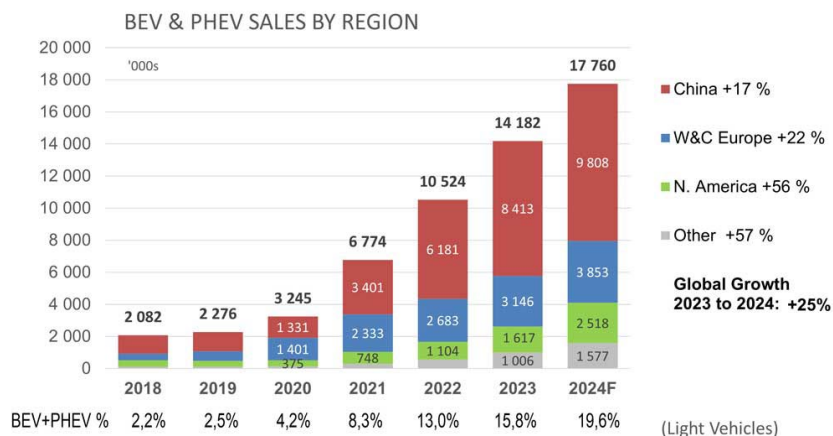


Figura 5 - Vendas de veículos elétricos e híbridos plug-in por região (EV Volumes, 2024)

3.3 Acontecimentos no mundo

Neste item apresentam-se os principais eventos conhecidos sobre acidentes com veículos elétricos em estacionamentos cobertos ou subterrâneos.

Em fevereiro de 2022 (Fig. 6), um incêndio num veículo elétrico num parque de estacionamento subterrâneo em Bruxelas levou à evacuação de um restaurante situado acima do parque, na Rua Ravenstein.

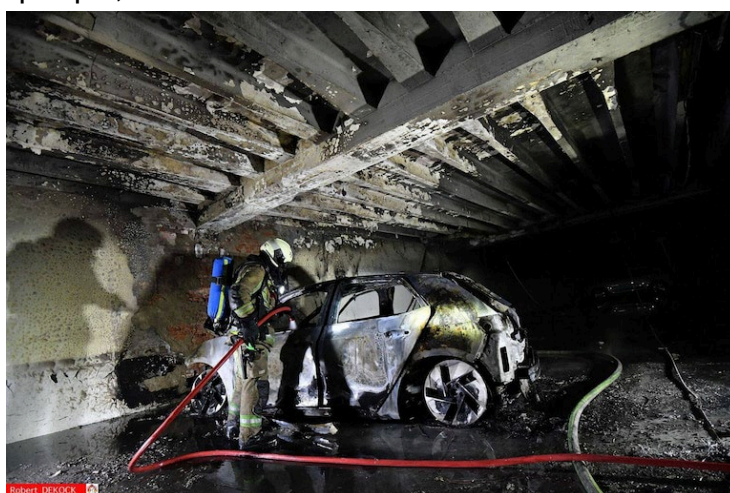


Figura 6 - Viatura elétrica arde em estacionamento subterrâneo

Os bombeiros responderam inicialmente a um alerta de fumo no restaurante, mas descobriram que a origem do problema estava num veículo elétrico em chamas na garagem subterrânea.

O carro estava a emitir grandes quantidades de calor e fumo, e a sua bateria entrou em reação térmica. O incêndio foi extinto ao submergir o veículo num contentor de água (Brussel Times, 2022).

Em fevereiro de 2020 (Fig. 7), um Porsche Taycan elétrico incendiou-se enquanto estava estacionado numa garagem residencial na Flórida, nos Estados Unidos. O veículo foi completamente destruído pelo fogo, que também causou danos significativos à garagem e à casa.



Figura 7 - Viatura elétrica arde em garagem particular

A Porsche confirmou o incidente, destacando que este foi o primeiro caso conhecido de um Taycan a pegar fogo. A empresa afirmou que está a colaborar com as autoridades para investigar a causa exata do incêndio, embora não tenham sido reportados feridos.

O incidente gerou preocupações sobre a segurança de veículos elétricos, particularmente no que diz respeito aos potenciais riscos associados às suas baterias de íões de lítio (TheDrive, 2020).

Em outubro de 2017, um Tesla Model S envolveu-se num acidente a alta velocidade numa autoestrada na Áustria, colidindo contra uma barreira de betão. O incêndio foi de difícil contenção, principalmente devido à natureza das baterias de íões de lítio do carro elétrico, que arderam repetidamente, mesmo após os bombeiros terem intervindo.

Foram necessários 35 bombeiros e cinco viaturas para conseguir controlar o fogo, que durou várias horas. O combate ao incêndio teve de ser realizado com proteções respiratórias rigorosas devido aos gases tóxicos libertados pelo incêndio das baterias. As equipas de emergência tiveram de cortar o fornecimento de energia da bateria de alta voltagem para conseguir extinguir completamente as chamas.

Este incidente demonstrou a complexidade e os desafios adicionais no combate a incêndios de veículos elétricos em comparação com os veículos convencionais, que dependem principalmente de combustíveis líquidos.

A Tesla recomendou que os veículos envolvidos em acidentes com risco de incêndio fossem isolados durante 48 horas, devido ao perigo de reignição das baterias mesmo após a extinção inicial do fogo (Express.co.uk, 2017)

Outro incidente reportado a 7 de dezembro de 2017 na Alemanha, onde um VW e-Golf pegou fogo devido a um problema nas baterias de alta tensão. Os bombeiros conseguiram inicialmente arrefecer o veículo utilizando água, mas devido à persistência do risco de reignição, decidiram transferir o carro para um contentor de água como medida preventiva.

Este método foi utilizado para evitar novas explosões ou reacendimentos, um procedimento que está a tornar-se comum no combate a incêndios de veículos elétricos devido ao perigo contínuo das baterias de íões de lítio, que podem entrar em fuga térmica mesmo após a extinção inicial do fogo (drivemag.com, 2017)

3.4. Simulações de Incêndios em Parques de Estacionamento Subterrâneos

Os estudos apresentados nesta seção fornecem uma visão detalhada sobre as melhores práticas para lidar com incêndios em parques de estacionamento subterrâneos, com destaque para os desafios específicos associados aos veículos elétricos e às suas baterias de íões de lítio.

As simulações computacionais desempenham um papel essencial, permitindo prever a propagação de incêndios e otimizar as respostas de emergência em cenários

complexos. Adicionalmente, os resultados evidenciam que a eficácia dos sistemas de ventilação e de supressão de incêndios é determinante para garantir a segurança em ambientes confinados.

Por estes motivos, entendeu-se ser relevante apresentar e analisar os estudos já desenvolvidos dado que são uma base para trabalhos futuros.

Num estudo realizado por (Burlacu et al., 2018), foram realizadas simulações utilizando o Simulador da Dinâmica do Fogo (SDF), uma ferramenta de simulações computacionais de fluidos amplamente utilizada para estudos relacionados com incêndios. O SDF simula o comportamento de fluidos, a propagação de fumo e o desenvolvimento de incêndios em edifícios, incluindo parques de estacionamento subterrâneos.

Além disso, o documento descreve que foram simulados cenários de incêndio, sendo avaliados diferentes parâmetros, como a densidade de carga de incêndio e a atividade do sistema de supressão de incêndios por sprinklers.

Estes cenários foram projetados para avaliar se a configuração de segurança existente no parque de estacionamento era adequada em caso de diferentes situações de incêndio e foram modelados com base em materiais comuns que compõem os veículos presentes no parque de estacionamento.

Especificamente, os incêndios foram originados principalmente por:

- Materiais plásticos e borracha: estes materiais incluem componentes sintéticos do corpo dos veículos, forros interiores, pneus de borracha e outros materiais inflamáveis dentro dos automóveis. Estes materiais representam uma carga de incêndio significativa devido à sua capacidade de libertar grande quantidade de calor e fumo quando queimados.
- Espumas e revestimentos sintéticos: Além dos componentes de borracha e plásticos, os veículos contêm revestimentos e espumas internas que contribuem para a propagação do fogo dentro do veículo.

Nos cenários simulados, foi modelado um carro típico de 1.350 kg contendo cerca de 340 kg de materiais plásticos e borracha. Isso proporcionou a base para o cálculo da taxa de libertação de calor (HRR), que foi estimada com um pico de aproximadamente 4 MW para os testes simulados. Esta carga de incêndio reflete um incêndio típico num veículo antigo ou convencional.

O objetivo principal destas simulações era avaliar a eficácia de diferentes sistemas de supressão de incêndios, nomeadamente com e sem ativação de sprinklers.

Os resultados das simulações com e sem a ativação dos sprinklers indicam diferenças significativas nos cenários de incêndio:

No cenário se ativação de sprinklers, a evolução do incêndio foi avaliada apenas com a ativação do sistema de exaustão de fumo. Após 10 minutos do início do fogo, a temperatura do teto atingiu um máximo de 515 °C, e a exaustão de fumo foi insuficiente para proporcionar alívio adequado em um incêndio com apenas um carro envolvido.

Não houve propagação do fogo, já que o veículo não estava próximo de outros materiais combustíveis (Burlacu et al., 2018).

No cenário com ativação dos sprinklers, a temperatura do teto foi controlada, atingindo um máximo de 265 °C, consideravelmente inferior ao cenário sem sprinklers. Seis cabeças de sprinklers foram ativadas ao longo do tempo.

Além disso, a quantidade de fumo produzido foi significativamente menor, e o movimento do fumo foi mais lento, sendo removido em menos tempo (Burlacu et al., 2018).

Os resultados revelaram que a ativação rápida de sistemas automáticos de combate a incêndios, como os sprinklers, consegue reduzir consideravelmente as temperaturas máximas geradas por um incêndio, enquanto controla a dispersão de fumos. Esta redução contribui para melhorar a segurança dos ocupantes, facilitando a evacuação e as operações de socorro.

Além disso, os estudos indicaram que fatores como a disposição do parque, a eficiência da ventilação e a quantidade de material inflamável disponível influenciam a rapidez com que o incêndio se propaga e a acumulação de fumos tóxicos.

Estes estudos reforçam a importância de se investir em sistemas de ventilação adequados e estratégias de evacuação eficazes em parques de estacionamento subterrâneos, onde os riscos são naturalmente mais elevados devido ao confinamento do espaço.

Destaca-se outro estudo relevante, conduzido por (Johansson & Svensson, 2019) em que foram realizados vários testes e simulações focados no comportamento dos incêndios em espaços fechados, como túneis e edifícios de estacionamento. Os principais testes realizados foram baseados na teoria da dinâmica do fogo e envolveram a utilização de simulações computacionais de dinâmica de fluidos (CFD).

Estas simulações foram projetadas para observar a movimentação de fumo e calor, com foco em garantir a evacuação segura e uma melhor visibilidade para as equipas de resgate.

Os testes demonstraram que a carga térmica é maior nos veículos modernos devido ao uso extensivo de materiais sintéticos, o que aumenta a intensidade e a duração do incêndio.

A ventilação mecânica foi considerada mais eficaz na remoção de fumos tóxicos e calor em situações de incêndio.

Estes testes foram usados para ajustar sistemas de supressão automática e definir tempos críticos de resposta para as equipas de resgate.

Num estudo de (Sun et al., 2020), foram realizados testes em escala real para avaliar o risco de incêndios em baterias de veículos elétricos (Figura 9).

Estes testes incluem medições da taxa de libertação de calor (HRR), que variava com a capacidade de energia das BILs. O valor máximo (PHRR) encontrado foi de 6.1 ± 1.7 MW, comparável aos veículos movidos a combustíveis fósseis, que possuem uma HRR em torno de 5 MW.

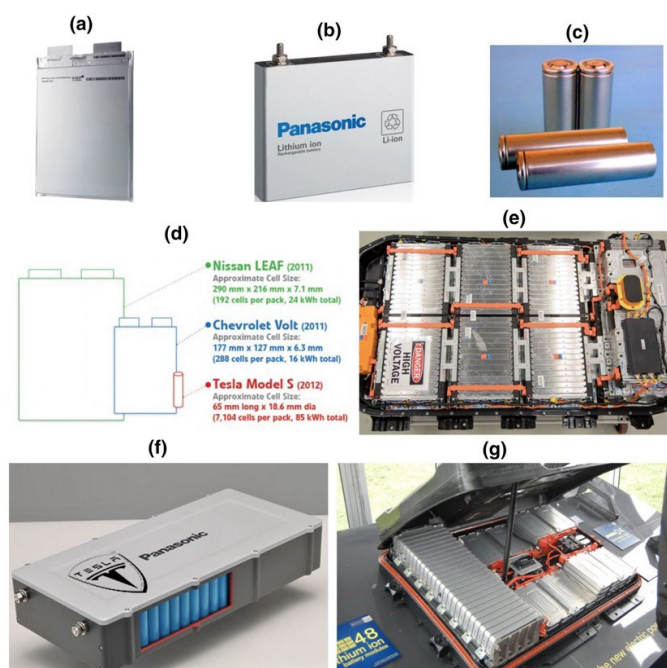


Figura 8 - Células típicas de baterias para VE: a) em bolsa; b) prismática; c) cilíndrica; d) comparação do tamanho e) conjunto de baterias de 60 kW f) bateria da Tesla, com células cilíndricas; g) Bateria do Nissan LEAF (Sun et al., 2020)

Estes testes mostraram que, embora a severidade dos incêndios seja comparável à dos veículos convencionais, os incêndios em baterias de íons de lítio são mais difíceis de extinguir devido à inacessibilidade do núcleo da bateria e à possibilidade de reignição sem um arrefecimento adequado.

Os estudos já realizados por outros autores mostraram que os incêndios em edifícios de estacionamento subterrâneos ou fechados são particularmente perigosos devido à acumulação rápida de fumo e calor.

A falta de ventilação adequada pode levar a uma rápida deterioração das condições no local, dificultando a evacuação de pessoas e a intervenção das equipas de emergência. Os estudos destacam ainda que, devido à maior quantidade de materiais combustíveis nos veículos modernos, os incêndios tendem a ser mais intensos e difíceis de controlar, especialmente quando comparados com veículos mais antigos.

Adicionalmente, o comportamento dos incêndios em espaços confinados como parques de estacionamento é influenciado pela densidade de veículos estacionados e pela proximidade entre eles, o que pode facilitar a propagação do fogo de um veículo para outro.

Assim, os sistemas de ventilação e os sprinklers automáticos desempenham um papel crucial na contenção dos incêndios e na limitação dos danos estruturais.

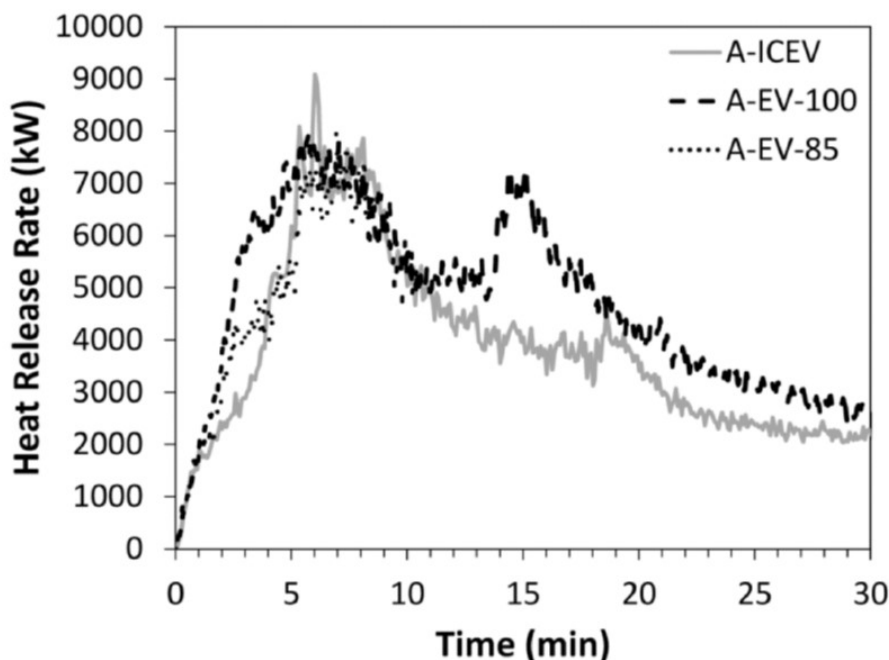


Figura 9 - TLC (HRR) para testes de incêndio veículos de combustível tradicional e veículos elétricos (Gov.UK, 2024)

3.5. Avaliação da Intervenção dos Bombeiros em Incêndios

Um dos aspectos mais relevantes nos incêndios é a intervenção dos bombeiros no combate ao incêndio.

Kerber et al., 2019 realizaram um estudo que analisou diferentes táticas de combate a incêndios, como o ataque de transição e o ataque interior, em incêndios simulados num ambiente residencial. Embora focado em edifícios residenciais, considera-se que as conclusões são aplicáveis também a parques de estacionamento subterrâneos.

A investigação destacou que a aplicação precoce de água diretamente sobre o fogo e o controlo rigoroso da ventilação são fundamentais para reduzir a temperatura interna e minimizar a exposição a gases tóxicos, melhorando assim as condições de segurança para as equipas de resgate e os ocupantes. Estas conclusões demonstram a importância de intervenções rápidas e bem coordenadas.

3.6. Perigos no manuseamento de veículos elétricos danificados

A colisão ou o embate tem o potencial de provocar a combustão das baterias de lítio, de acordo com os testes e pesquisas presentes no documento Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles, confirma-se que uma colisão ou embate envolvendo

um veículo elétrico tem o potencial de provocar a combustão das baterias de íões de lítio (BIL).

No relatório, é descrita uma experiência onde um veículo elétrico foi projetado a partir de uma altura de 20 metros, resultando numa grande libertação de fumo proveniente da bateria, seguida de combustão (Bisschop et al., 2020).

Além disso, o documento faz referência a casos reais, como os acidentes com veículos Tesla, nos quais o dano significativo à bateria resultou em incêndios difíceis de extinguir, necessitando de grandes quantidades de água e espuma. Outro exemplo mencionado é o incêndio do Chevrolet Volt, que ocorreu após um teste de impacto lateral contra um poste, onde o dano à bateria provocou uma ignição retardada devido ao contacto do líquido refrigerante com a bateria ao longo do tempo (Bisschop et al., 2020).

Estes resultados sublinham o perigo inerente do fenómeno de fuga térmica em baterias de íões de lítio danificadas, que pode levar à combustão, mesmo após o fogo parecer ter sido inicialmente extinto.

3.7. Libertação de Calor em Veículos Elétricos

Os veículos elétricos, devido às baterias de íões de lítio, apresentam um risco significativo de incêndio, especialmente quando estão danificados em acidentes, como anteriormente se refere. Um dos principais perigos associados é a taxa de pico de libertação de calor (HRR - Heat Release Rate), que atinge valores consideravelmente elevados.

Estudos indicam que a taxa de libertação de calor em veículos elétricos pode atingir 6.1 ± 1.7 MW, o que é ligeiramente superior ao valor médio de 5 MW em veículos a combustão convencionais (Bisschop et al., 2020).

No entanto, a maior diferença está no facto de que, apesar dos valores serem relativamente próximos, os incêndios em veículos elétricos são mais persistentes e difíceis de extinguir, principalmente devido ao fenómeno de fuga térmica nas baterias de íões de lítio.

3.8. Comparação com Veículos Convencionais

Nos veículos convencionais, os incêndios são normalmente alimentados por combustíveis líquidos, como gasolina ou gasóleo, cujas chamas podem ser controladas com métodos tradicionais de extinção, como água ou espuma. No entanto, nos veículos elétricos, os incêndios nas baterias têm características diferentes.

Quando as baterias sofrem danos, podem entrar em fuga térmica, uma reação descontrolada que faz com que a temperatura da bateria aumente rapidamente,

libertando grandes quantidades de calor e gases tóxicos. Este fenómeno pode gerar reacendimentos após a extinção aparente do fogo, o que representa um risco contínuo, mesmo após a eliminação das chamas iniciais (Bisschop et al., 2020).

Os veículos elétricos, portanto, exigem uma abordagem diferente no manuseamento após acidentes. Enquanto os veículos convencionais podem ter os seus incêndios controlados de maneira relativamente rápida, os incêndios em veículos elétricos podem durar várias horas e requerem grandes quantidades de água ou agentes de arrefecimento para reduzir a temperatura das baterias e evitar a reignição.

Uma vez extinto o fogo, pode ainda haver energia retida na bateria de iões de lítio. Isto pode ser problemático, não só para as equipas de socorro, mas também para as atividades de reboque e de oficina.

Este facto foi demonstrado pelo acidente mencionado por (Bisschop et al., 2020), em que a bateria se reacendeu quando o veículo acidentado estava a ser retirado do local. Embora rapidamente extinto, o fogo reacendeu-se à chegada ao estaleiro de salvamento.

O caso de South Jordan também registou um reacendimento, no mesmo dia no parque de apreensão e 5 dias após o acidente.

Outro exemplo aconteceu em 2011 e foi amplamente divulgado envolvendo um Chevrolet Volt, um veículo elétrico híbrido plug-in, que evidenciou os desafios de segurança associados às baterias de iões de lítio. Este caso tornou-se significativo no contexto da segurança contra incêndios em veículos elétricos devido ao fenómeno de reacendimento.

O incidente aconteceu após o Chevrolet Volt ser submetido a um teste de colisão pelo regulador norte-americano NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). Durante o teste, a bateria de iões de lítio do veículo sofreu danos estruturais, mas o incêndio não foi imediato. Dias após o teste de colisão, a bateria entrou em *thermal runaway*, um processo químico descontrolado que gera calor excessivo e pode resultar em combustão.

O veículo pegou fogo no local onde estava armazenado, demonstrando o potencial de reacendimento de baterias danificadas.

Este caso realçou a necessidade de monitorização cuidadosa de veículos elétricos após colisões ou outros incidentes que possam danificar as baterias.

A energia residual retida nas células da bateria pode permanecer instável e representar um risco para equipas de emergência, pessoal de reboque, técnicos de oficina e até mesmo para infraestruturas onde o veículo seja armazenado.

Em resposta a este incidente, fabricantes e reguladores intensificaram os protocolos de segurança para veículos elétricos.

Foram introduzidas orientações para equipas de socorro e oficinas, incluindo o uso de câmaras térmicas para monitorização contínua, procedimentos para descarregar ou estabilizar as baterias danificadas e práticas seguras de armazenamento.

O caso do Chevrolet Volt sublinhou os desafios únicos que as tecnologias de baterias apresentam e reforçou a importância de medidas proactivas para garantir a segurança de pessoas e propriedades.

A submersão de um veículo elétrico em outros meios condutores, como a água do mar ou água contaminada, também causou incêndios de baterias. Um exemplo disto são os incêndios num autocarro híbrido nos EUA.

Os detritos e a humidade acumularam-se perto da bateria de lítio montada no tejadilho, o que fez com que esta descarregasse a sua energia, gerasse fumo, bem como derretesse e carbonizasse os seus componentes internos.

Um incêndio em dois autocarros elétricos na China devido à queda de chuva intensa pode ser considerado como outro exemplo.

Embora a causa exata seja desconhecida, a humidade combinada com detritos (condutores) pode resultar numa bateria em descarga e na produção de calor quando penetram no sistema de baterias de iões de lítio.

O manuseamento de veículos elétricos danificados também pode representar riscos elétricos em determinadas circunstâncias.

O risco geral para a segurança pessoal é baixo, uma vez que é pouco provável que um chassis de um veículo elétrico seja exposto à corrente do sistema de alta tensão. A chamada ligação à terra flutuante que o sistema de baterias utiliza, deve garantir que não existe qualquer ligação ao chassis.

Além disso, um veículo elétrico desligará automaticamente o sistema de baterias do grupo motopropulsor com base num nível detetado de impacto ou abuso da bateria de lítio, ou de falhas de isolamento. Consequentemente, o contacto com uma parte sob tensão do sistema de alta tensão normalmente não causará a entrada de corrente no corpo de uma pessoa.

No entanto, isto será possível quando uma pessoa estiver em contacto direto com os terminais positivo e negativo da bateria. Note-se que o contacto com um contacto bipolar com partes sob tensão expostas partes sob tensão, por exemplo, devido à degradação dos materiais de isolamento, também pode resultar em choque elétrico.

3.9. Incêndios causados por danos no PCVE/cabo de carregamento

Existem diferentes tipos de estações de carregamento e cabos de carregamento disponíveis. Normalmente, os cabos para conectar um veículo elétrico a um ponto de carregamento de veículos elétricos (PCVE) fornecidos pelo condutor do veículo elétrico; a menos que seja um PCVE Modo 4 onde o cabo é fixo ao ponto de carregamento.

Há um número crescente de estatísticas relatadas sobre o número total e a probabilidade de incêndios em veículos elétricos, mas elas não dividem os dados para diferenciar entre incêndios em carros de veículos elétricos e incêndios em

veículos elétricos durante o carregamento, ou para danos ao PCVE ou ainda ao cabo de carregamento.

Cada bateria requer um conjunto de circunstâncias do carregador para garantir condições de carregamento ideais. Isto inclui uma tensão celular adequada (ou seja, ter o nível correto de corrente no carregador, de modo a que a tensão resultante da potência do carregador esteja dentro do intervalo adequado para a célula da bateria); e um regime de carregamento adequado (corrente constante ou tensão constante).

Um carregador incompatível não representa um risco de incêndio, uma vez que o carregamento não se realiza.

Embora não haja nenhuma evidência empírica disponível até agora que indique uma correlação da probabilidade de incêndios de VE com danos aos PCVE/cabos de carregamento; o facto de que mais fontes de ignição estão presentes no parque de estacionamento devido a uma maior quantidade de infraestrutura elétrica fornecida justifica uma consideração cuidadosa das potenciais consequências ao realizar a avaliação do risco de incêndio.

Dependendo das condições ambientais em torno da bateria, a libertação de gases inflamáveis pode conduzir a quatro cenários diferentes.

- Cenário 1: um incêndio de combustão livre, em que a ignição dos gases inflamáveis ocorre na presença de uma fonte de ignição.
- Cenário 2: um incêndio de jato, em que os gases ventilados são libertados com algum ímpeto numa determinada direção e inflamam-se.
- Algumas baterias de veículos elétricos foram concebidas para serem ventiladas lateralmente para minimizar a sobrepressão resultante da acumulação de gases inflamáveis no interior da bateria, mas isto pode levar à projeção lateral de chamas a partir de baixo do veículo.
- Cenário 3: incêndio instantâneo (ou deflagração) em que os gases ventilados existem na mistura certa para que uma frente de chama subsónica possa propagar-se através dessa mistura, mas de uma forma que crie uma sobrepressão negligenciável ou não prejudicial.
- Cenário 4: uma explosão de nuvem de vapor, em que os gases expelidos formam uma nuvem dentro da gama de inflamáveis e há confinamento suficiente para gerar uma explosão (ARUP, 2023).

3.10. Integração na rede

A integração da infraestrutura de carregamento inteligente em parques de estacionamento e os desafios associados à sua implementação leva a um conflito de objetivos entre o fornecimento permanente de energia e os três atributos de baixo custo, eficiente e amigo do ambiente (Dirkpietruschka & Editors, 2024). Se os veículos elétricos procurarem eletricidade de uma forma descontrolada e

descoordenada, ocorrem cargas elevadas nas horas de ponta, o que põe em perigo a estabilidade da rede elétrica. Devido à expansão das energias renováveis, o fornecimento de eletricidade torna-se mais volátil.

A investigação em projetos piloto e tecnologias inovadoras, permite otimizar a utilização de recursos energéticos, ao mesmo tempo que asseguram a eficiência e a sustentabilidade ambiental. Estes sistemas baseiam-se na comunicação entre veículos elétricos, infraestruturas de carregamento e a rede elétrica (Dirkkpietruschkaa & Editors, 2024).

Os produtores de energia, as instalações de armazenamento e os consumidores organizam as suas operações de forma eficiente em redes inteligentes, tendo em conta a situação da procura e da oferta.

Um dos aspetos centrais é o controlo inteligente da carga, que visa evitar sobrecargas na rede elétrica, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas.

A estabilidade da rede é apoiada pelo carregamento bidirecional, que é definido como o carregamento em alturas de baixa procura e a alimentação da rede em alturas de pico. Para satisfação das partes interessadas, a recolha e avaliação de grandes volumes de dados utilizando inteligência artificial (IA) é útil.

Assim, um sistema de gestão de energia pode ser operado em tempo real, que afeta os recursos disponíveis utilizando a IA (BDI_ide_Künstliche Intelligenz, 2018).

À medida que a expansão da mobilidade eletrónica continua, os operadores de parques de estacionamento são incentivados a fornecer mais pontos de carregamento.

Adicionalmente, são explorados conceitos de armazenamento e redistribuição de energia, aproveitando os momentos de menor procura elétrica para armazenar energia em baterias ou outros dispositivos. Este modelo de gestão energética não só reduz o impacto ambiental, como também diminui custos operacionais (Dirkkpietruschkaa & Editors, 2024).

Os estudos demonstram que a integração destes sistemas exige soluções técnicas robustas, regulamentações adequadas e uma colaboração estreita entre os setores público e privado.

Existe ainda a necessidade de abordar questões relacionadas com a aceitação por parte dos utilizadores e com a adaptabilidade da infraestrutura existente, apontando para a relevância de estratégias que promovam uma transição suave para este novo paradigma de mobilidade e sustentabilidade urbana.

3.11 Aumento dos incêndios

Alguns documentos (Gov.UK, 2024) sugerem que, embora existam algumas semelhanças entre os incêndios de veículos de combustão tradicionais e veículos elétricos, há também várias diferenças.

O crescimento de um incêndio em um VE apresenta um comportamento diferente de veículos com motores de combustão interna (ICEVs), principalmente devido à propagação de calor e à liberação de gases inflamáveis.

A análise comparativa indica que os VE tendem a ter dois picos de liberação de calor:

1. Primeiro Pico: quando os materiais inflamáveis no veículo (interior e exterior) pegam fogo.
2. Segundo Pico: quando a bateria entra em combustão, aumentando a taxa de liberação de calor.

Conforme ilustrado na figura 9, o incêndio em um VE geralmente dura mais tempo que em um ICEV, devido à necessidade de extinguir a bateria completamente para evitar reignição.

Nota-se que os fatores que influenciam o crescimento do incêndio (Gov.UK, 2024) são:

1. Carga da Bateria: o estado de carga pode influenciar a intensidade e a duração do incêndio.
2. Duração do Combate ao Incêndio: nos VE podem levar de 6 a 49 minutos para serem apagados, comparado a cerca de 5 minutos para ICEVs.
3. Reignição: existe uma alta probabilidade de reignição devido ao calor residual na bateria. Em alguns casos, foi documentada reignição até 22 horas após o incêndio inicial.

Para veículos com motor de combustão interna (ICEVs):

- Crescimento Inicial (0-5 min): A taxa de liberação de calor (HRR) aumenta rapidamente, aproximadamente 20 kW por minuto.
- Pico (5-10 min): A HRR mantém-se no pico, em torno de 1000 kW.
- Declínio (10-60 min): A HRR diminui gradualmente, reduzindo cerca de 50 kW a cada minuto subsequente ao pico.

Para veículos elétricos (VE):

- Crescimento Inicial (0-10 min): Crescimento inicial mais lento, com a HRR em cerca de 15 kW por minuto.
- Primeiro Pico (10-25 min): A HRR mantém-se alta, em torno de 1500 kW.
- Segundo Pico (25-30 min): A HRR estabiliza-se em cerca de 1000 kW devido à combustão da bateria.
- Declínio (30-60 min): A HRR diminui cerca de 20 kW por minuto após o segundo pico.

- O gráfico exibe uma linha de crescimento do incêndio com dois picos distintos, sendo o segundo associado à bateria.
- Esse gráfico pode ser adaptado para demonstrar a diferença entre a taxa de liberação de calor em EVs e ICEVs, conforme descrito.

O gráfico demonstra ainda que A-EV-100 mostra a taxa de libertação de calor para um VE a 100% do estado de carga, e o A-EV-85 mostra a taxa de libertação de calor para um VE a 85% do estado de carga. O pico da HRR é maior para o veículo de combustão tradicional (ICEV), enquanto o veículo elétrico (VE) a 100% de carga regista um segundo pico e decai mais lentamente.

A duração do incêndio excede os 5 minutos acima referidos e deve-se ao facto de não ter havido intervenção dos bombeiros durante o ensaio (ou seja, os automóveis foram deixados a arder durante 30 minutos).

Este facto pode levar a um aumento do aquecimento das imediações e a uma maior probabilidade de propagação do fogo aos veículos adjacentes. A propagação do fogo a veículos adjacentes não foi estudada como parte das experiências.

Importa ainda referir que os incêndios em EV podem libertar uma variedade de compostos tóxicos devido à combustão de materiais nas baterias, como lítio, níquel, cobalto e outros metais pesados, bem como plásticos e produtos químicos presentes no veículo (Zhang et al., 2022).

Estes incêndios geram poluentes atmosféricos, tais como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), ácido fluorídrico (HF) e outros compostos que contribuem para a poluição do ar e podem impactar a saúde humana e ambiental (Mellert et al., 2020).

Durante o combate aos incêndios em EV, a água e outros agentes extintores podem misturar-se com produtos químicos tóxicos libertados pela combustão da bateria, contaminando potencialmente o solo e as águas subterrâneas.

Assim, podem ser necessários sistemas de drenagem e bacias de retenção para conter a água contaminada, evitando que esta chegue a cursos de água naturais ou ao solo (Zhang et al., 2022).

Em incêndios que envolvem EVs, as baterias geralmente ficam danificadas e necessitam de ser descartadas ou recicladas de forma adequada.

As baterias de íões de lítio exigem processos específicos de reciclagem para recuperar metais e minimizar o impacto ambiental.

O descarte inadequado de baterias pode libertar substâncias tóxicas e metais pesados no meio ambiente.

Os incêndios em baterias de EV podem durar mais tempo e têm risco de reignição devido ao calor residual e à química interna da bateria, exigindo mais água e agentes extintores, o que aumenta o impacto ambiental, com anteriormente se refere.

A necessidade de recursos adicionais para extinguir o incêndio prolonga o tempo de emissão de poluentes e aumenta o consumo de água.

Se o incêndio ocorrer perto de áreas naturais, os gases tóxicos e a contaminação do solo e da água podem afetar ecossistemas locais, prejudicando a fauna e a flora.

A exposição prolongada a poluentes pode impactar a biodiversidade e afetar habitats naturais.

Nota-se que se devem desenvolver e adotar tecnologias de combate a incêndios menos poluentes (como agentes extintores ecológicos) para mitigar o impacto ambiental. Os extintores de espuma de baixa toxicidade e sistemas de contenção de água contaminada são alguns exemplos.

É fundamental um planejamento adequado para o descarte de materiais remanescentes após um incêndio em EV. As empresas e serviços de emergência devem ter acesso a infraestruturas de reciclagem especializadas para resíduos de baterias e outros componentes.

4. Resultados e discussão

Os estudos analisados demonstram que a introdução de veículos elétricos (VE) e pontos de carregamento elétrico (PCVE) em parques de estacionamento cobertos impõe novos desafios à segurança contra incêndios, exigindo uma redefinição dos objetivos e restrições que regem as infraestruturas existentes e novas.

Para garantir a segurança de ocupantes e equipas de emergência, proteger a integridade estrutural dos parques e mitigar os impactos ambientais de possíveis incêndios, é fundamental estabelecer medidas de mitigação claras e eficazes, baseadas numa avaliação de riscos abrangente e detalhada. Nos parques já existentes, a avaliação de riscos deve considerar a potencial introdução de novos perigos associados a VE, como falhas no sistema de gestão de baterias (BMS) ou problemas elétricos em pontos de carregamento. Estas avaliações podem identificar a necessidade de adaptações específicas, como a instalação de ventilação mecânica, sistemas automáticos de supressão de incêndios e o aumento da resistência estrutural para conter possíveis colapsos. A distância mínima entre veículos também deve ser revista, para limitar a propagação do fogo e evitar cenários de incêndio em cadeia.

A análise realizada demonstra que os incêndios em veículos elétricos (VE) apresentam características únicas e desafios significativos, particularmente em ambientes confinados, como parques de estacionamento subterrâneos. Os dados recolhidos mostram que o comportamento térmico das baterias de íões de lítio, quando expostas a condições extremas, como colisões ou falhas técnicas, pode levar a runaway térmico. Este fenómeno resulta em emissões rápidas de calor e gases tóxicos, como monóxido de carbono (CO) e ácido fluorídrico (HF), que representam riscos imediatos para a saúde e segurança.

Adicionalmente, a utilização de água no combate a incêndios de VE pode intensificar a contaminação ambiental, caso os resíduos resultantes não sejam devidamente contidos. Este problema é amplificado pela falta de sistemas de drenagem adequados em muitos parques de estacionamento subterrâneos. A análise dos riscos sugere que medidas preventivas, como sistemas de retenção de águas contaminadas, podem minimizar os impactos ambientais.

Por outro lado, para parques de estacionamento novos, é imprescindível planear já com vista à futura presença de VE e PCVE em larga escala. Este planeamento deve incluir medidas como a utilização de câmaras de monitorização térmica para deteção precoce de thermal runaway, sprinklers automáticos estrategicamente posicionados, zonas de contenção para águas residuais contaminadas e materiais de construção resistentes ao fogo. O design resiliente destas infraestruturas permitirá uma maior capacidade de resposta a situações de emergência e minimizará os impactos negativos, tanto no ambiente quanto na segurança dos ocupantes.

As ferramentas de análise de riscos, como Fault Tree Analysis e Event Tree Analysis, revelaram-se cruciais para mapear as causas e consequências de

incêndios em VE. Estas abordagens permitem prever cenários de propagação do fogo, bem como identificar intervenções específicas para reduzir os danos materiais e humanos.

A legislação nacional revela-se pouco adequada e com necessidade de ser desenvolvida, dando espaço e oportunidade aos legisladores, com base em estudos e conclusões de especialistas na área, de elaborarem regulamentação específica.

No entanto, ao observar o contexto internacional, verifica-se que vários países têm adotado medidas normativas específicas para responder aos desafios únicos apresentados pelos veículos elétricos. Nos Estados Unidos, por exemplo, a National Fire Protection Association (NFPA) e o International Building Code (IBC) incluem diretrizes específicas para a segurança contra incêndios em infraestruturas que integram VE, como parques de estacionamento subterrâneos e estações de carregamento. Estas normas abordam questões como o runaway térmico de baterias de íões de lítio, ventilação eficiente para dissipação de gases tóxicos e sistemas automáticos de deteção e extinção de incêndios.

O site da Risk Logic destaca estas práticas internacionais, recomendando estratégias como a instalação de sprinklers adaptados a incêndios de baterias, a criação de zonas de contenção para resíduos contaminados e a utilização de sistemas de monitorização contínua para deteção precoce de falhas. Estas medidas demonstram a importância de regulamentações específicas que integrem tecnologias avançadas e planos de gestão de risco detalhados.

Em Portugal, a ausência de regulamentação específica para incêndios em VE evidencia uma lacuna que precisa de ser colmatada. A adaptação das normativas existentes às características únicas destes veículos e das infraestruturas de carregamento é essencial para garantir a segurança de utilizadores, equipas de emergência e infraestruturas. Este processo requer uma colaboração estreita entre especialistas, operadores de infraestruturas e entidades legisladoras, de forma a alinhar as práticas nacionais com os padrões internacionais mais avançados.

Aprendizagens Obtidas

A realização deste estudo proporcionou aprendizagens significativas sobre a segurança contra incêndios em veículos elétricos. Este trabalho pretendeu despertar os *stakeholders*, designadamente o ecossistema científico, para o tema e que merece continuar com desenvolvimento de propostas concretas envolvendo fabricantes e legisladores. Foram aprofundados conhecimentos sobre as características das baterias de íões de lítio, como o fenómeno do *runaway* térmico, e os riscos únicos que estas representam em cenários confinados. Este trabalho permitiu ainda explorar a aplicação de ferramentas de análise de risco, como Fault Tree Analysis e Event Tree Analysis, que se revelaram fundamentais para mapear

cenários potenciais e propor soluções eficazes.

A análise comparativa com legislações internacionais evidenciou práticas que podem servir de modelo para o contexto português, sublinhando a necessidade de adaptação das normativas nacionais. O estudo contribuiu para uma compreensão mais ampla das medidas preventivas e corretivas que podem mitigar os riscos, reforçando a importância da colaboração entre especialistas, legisladores e operadores de infraestruturas.

Na Tabela seguinte, são apresentadas propostas com base no trabalho desenvolvido:

Área de Intervenção	Proposta	Impacto Esperado
Infraestruturas	Implementação de sistemas de drenagem e retenção para capturar águas contaminadas com produtos químicos tóxicos.	Reduz contaminação do solo e águas subterrâneas.
	Integração de sistemas de ventilação com sensores inteligentes para dissipação rápida de calor e gases tóxicos.	Aumenta a segurança e a capacidade de intervenção.
Tecnologias de Prevenção	Instalação de sistemas automáticos de deteção e extinção específicos para <i>runaway</i> térmico em baterias.	Melhora a rapidez e eficiência na contenção de incêndios.
	Implementação de sensores de monitorização contínua para prever <i>runaway</i> térmico em baterias.	Permite respostas antecipadas, prevenindo incidentes.
Preparação e Capacitação	Formação avançada para bombeiros em técnicas de combate a incêndios de baterias de lítio e uso de equipamentos de proteção específica.	Reduz riscos para as equipas de emergência.
	Formação e sensibilização da sociedade e dos técnicos.	Consciencialização sobre boas práticas e procedimentos a adotar.
Regulamentação e Normas	Desenvolvimento de normas técnicas para design de parques subterrâneos adaptados a veículos elétricos, incluindo pontos de carregamento.	Minimiza riscos estruturais e ambientais.
Gestão de Resíduos	Criação de protocolos para recolha, transporte e reciclagem de baterias danificadas pós-incêndio.	Reduz impactos ambientais a longo prazo.

Análise de Riscos	Utilização de ferramentas como Fault Tree Analysis e Event Tree Analysis para mapear causas e consequências de incêndios em veículos elétricos.	Fornece uma base para estratégias de mitigação específicas.
Investigação e Desenvolvimento	Promoção de investigações sobre novas tecnologias de extinção adaptadas a incêndios de VE em espaços confinados.	Facilita soluções inovadoras para o combate ao problema.

Tabela 2 - Propostas e impacto esperado

5. Conclusões

A presente dissertação demonstra que os incêndios em veículos elétricos requerem uma reformulação significativa dos sistemas de segurança nos parques de estacionamento subterrâneos. Estes incêndios representam um problema emergente, cuja resolução exige uma abordagem multidimensional e integrada.

Os estudos analisados evidenciam que os riscos associados aos VE não podem ser mitigados eficazmente com as infraestruturas e práticas atualmente em vigor. Neste sentido, a aplicação de ferramentas de análise de risco, como a Fault Tree Analysis e a Event Tree Analysis, revela-se essencial para identificar vulnerabilidades críticas e prever cenários de propagação do fogo em ambientes confinados. Estas abordagens constituem uma base científica indispensável para o planeamento de estratégias de mitigação eficazes.

A implementação de sistemas tecnológicos avançados, como câmaras térmicas, sensores de gases tóxicos e sprinklers automáticos, é indispensável para aumentar a resiliência dos parques de estacionamento perante incidentes desta natureza. Adicionalmente, torna-se imprescindível a revisão das normativas de segurança contra incêndios, adaptando-as às especificidades dos VE e das suas baterias de iões de lítio. Medidas como o reforço estrutural dos parques, a criação de zonas específicas para veículos elétricos e a melhoria dos sistemas de ventilação e desenfumagem são cruciais para prevenir cenários de catástrofe.

Este trabalho reforça também a necessidade de colaboração entre operadores de parques de estacionamento, fabricantes de veículos elétricos e entidades reguladoras. A definição de diretrizes claras e a capacitação especializada das equipas de emergência são fatores determinantes para mitigar os riscos associados à mobilidade elétrica.

Para tal, as necessidades do desenvolvimento de trabalhos futuros neste âmbito são fundamentais.

Por fim, a transição para uma mobilidade sustentável não deve comprometer a segurança das pessoas nem das infraestruturas. Assim, futuras investigações devem explorar soluções mais eficazes para o combate a incêndios em baterias de lítio, bem como avaliar o impacto ambiental e as estratégias de reciclagem dos resíduos gerados por estes incêndios. A inclusão contínua de análises de risco na gestão de segurança permitirá monitorizar e adaptar as estratégias de forma proativa. Este estudo constitui um contributo significativo para a compreensão dos desafios e das oportunidades associados aos VE, apontando para um futuro mais seguro e adaptado à mobilidade elétrica em ambientes urbanos densamente ocupados.

6. Trabalhos futuros

Futuros estudos devem explorar a utilização de ferramentas de análise de risco para avaliar a eficácia de estratégias de mitigação em diferentes configurações de parques de estacionamento subterrâneos. Adicionalmente, a integração de dados em tempo real provenientes de sistemas de monitorização poderá melhorar a precisão das análises de risco

7. Bibliografia

- ARUP. (2023). *T0194 – Covered car parks - fire safety guidance for electric vehicles*. Office for Zero Emission Vehicles (OZEV), London.
- BCSD - Portugal. (2022). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Obtido em 28 de fevereiro de 2024, de ODS 7: <https://ods.pt/objectivos/7-energias-renovaveis/>
- Bete, T., Conti, D., Pereira Mizutani, M. N., & Nunes de Oliveira, C. (2020). Veículos Sustentáveis para a Mobilidade Urbana nas Cidades do Futuro. *International Journal of Professional Business*, 5 (2), 163-178.
- CBE, C. U. (1994). *The CBE Manual for Authors, Editors and Publishers*. Reino Unido - Cambridge.
- EV VOLUMES. Obtido em: <https://www.ev-volumes.com/>, 2024
- The Brussels Times. (14 de Fevereiro de 2022). *The Brussels Times*. Obtido de The Brussels Times: <https://www.brusselstimes.com/206288/electric-car-fire-in-central-brussels-leads-to-restaurant-evacuation>
- Yuqing Chen, Y. K. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards,. *Journal of Energy Chemistry*.
- *Bicycle Industry: Growing at Speed European Mobility Atlas 2021*. (2021). <https://bit.ly/2JbJsFK>;
- Bisschop, R., Willstrand, O., & Rosengren, M. (2020). Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events. *Fire Technology*, 56(6), 2671–2694. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01038-1>
- Brzezinska, D., & Bryant, P. (2022). Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions. In *Energies* (Vol. 15, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15020649>
- Burlacu, D., Anghel, I., Popa, C., & Cășaru, I. (2018). Fire Safety Evaluation of an Underground Car Park Using Numerical Simulation. *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 14(2), 1–12. <https://doi.org/10.2478/mmce-2018-0003>
- Cui, Y., & Liu, J. (2021). Research progress of water mist fire extinguishing technology and its application in battery fires. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 149, pp. 559–574). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.003>
- DHNET - <https://www.dhnet.be/regions/bruxelles/2022/02/12/bruxelles-une-voiture-electrique-prend-feu-dans-un-parking-souterrain-5SBRT2IA6NAVLKIRGGNWJDZF7M/>
- Dirkkpietruschkaa, V., & Editors, B. (n.d.). *iCity. Transformative Research for the Livable, Intelligent, and Sustainable City*.
- *Ecology*. (2023). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023>
- Energy Agency, I. (2024). *Global EV Outlook 2024 Moving towards increased affordability*. www.iea.org

- Fontelles, M. J., Simões, M. G., Farias, S. H., Garcia, R., & Fontelles, S. (2024). *Metodologia da pesquisa científica: diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa 1 scientific research methodology: guidelines for elaboration of a research protocol*.
- For the Department for Transport, A. (n.d.). *Covered car parks: fire safety guidance for electric vehicles*.
- Huang, Y., Wu, Y., & Liu, B. (2021). Experimental investigation into the use of emergency spray on suppression of battery thermal runaway. *Journal of Energy Storage*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102546>
- Huang, Z., Liu, P., Duan, Q., Zhao, C., & Wang, Q. (2021). Experimental investigation on the cooling and suppression effects of liquid nitrogen on the thermal runaway of lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 495. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229795>
- Johansson, N., & Svensson, S. (2019). Review of the Use of Fire Dynamics Theory in Fire Service Activities. In *Fire Technology* (Vol. 55, Issue 1, pp. 81–103). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0774-3>
- Kerber, S., Regan, J. W., Horn, G. P., Fent, K. W., & Smith, D. L. (2019). Effect of Firefighting Intervention on Occupant Tenability during a Residential Fire. *Fire Technology*, 55(6), 2289–2316. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00864-2>
- Król, M., & Król, A. (2021). *The risks related to parking electric vehicle in underground car parks*.
- Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., & Mellander, B. E. (2014). Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *Journal of Power Sources*, 271, 414–420. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027>
- Mao, B., Chen, H., Jiang, L., Zhao, C., Sun, J., & Wang, Q. (2020). Refined study on lithium ion battery combustion in open space and a combustion chamber. *Process Safety and Environmental Protection*, 139, 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.037>
- Ouyang, D., Chen, M., Huang, Q., Weng, J., Wang, Z., & Wang, J. (2019). A Review on the thermal hazards of the lithium-ion battery and the corresponding countermeasures. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app9122483>
- República Portuguesa. (2008). *Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios*. Diário da República, 1.ª série, N.º 250.
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. In *Fire Technology* (Vol. 56, Issue 4, pp. 1361–1410). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- The Drive - <https://www.thedrive.com/news/32268/porsche-confirms-taycan-ev-caught-fire-in-us-owners-garage>
- WEF. World Economic Forum, Obtido em weforum.org, 2024

- Zhang, L., Duan, Q., Liu, Y., Xu, J., Sun, J., Xiao, H., & Wang, Q. (2021). Experimental investigation of water spray on suppressing lithium-ion battery fires. *Fire Safety Journal*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103117>
- Zhang, L., Duan, Q., Meng, X., Jin, K., Xu, J., Sun, J., & Wang, Q. (2022). Experimental investigation on intermittent spray cooling and toxic hazards of lithium-ion battery thermal runaway. *Energy Conversion and Management*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115091>