

Relatório Técnico:

Proteção Passiva de Parques Solares Fotovoltaicos contra Incêndios Rurais

- Parte 1 – Resistência ao fogo dos painéis solares-

CENTRO DE ESTUDOS SOBRE INCÊNDIOS FLORESTAIS

ASSOCIAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA AERODINÂMICA INDUSTRIAL

LABORATÓRIO ASSOCIADO DE ENERGIA, TRANSPORTES E AERONÁUTICA

23 de julho de 2025

Relatório Técnico: Proteção Passiva de Parques Solares Fotovoltaicos contra Incêndios Rurais

- Parte 1: Resistência ao fogo dos painéis solares -

Âmbito/Projecto	Relatório Técnico: Proteção Passiva de Parques Solares Fotovoltaicos contra Incêndios Rurais		
Data	Maio de 2025	Versão	Final
Nome do ficheiro	Parques_Fotovoltaicos_Incendios_Rurais_ADAI_PARTE1.pdf	Tipo de documento	Restrito

Coordenador do projeto	Domingos Xavier Viegas (xavier.viegas@dem.uc.pt)
Coordenador do documento	Miguel Almeida (miguelalmeida@adai.pt)
Autores	Miguel Almeida, Thiago Barbosa, MohammadReza Modarres, Luís Mário Ribeiro, Tiago Rodrigues, Domingos Xavier Viegas
Revisor(es)	Domingos Xavier Viegas, Luís Mário Ribeiro, Tiago Rodrigues

Resumo	O presente relatório apresenta os resultados de um programa de estudos que teve como principal objetivo a análise científica e a definição de boas práticas tendo em vista a gestão do risco e a proteção de parques solares fotovoltaicos contra incêndios rurais. O principal foco de análise foi a avaliação da vulnerabilidade destes parques, especificamente a determinação da função de vulnerabilidade dos painéis solares fotovoltaicos e da distância mínima de segurança que deve existir entre os painéis e a área envolvente, que poderá ser atingida por uma frente de chama, e que poderá ser associada à largura mínima da faixa de gestão de combustíveis na envolvente do parque. Tendo em consideração as obrigatoriedades legais descritas no decreto-lei 82/2021 de 13 de outubro considerou-se que a faixa de gestão de combustíveis deve ser composta por um anel de ocupação compatível, adjacente ao parque com uma largura mínima de 80m, designado por “Zona 2”, e um anel exterior, correspondente a “Zona 3”, com uma largura mínima de 20m, isento de painéis solares fotovoltaicos ou outros equipamentos similares, e com uma gestão de combustíveis, que torne improvável a progressão do fogo por transferência direta de calor. Neste relatório, são ainda apresentados resultados e definidas práticas de mitigação de impactos decorrentes da formação de focos secundários por projeção de partículas incandescentes para o interior do parque e sua área envolvente.
--------	--

Este documento está preparado para ser impresso em frente e verso

Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

Conteúdo

Declaração de exoneração de responsabilidade.....	6
Sumário executivo	6
Parte 1 - Resistência ao fogo dos painéis solares	7
1. Introdução.....	7
2. Abordagem técnica.....	9
2.1. Situações de ignição de painéis fotovoltaicos devido a incêndios rurais.....	9
2.2. Cenários analisados.....	9
2.2.1. Caracterização do interior dos parques fotovoltaicos	10
2.2.2. Caracterização da envolvente ao parque fotovoltaico	11
2.3. Determinação da função de vulnerabilidade.....	11
2.3.1. Ensaios com cone calorimétrico	11
2.3.2. Cálculo do calor incidente nas amostras.....	12
2.4. Cálculo da distância mínima de segurança (DMS).....	12
2.4.1. DMS para cenário de exposição a uma frente de chamas.....	13
2.4.2. DMS para cenário de fogo sob o painel.....	14
2.5. Ensaios de validação	15
2.5.1. Cenário de exposição a uma frente de chamas	15
2.5.2. Cenário de fogo sob o painel	16
3. Determinação da função de vulnerabilidade.....	17
3.1. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios	17
3.1.1. Ensaios com cone calorimétrico	17
3.1.2. Função de vulnerabilidade	18
3.2. Distância mínima de segurança.....	19
3.2.1. DMS por exposição a frente de chamas.....	19
3.2.2. DMS para cenário de fogo sob o painel.....	19
3.3. Ensaios de validação	20
3.3.1. Cenário de exposição a uma frente de chamas	20
3.3.2. Cenário de fogo sob os painéis	21
3.4. Discussão de resultados.....	24
4. Conclusão (Parte 1)	24
5. Referências	24

Declaração de exoneração de responsabilidade

O presente documento foi realizado com base em pesquisa bibliográfica de publicações de referência, em trabalhos de modelação analítica e numérica e em ensaios laboratoriais, que a equipa da ADAI realizou sobre os temas e assuntos aqui abordados. Os autores utilizaram as suas melhores competências e a experiência de largos anos de investigação na temática dos incêndios rurais para abordar os assuntos aqui expostos.

Dada a imprevisibilidade dos fenómenos associados aos incêndios rurais, sobretudo em condições extremas, não poderão ser assacadas aos autores quaisquer responsabilidades pelo uso da informação aqui contida, nem pela eventual reduzida eficiência, em situações pontuais, das sugestões aqui apresentadas.

Sumário executivo

A instalação de parques de painéis solares fotovoltaicos em espaços agroflorestais constitui uma oportunidade relevante para a produção de energia renovável, mas levanta questões críticas no que respeita à gestão do risco de incêndio rural. A ausência da inclusão de orientações específicas no atual quadro legislativo, nomeadamente no Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR), compromete a harmonização entre a segurança passiva contra incêndios rurais e a utilização eficiente do território por este setor económico de tão grande importância para a sociedade.

A pedido da Lightsource bp (LSBP), o Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF) da ADAI (Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, Universidade de Coimbra) desenvolveu um estudo técnico-científico com o objetivo de fundamentar critérios para a conceção e implementação de faixas de gestão de combustíveis (FGC) em torno de parques solares fotovoltaicos, considerando a sua vulnerabilidade ao fogo e o contexto legal vigente, em particular o Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro.

Este estudo contempla:

Parte 1 – Resistência ao fogo dos painéis solares

- A caracterização técnico-científica do risco de ignição e propagação do fogo em parques fotovoltaicos, com base em ensaios laboratoriais e modelação numérica.

Parte 2 – Proposta de boas práticas de zonagem e gestão de um parque fotovoltaico

- A proposta de uma zonagem funcional da faixa de 100 m legalmente exigida, integrando o conceito de “ocupação compatível” com painéis solares, desde que observados critérios técnicos de segurança.
- A apresentação de boas práticas de conceção, gestão e acessibilidade para garantir a segurança estrutural e operacional dos parques em caso de incêndio.

Os resultados indicam que é possível compatibilizar a presença de painéis solares em parte da faixa de gestão de combustíveis, sem comprometer os objetivos de proteção passiva, desde que respeitados critérios técnicos adequados de altura dos painéis, carga de combustíveis e acessibilidade. O presente relatório fornece, assim, uma base científica sólida para a formulação de propostas junto das autoridades competentes, contribuindo para a viabilização técnica e regulamentar dos projetos da LSBP.

Parte 1 - Resistência ao fogo dos painéis solares

1. Introdução

A crescente aposta nas energias renováveis, e em particular na energia solar fotovoltaica, tem conduzido à instalação de parques de painéis solares fotovoltaicos em vastas áreas do território nacional, muitas delas inseridas em espaços agroflorestais. Esta realidade coloca desafios significativos no que respeita à compatibilização entre a produção de energia elétrica e a necessidade de prevenção e mitigação do risco de incêndio rural, num contexto regulatório ainda com carências de clarificação no que respeita às exigências aplicáveis à gestão de combustíveis nestas infraestruturas.

Face a essa limitação, a empresa *Lightsource Development Portugal, Unipessoal, Lda.* (LSBP) solicitou ao Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF) da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI, Universidade de Coimbra) a elaboração de um estudo técnico com o objetivo de apoiar, com base científica, um conjunto de propostas a apresentar às entidades competentes. Estas propostas visam garantir a viabilização técnica e financeira da implantação dos Parques, assegurando simultaneamente a segurança contra incêndios rurais. O presente documento corresponde à materialização dessa solicitação, assumindo-se como um parecer técnico fundamentado, aberto à inclusão de alterações que venham a ser consensualizadas com os diversos intervenientes, eventualmente decorrentes de fatores que não tenham sido considerados no presente estudo.

O enquadramento legal que rege a gestão de combustíveis florestais em Portugal é atualmente definido pelo Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro, o qual estabelece o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR). Entre os conceitos relevantes deste diploma destaca-se a definição de “Gestão de combustível”, entendida como a criação e manutenção da descontinuidade horizontal ou vertical da carga combustível, através da modificação ou remoção parcial ou total da biomassa vegetal. Importa também referir o conceito de “Ocupação compatível”, que permite usos alternativos do solo em faixas de gestão de combustível, desde que conciliáveis com os objetivos de redução da ignição e propagação do fogo, e que simultaneamente gerem valor para os proprietários ou comunidades. O reconhecimento de ocupação compatível em substituição da remoção de combustível carece de inscrição dessa ocupação nos programas sub-regionais de ação.” (nº6 do Art. 47º do DL82/2021).

A rede secundária de faixas de gestão de combustível (RSFGC) assume um papel central na proteção de infraestruturas e bens sensíveis, nomeadamente na redução dos efeitos da passagem de incêndios, no isolamento de potenciais focos de ignição e na proteção de formações florestais e agrícolas de valor especial. O artigo 49.º do referido diploma legal estabelece a obrigatoriedade de gestão de combustível numa faixa envolvente com uma largura padrão de 100 metros em torno de várias tipologias de infraestruturas, incluindo expressamente as instalações de produção e armazenamento de energia elétrica, categoria em que se enquadram os parques fotovoltaicos.

Complementarmente, o artigo 60.º refere que, embora existam condicionamentos à edificação em áreas prioritárias de prevenção e segurança (APPS) – as áreas com perigosidade alta e muito alta no âmbito dos incêndios rurais –, estão previstas exceções para as instalações de produção e armazenamento de energia elétrica, o que reforça a necessidade de clarificar os requisitos técnicos aplicáveis a estas infraestruturas, sem comprometer os objetivos da prevenção de incêndios.

O presente relatório tem como objetivos principais:

- Dar suporte científico à definição dos requisitos exigíveis à implementação e gestão de parques fotovoltaicos, nomeadamente no que respeita ao dimensionamento e às características das faixas de gestão de combustíveis na sua área envolvente.
- Avaliar a perturbação que estas infraestruturas poderão representar para as autoridades de gestão do risco de incêndio e propor medidas de mitigação, tanto normativas como físicas.
- Fundamentar tecnicamente a utilização de parte da faixa de gestão de combustível como “ocupação compatível”, quando ocupada por painéis fotovoltaicos.

Para atingir estes objetivos, foi delineado um plano de trabalho estruturado que integra duas tarefas centrais:

- **T1:** Estudo de enquadramento dos parques fotovoltaicos no SGIFR, com proposta de critérios para a largura mínima das Faixas de Gestão de Combustível (FGC), considerando a perigosidade, o declive e o tipo de vegetação na envolvente, assim como a necessidade de estruturas de suporte, tais como os acessos viários internos.
- **T2:** Fundamentação para a consideração da ocupação interior das FGC com painéis solares usando a figura legal de “ocupação compatível”.

A estrutura do presente relatório acompanha a lógica das tarefas realizadas. Após este capítulo introdutório, seguem-se os capítulos dedicados à descrição do contexto legal e técnico e à metodologia utilizada na realização do estudo (Capítulo 2), à descrição e análise dos resultados obtidos (Capítulo 3), à definição dos critérios técnicos propostos para as FGC (Capítulo 4) e, por fim, às conclusões (Capítulo 5).

Este trabalho pretende constituir um contributo técnico e científico relevante para o desenvolvimento de soluções eficazes, sustentáveis e ajustadas à realidade dos espaços agroflorestais portugueses, promovendo a integração harmoniosa entre a produção de energia renovável e a segurança contra incêndios rurais.

2. Abordagem técnica

Este estudo tem como cenário de referência a ignição de um painel solar fotovoltaico, com potencial de propagação do fogo aos painéis adjacentes na mesma fila. Em situações extremas, essa propagação pode estender-se a filas contíguas, culminando na generalização do incêndio a todo o parque fotovoltaico. Cada painel é, por conseguinte, considerado como uma unidade base para o início da ignição e subsequente transmissão do fogo a outras áreas e elementos do parque. É, assim, a célula basilar da ignição inicial e da transição do fogo ao longo ou entre as filas de painéis.

A análise centra-se, por isso, nas condições de ignição de painéis individuais e na quantidade de calor libertado durante a sua combustão, de forma isolada ou em grupo, com o objetivo de avaliar os danos potenciais resultantes de um incêndio rural nas imediações de um parque fotovoltaico.

Este capítulo estabelece os pressupostos técnicos que sustentam os capítulos seguintes, focados na apresentação dos resultados do estudo e na definição de boas práticas de gestão do risco de incêndios em parques fotovoltaicos.

2.1. Situações de ignição de painéis fotovoltaicos devido a incêndios rurais

Foram inicialmente consideradas quatro possibilidades para ignição de painéis fotovoltaicos na sequência de um incêndio rural:

1. Exposição a uma frente de chamas na proximidade do parque, com transferência de calor predominantemente horizontal, por radiação e por convecção.
2. Deposição de partículas incandescentes (fagulhas) sobre os painéis, provenientes de uma frente de chamas próxima do parque.
3. Propagação do fogo sob os painéis, resultantes de uma frente de chamas próxima ou da formação de focos secundários resultantes de fagulhas que caíram no interior do parque fotovoltaico – neste caso, a transferência de calor é maioritariamente vertical.
4. Combustão de painéis adjacentes ou próximos, assim como de outros elementos antropogénicos existentes no interior do parque.

Como se abordará no Capítulo 3, a ignitabilidade¹ e a sustentabilidade² do fogo nos painéis são reduzidas. Por este motivo, excluiu-se do presente estudo a hipótese de ignição por fagulhas caídas diretamente sobre os painéis (2), até porque estes carecem de zonas angulares propícias à acumulação de partículas incandescentes – sendo o mais provável que estas escorreguem ou sejam arrastadas pelo vento. De igual forma, dada a baixa sustentabilidade do fogo nos painéis fotovoltaicos, desconsidera-se a propagação do fogo entre painéis (4), assumindo-se que o fogo apenas poderá progredir num conjunto de painéis, quando apoiado por uma fonte de calor suplementar como um fogo a desenvolver-se num leito de herbáceas no interior do parque.

Assim, a análise efetuada neste estudo incide exclusivamente sobre:

- Situação 1 – exposição dos painéis a uma frente de chamas na proximidade do parque;
- Situação 3 – existência de um foco de incêndio sob os painéis.

2.2. Cenários analisados

Esta secção descreve as áreas típicas, interiores e envolventes, dos parques fotovoltaicos, que servem de referência ao longo do presente estudo. Embora cada parque possua características específicas, considera-se que os parâmetros aqui apresentados são representativos do universo dos parques fotovoltaicos existentes.

¹ A “ignitabilidade” é um parâmetro da inflamabilidade que representa a facilidade de ignição, o que determina a probabilidade de um novo foco de incêndio que pode interagir, ou não, com a fonte de calor que lhe deu origem.

² A “sustentabilidade” é um parâmetro da inflamabilidade que está associado à duração da combustão – materiais com maior sustentabilidade têm maior propensão para ignificar os combustíveis vizinhos, sustentando a propagação do fogo.

2.2.1. Caracterização do interior dos parques fotovoltaicos

Segundo dados fornecidos pela Lightsource bp, a configuração interna dos parques varia consoante as condições do local de instalação. No entanto, os painéis solares são organizados em várias filas, cujas características típicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões típicas dos painéis solares e respetivos espaçamentos (valores fornecidos pela Lightsource bp).

Elemento	Dimensões típicas
Painel individual	Comprimento: 2,38 m Largura: 1,13 m a 1,30 m Altura mínima desde o chão: 0,5 m Altura média desde o chão: 0,8 m Inclinação (<i>tilt</i>): de 0° (horizontal) a 25°
Filas de painéis	Comprimento: 35 m a 300 m, sendo a mediana de 120 m Largura: 1 painel (2,38 m) ou 2 painéis (4,8 m) Espaçamento entre painéis: 0,02 m
Parque fotovoltaico	Dimensões dos parques muito variáveis Separação mínima entre filas de painéis pequenas (<40 m): 0,5 m Separação média entre filas de painéis: 3 m

Para efeitos de modelação do comportamento do fogo e da transferência de calor no interior do parque, adotaram-se os valores médios indicados na Tabela 2, esquematizados na Figura 1.

Tabela 2. Valores médios utilizados para modelação da configuração dos painéis fotovoltaicos.

Elemento	Dimensões típicas
Painel individual	Comprimento: 2,4 m Largura: 1,30 m Altura desde o chão: 0,5 m
Filas de painéis	Comprimento: 120 m Largura: 2 painéis (4,8 m) Espaçamento entre painéis: 0 m (juntos quando na posição horizontal)
Parque fotovoltaico	Separação entre filas de painéis: 3 m

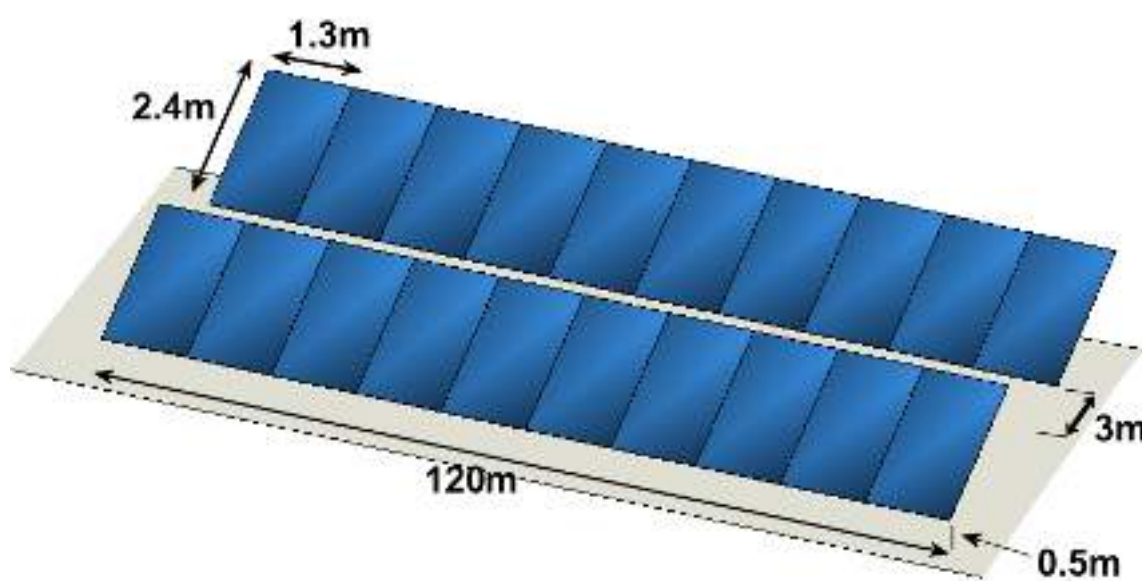


Figura 1. Representação esquemática das dimensões e espaçamentos dos painéis solares considerados.

2.2.2. Caracterização da envolvente ao parque fotovoltaico

Seguindo a metodologia do Despacho n.º 8591/2022, de 13 de julho, relativo à resistência de edifícios à passagem do fogo, foram definidos quatro cenários de combustíveis com base nos modelos NFFL (Anderson, 1982) cujas principais características se apresentam de seguida:

- **C1** – Terreno com herbáceas até 30 cm de altura; carga de combustível $\approx 0,17 \text{ kg/m}^2$ (modelo NFFL 1);
- **C2** – Terreno com matos ou árvores jovens muito densas até 2 m de altura; carga de combustível $\approx 3,59 \text{ kg/m}^2$ (modelo NFFL 4);
- **C3** – Terreno com herbáceas até 30 cm de altura, numa área com árvores (modelo NFFL 1 + árvores);
- **C4** – Terreno com matos ou árvores jovens muito densas até 2 m de altura, numa área com árvores adultas; (modelo NFFL 4 + árvores).

Para cada cenário, o fluxo de calor libertado foi estimado considerando cinco declives do terreno: 0°, 10°, 20°, 30° e 40°. No total, foram analisados 20 cenários de propagação do fogo (4 modelos de combustível $\times$ 5 declives), cujos resultados são apresentados no Capítulo 3.

2.3. Determinação da função de vulnerabilidade

2.3.1. Ensaios com cone calorimétrico

Para avaliar a ignitabilidade e o comportamento térmico dos painéis fotovoltaicos perante uma fonte de calor, foram realizados ensaios laboratoriais com um cone calorimétrico com a potência elétrica de 2600 W. As amostras (painéis novos, tipo vidro-vidro, marca *Onsolar*) tinham $9 \times 9 \text{ cm}^2$ e foram posicionadas numa superfície cerâmica, a 9 cm da base do cone, que origina um fluxo de calor de $5,5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ (Figura 2).

A temperatura foi monitorizada através de um termopar tipo *K*, ligado a um módulo *National Instruments 9213*, com incerteza de $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ até $800 \text{ }^\circ\text{C}$ (Barbosa et al., 2022, 2023a). Foram realizados seis ensaios nas mesmas condições.

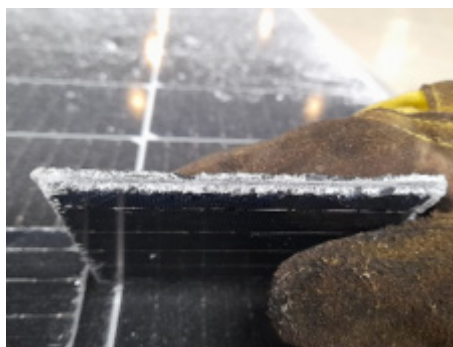


Figura 2. Amostra de painel fotovoltaico inserida no cone calorimétrico.

Um detetor de gases (*Testo 350*, caudal de $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) foi instalado na chaminé de exaustão (Figura 3), medindo as concentrações de NO , NO_2 , CO e H_2 . Apenas os valores de CO foram considerados relevantes para este estudo, como será demonstrado de seguida. Os ensaios foram interrompidos quando cada amostra apresentava combustão com presença de chama. Ao longo dos ensaios foram registados os momentos em que se observaram alterações físicas visíveis da amostra.



Figura 3. Cone calorimétrico com sonda de amostragem de gases instalada.

2.3.2. Cálculo do calor incidente nas amostras

Os valores do calor incidente em cada amostra usada nos ensaios com cone calorimétrico foram determinados com base nos valores de temperatura (T_{fonte}) em quatro momentos críticos:

- 1) aumento súbito da libertação de CO;
- 2) fratura do vidro da amostra;
- 3) emissão visível de fumos; e
- 4) ignição.

O calor incidente na amostra ($q_{incidente}$) em cada momento foi calculado a partir da Equação [1].

$$q_{incidente} = \frac{\varepsilon\tau\sigma T_{fonte}^4 + h(T_{fonte} - T_{ambiente})}{\alpha} \quad [1]$$

Os valores dos parâmetros de base usados, relativos à equação anterior foram os seguintes:

- Emissividade (ε) = Absortividade (α) $\simeq 0.9$
- Transmissividade (τ) $\simeq 1$
- Constante de Stefan-Boltzmann (σ) $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
- Coeficiente de convecção para a transferência de calor (h) $= 15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
- Temperatura ambiente ($T_{ambiente}$) $= 25^\circ\text{C}$ (298,15K)

2.4. Cálculo da distância mínima de segurança (DMS)

Como referido anteriormente, foram consideradas duas situações quanto ao risco de ignição dos painéis em contexto de incêndio rural, nomeadamente: 1) exposição a uma frente de chamas (Figura 4a), e 2) propagação do fogo sob os painéis (Figura 4b) no decurso, por exemplo, do surgimento de um foco secundário no interior do parque.

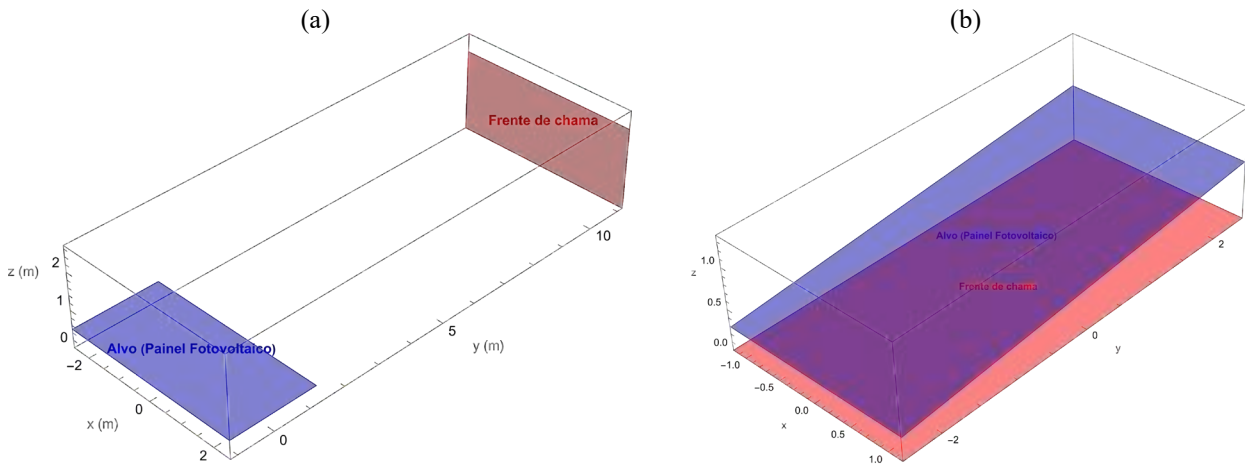


Figura 4. Situações de exposição dos painéis ao fogo: a) frente de chamas próxima; b) fogo sob os painéis.

2.4.1. DMS para cenário de exposição a uma frente de chamas

O cálculo da distância mínima de segurança entre o painel fotovoltaico e uma frente de chamas foi efetuado para cada um dos 20 cenários da envolvente descritos na Secção 2.2.2. Considerou-se que a localização da frente de chamas corresponde ao limite exterior da faixa de gestão de combustíveis e a DMS representa a largura mínima a garantir nessa faixa. Este cálculo foi realizado para garantir a integridade dos painéis fotovoltaicos, considerando o painel localizado no plano XY e a frente de chamas no plano XZ (Figura 4a).

O calor total incidente (q_{total}) no painel resulta da soma do calor radiativo ($q_{radiativo}$) e convectivo ($q_{convectivo}$), calculados através das equações [2] a [4], com resultados em kW/m².

$$q_{total} = q_{radiativo} + q_{convectivo} \quad [2]$$

$$q_{radiativo} = \varepsilon \tau \beta \sigma T_{fonte}^4 F_{12} \quad [3]$$

$$q_{convectivo} = 21,54 \omega (1 + 0,05 w_f) H^{-0,3} (T_{fonte} - T_{ambiente}) \quad [4]$$

Os valores dos parâmetros usados nas equações anteriores foram os seguintes:

- Emissividade (ε) $\simeq 0.9$
- Transmissividade (τ) $\simeq 1$
- Inclinação do painel (β) = entre 0° e 25°
- Temperatura da fonte (T_{fonte}) = 933,15 K
- Temperatura ambiente ($T_{ambiente}$) = 298,15 K
- Fator de visão (F_{12}) - fração da radiação que incide no painel e que é variável [adimensional]
- Fator de correção (ω) [adimensional]
- Carga de combustível (w_f) [kg/m²]
- Altura do alvo relativamente a base da frente de chamas (H) [m]
- Declive do terreno (ζ) = 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, consoante o cenário analisado

A Equação 5 que se apresenta de seguida é um modelo empírico que permite calcular o comprimento da chama l_c a partir da carga de combustível w_f e do declive do terreno ζ o qual assume os valores 0°, 10°, 20°, 30° ou 40°, consoante o cenário analisado

$$l_c = 0,69w_f^{0,753} \exp(0,0283w_f^{-0,669}\zeta) \quad [5]$$

A determinação do comprimento da chama l_c permite determinar a altura da chama A_c para os diferentes declives ζ , através da equação [6] que se descreve de seguida.

$$A_c = l_c \cos\left(\frac{\zeta^3 \times 8,57 \times 10^{-5}}{1 + \zeta^3 \times 5,46 \times 10^{-5}}\right) \quad [6]$$

A distância mínima de segurança foi calculada a partir dos parâmetros anteriormente descritos, através da relação [7].

$$DMS = f(q_{total}, L, w_f, \zeta, l_c, A_c) \quad [7]$$

Seguindo a metodologia do Despacho n.º 8591/2022, de 13 de julho, relativo à resistência de edifícios à passagem do fogo, os resultados da DMS calculadas para áreas prioritárias de prevenção e segurança foram majorados em 25%. Sintetizando, na análise efetuada no presente estudo, a DMS, que representa a largura mínima da faixa de gestão de combustíveis na área isenta de painéis fotovoltaicos, é calculada a partir da Equação [8] para a situação em que o parque está situado em APPS e através da Equação [7], quando se localiza fora de APPS.

$$DMS_{APPS} = 1,25 \times DMS \quad [8]$$

2.4.2. DMS para cenário de fogo sob o painel

Esta análise permite determinar a distância vertical necessária entre o painel e o solo (base do leito de combustível) para manter a integridade do painel. Distingue-se claramente da efetuada na Secção 2.4.1 por ter uma componente de transferência de calor por convecção que é dominante, enquanto na situação anterior predominam os processos de transferência de calor por radiação.

A determinação da transferência de calor na situação em que o painel está sobre o foco de incêndio foi empírica, baseando-se nos resultados de ensaios laboratoriais. Foram realizados seis ensaios no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais da ADAI/UC, usando palha com cargas de 0,6 kg/m² e 1,0 kg/m². Foi medido o fluxo de calor total incidente a diferentes alturas com sensor do modelo *SBG01* fabricado pela *Hukseflux Thermal Sensors*, com uma exatidão de $\pm 0,1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Os dados permitiram obter um modelo para determinação do calor incidente em função da altura do alvo para diferentes cargas de palha. A Equação [9] relaciona o calor incidente no sensor a diferentes alturas e a carga de combustível. Este cálculo permite determinar a altura mínima a que os painéis devem estar do solo e a altura máxima das herbáceas secas no parque fotovoltaico, considerando a função de vulnerabilidade obtida nos ensaios com o cone calorimétrico (Secções 2.3 e 3.1).

$$Q_T(f, w_f) = 58,092 \times w_f^{2,22} \times e^{-0,891 \times w_f^{1,33} \times H} \quad [9]$$

2.5. Ensaios de validação

Para validar os resultados numéricos e laboratoriais à escala real, foram realizados ensaios com painéis inteiros sobre estruturas metálicas ajustáveis, reproduzindo os dois cenários anteriormente descritos:

- aproximação de uma frente de chamas;
- propagação do fogo sob os painéis.

As observações incluíram libertação de fumos, danos estruturais (fraturas, deformações, fusão de materiais) e ocorrência de ignição. Quando se verificava ignição, mediu-se o tempo em que a chama se mantinha após remoção da fonte de calor, a fim de estimar a sustentabilidade da combustão. Registou-se igualmente a massa inicial e final dos painéis para cálculo da consumibilidade.

2.5.1. Cenário de exposição a uma frente de chamas

Embora o suporte metálico permitisse variar a inclinação (*tilt*) dos painéis, foi usado um ângulo fixo de 25°, o que corresponde à condição máxima de exposição do painel à radiação, dentro da gama de inclinações descrita na Secção 2.2.1. Sendo amovível, o suporte permitiu também alterar a distância dos painéis à frente de chamas. As fotografias da Figura 5 dão um panorama geral destes ensaios.



Figura 5. Fotografias dos ensaios de validação com frente de chamas próxima: a) frente de chamas a 3,0m; b) painéis a 0,2m do leito de combustíveis.

A frente de chamas foi estabelecida com mato seco, disposto em caixas de rede metálica com um comprimento total de 3 m ou 4 m e uma largura de 1m, o que permitiu criar uma frente de chamas de até 6 m de altura e 1 m de profundidade. A carga de combustível variou ao longo dos ensaios permitindo obter chamas com intensidades diferentes. No último ensaio, em que os painéis estavam mais próximos da frente de chamas, aumentou-se a sua altura relativamente ao chão, de forma a tentar captar mais calor convectivo, o qual aumenta com a proximidade entre a fonte emissora e o alvo de incidência do calor. A Tabela 3 resume as condições dos ensaios de validação realizados.

Tabela 3. Parâmetros dos ensaios de validação com frente de chamas próxima.

Parâmetro	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Distância horizontal dos painéis à frente de chamas (m)	3	1	0,2	0,2
Altura do painel fotovoltaico (m)	0	0	0	0,5
Massa total de combustível (kg)	60	45	30	30
Carga total de combustível (kg/m²)	15	15	10	10
Largura da frente de chamas (m)	4	3	3	3
Altura máxima de chama (m)	6	6	3	2
Altura média de chama (m)	4,0	4,0	2,0	1,5
Área emissiva máxima (m²)	24	24	5,4	5,4
Calor máximo incidente (kW.m⁻²)	3,5	16,5	18	4,6
Calor médio incidente (kW.m⁻²)	1,9	5,7	3,5	2,0
Tempo de exposição às chamas (min)	4	4	7	7

2.5.2. Cenário de fogo sob o painel

No primeiro ensaio, o painel foi exposto a uma fonte de calor resultante de dois maçaricos alimentados a gás butano que projetavam dois jatos de chama dirigidos à face inferior do painel (Figura 6a). A chama incidente, de grande intensidade, espalhava-se na superfície do painel descrevendo um círculo com diâmetro médio de 57 cm. No segundo ensaio, o painel foi montado 50 cm acima de um leito de palha com 3,0 kg/m², tendo a ignição sido praticamente simultânea em todo o perímetro.

Tabela 4. Parâmetros dos ensaios de validação com frente de chamas próxima.

Parâmetro	Ensaio 5	Ensaio 6
Distância horizontal dos painéis à frente de chamas (m)	0	0
Altura do painel (m)	0,5	0,5
Massa total de combustível (kg)	N/A	31,25
Carga total de combustível (kg/m²)	N/A	5,0
Área emissiva máxima (m²)	N/A	6,25
Fluxo de calor incidente (kW.m⁻²)	242*	33,7
Tempo de exposição às chamas (min)	4	11

** refere-se à intensidade da radiação térmica de 1 jato de fogo considerando um caudal de 4,5 g.s⁻¹ de butano e área circular de 57 cm de diâmetro relativa à incidência perpendicular do jato de fogo na superfície do painel estimada conforme (Barbosa, 2023a; Casal, 2008).*

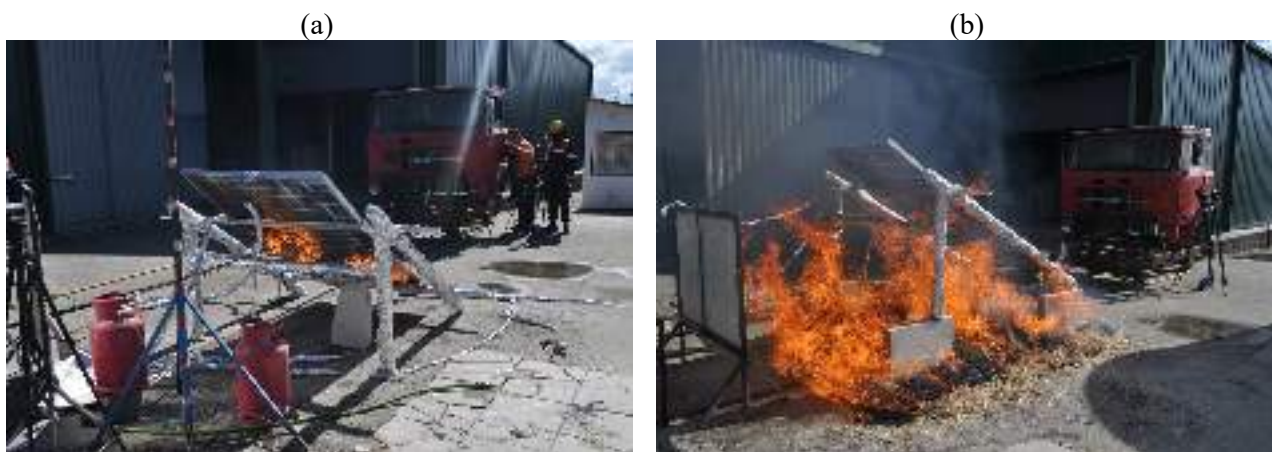


Figura 6. Fotografias dos ensaios de validação com foco de incêndio sob o painel: a) painel sujeito a dois jatos de chama promovidos por dois maçaricos a butano; b) ensaios com fogo em leito de palha sob o painel.

3. Determinação da função de vulnerabilidade

3.1. Apresentação e análise dos resultados dos ensaios

3.1.1. Ensaios com cone calorimétrico

Como referido anteriormente, um dos parâmetros de controlo dos ensaios com cone calorimétrico foi a concentração de vários gases resultantes da exposição das amostras dos painéis fotovoltaicos ao calor. Como se poderá observar no exemplo apresentado na Figura 7, o CO foi aquele que mostrou alterações mais visíveis. Assim considerou-se o início da libertação deste gás como um momento crítico que corresponderá ao início da degradação dos materiais do painel.

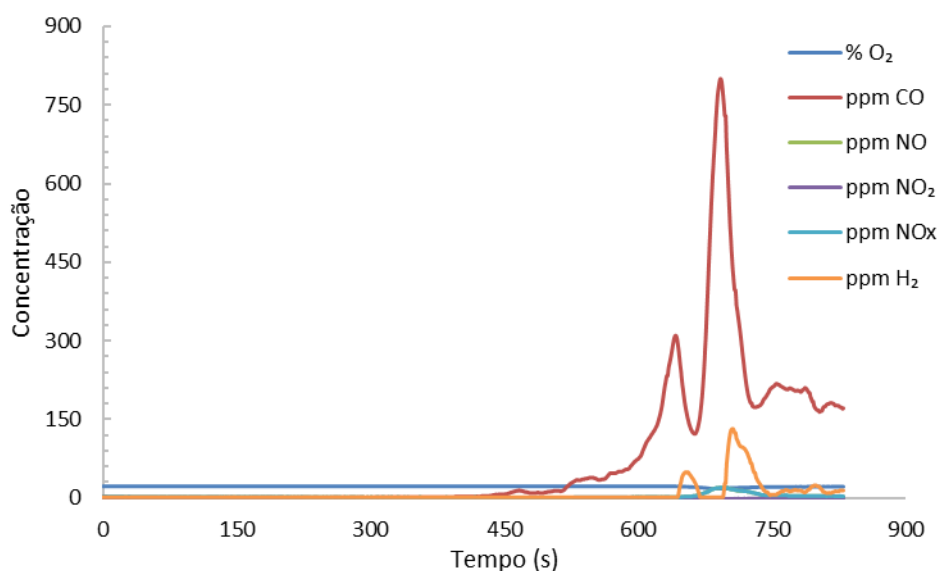


Figura 7. Variação dos gases medidos ao longo do Ensaio 5 com o cone calorimétrico.

Em todos os ensaios verificou-se que, a determinado momento, o vidro do painel fotovoltaico estalava (Figura 8a) e que passados alguns segundos se começavam a libertar fumos visíveis, acompanhados da fusão do material polimérico. Assim, estas duas reações foram igualmente consideradas como críticas para definição da função de vulnerabilidade.



Figura 8. Fotografias que evidenciam a fratura do vidro das amostras (a) e da libertação de fumos acompanhada da fusão do material polimérico (b).

A reação crítica final corresponde à ignição da amostra que dá início à combustão e que atinge valores de temperatura em torno dos 800 °C, tal como se pode observar no exemplo da Figura 9.

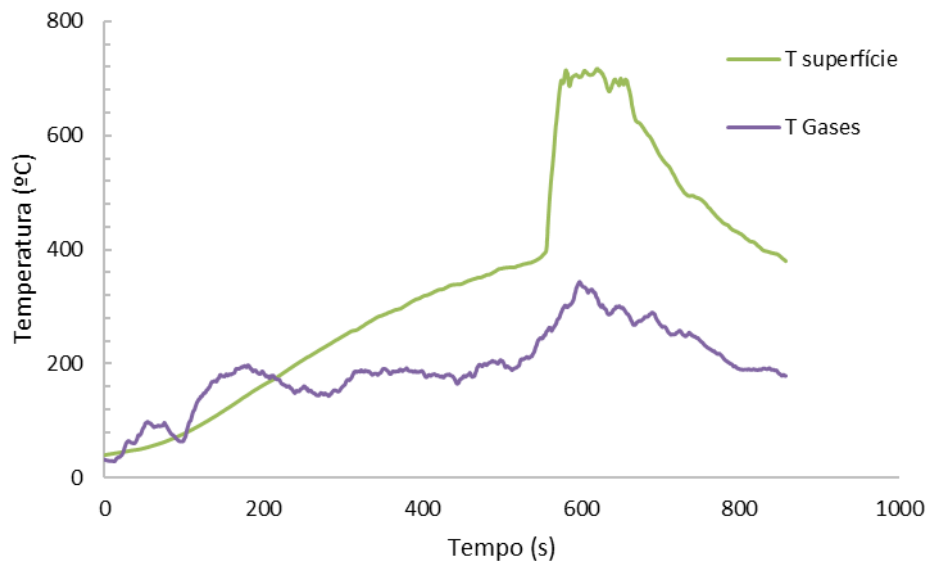


Figura 9. Variação das temperaturas (T) registadas na superfície da amostra do Ensaio 4 e dos gases de exaustão. Neste ensaio, a ignição deu-se aos 538 s (377 °C), quando se verifica simultaneamente uma subida abrupta da temperatura da superfície da amostra.

A Tabela 5 seguinte apresenta as temperaturas e os tempos em que as reações críticas tiveram início.

Tabela 5. Tempo (t) decorrido de exposição das amostras em cada ensaio com cone calorimétrico, quando se verificou as reações críticas dos materiais, e valor de temperatura (T) a que a reação ocorreu.

Reação da amostra ao calor	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5		Ensaio 6		Valores médios	
	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
Início da emissão de CO	554	270	405	270	312	260	359	290	413	235	181	265	371	265
Fratura do vidro	658	340	483	330	391	315	359	290	413	235	248	308	425	303
Libertação visível de fumos	813	452	684	440	513	400	505	368	570	313	359	389	568	394
Ignição	820	484	700	456	549	422	538	377	630	324	429	439	611	411
Combustão com chama	210	--	200	--	195	--	170	--	360	--	273	--	235	--

3.1.2. Função de vulnerabilidade

A média dos valores de temperatura e tempos de exposição relativos aos ensaios com o cone calorimétrico permitiram determinar o fluxo de calor a que as amostras foram expostas, resultando na tabela que se apresenta de seguida.

Tabela 6. Resumo dos valores de fluxo de calor e respetiva reação dos materiais.

Fluxo de calor (kW/m ²)	Comportamento
8,36	Início da libertação de CO
10,42	Fratura do vidro
16,77	Libertação de fumo visível
18,20	Ignição

Destacam-se igualmente os resultados de Yang *et al.* (2015) sobre a vulnerabilidade dos painéis fotovoltaicos, que apresentaram um valor do fluxo de calor incidente de 26 kW/m² a que se dá a ignição dos painéis. Considera-se que os resultados obtidos nos ensaios de vulnerabilidade realizados no presente estudo são mais seguros do que aqueles que obtidos por Yang *et al.* (2015), uma vez que exigem menor fluxo de calor para que os painéis ignifiquem, e portanto, como fator de segurança, nos cálculos seguintes iremos utilizar os resultados apresentados na Tabela 6.

3.2. Distância mínima de segurança

3.2.1. DMS por exposição a frente de chamas

A DMS corresponde à largura mínima da faixa de gestão de combustíveis, considerada no presente estudo. De acordo com os resultados da análise de vulnerabilidade descritas na secção anterior, e seguindo a metodologia descrita na Secção 2.4.1, a DMS foi determinada para as três situações de impacto mais significativo nos painéis por exposição ao calor incidente, nomeadamente:

- Início da libertação de CO ($8,36 \text{ kW/m}^2$) – por corresponder ao início do dano, i.e., abaixo deste valor o dano no painel é praticamente nulo.
- Início da libertação de fumos visíveis ($16,77 \text{ kW/m}^2$) – uma vez que se entende que, a partir desta fase, a deterioração dos painéis pode causar impactos relevantes na área envolvente, nomeadamente na alteração da qualidade de ar, o que poderá causar problemas de saúde pública.
- Início da ignição ($18,20 \text{ kW/m}^2$) – considerando-se que a partir deste valor será necessária intervenção externa de forma a suprimir a queima do painel, havendo ainda a possibilidade de o fogo se estender aos painéis adjacentes e, em casos extremos, à fila de painéis ou a todo o parque.

Na Tabela 3, apresentam-se os resultados relativos ao cálculo da DMS para as três situações de impacto que acabaram de se descrever, para os 20 cenários da envolvente ao parque considerados (Secção 2.2.2) e as situações de localização da instalação em APPS ou fora de APPS (equações [7] e [8] descritas na Secção 2.4.1).

Tabela 7: Distâncias Mínimas de Segurança (DMS) para uma situação de exposição dos painéis a uma frente de chamas próxima do parque, para os quatros modelos de combustíveis (1: terreno com herbáceas)

Modelo de combustível	ζ (°)	l_f (m)	$q_{\text{incidente}}=8,36 \text{ kW/m}^2$		$q_{\text{incidente}}=16,77 \text{ kW/m}^2$		$q_{\text{incidente}}=18,20 \text{ kW/m}^2$	
			DMS _{geral} (m)	DMS _{APPS} (m)	DMS _{geral} (m)	DMS _{APPS} (m)	DMS _{geral} (m)	DMS _{APPS} (m)
C1 – terreno com herbáceas	0	0,53	1,20	1,50	0,64	0,80	0,60	0,75
	10	0,75	1,40	1,75	0,88	1,10	0,75	0,94
	20	1,08	1,77	2,21	1,15	1,44	1,08	1,35
	30	1,53	1,91	2,39	1,35	1,69	1,29	1,61
	40	2,19	2,07	2,59	1,66	2,08	1,61	2,01
C2 – terreno com arbustos	0	1,38	2,06	2,58	1,44	1,80	1,36	1,70
	10	1,60	2,15	2,69	1,51	1,89	1,44	1,80
	20	1,86	2,29	2,86	1,70	2,13	1,63	2,04
	30	2,17	2,32	2,90	1,80	2,25	1,74	2,18
	40	2,53	2,34	2,93	1,91	2,39	1,87	2,34
C3 – terreno com herbáceas e árvores	0	2,66	2,30	2,88	1,89	2,36	1,82	2,28
	10	2,89	2,52	3,15	1,96	2,45	1,87	2,34
	20	3,15	2,62	3,28	2,12	2,65	2,04	2,55
	30	3,43	2,71	3,39	2,27	2,84	2,21	2,76
	40	3,73	2,81	3,51	2,46	3,08	2,41	3,01
C4 – terreno com arbustos e árvores	0	5,03	2,72	3,40	2,21	2,76	2,14	2,68
	10	5,28	2,76	3,45	2,25	2,81	2,19	2,74
	20	5,54	2,80	3,50	2,31	2,89	2,23	2,79
	30	5,81	2,81	3,51	2,38	2,98	2,39	2,99
	40	6,11	4,33	5,41	4,11	5,14	3,98	4,98

3.2.2. DMS para cenário de fogo sob o painel

A propagação do fogo sob o painel poderá acontecer numa situação em que uma ou mais fagulhas caiam na área ocupada pelos painéis, dando início a um ou mais focos secundários, ou através de uma propagação sustentada do fogo ao longo da faixa de gestão de combustíveis. No entanto, é de esperar que a gestão típica de combustíveis no interior do parque fotovoltaico e na faixa de gestão de combustíveis leve a que um eventual foco secundário ou uma frente de chamas progridam a baixa intensidade ou que possam mesmo autoextinguir-se.

Considera-se que o modelo de combustíveis mais provável de existir dentro do parque fotovoltaico ou na faixa de gestão de combustíveis é o modelo NFFL 1 (C1), descrito na Secção 2.2.2, relativo a um terreno com herbáceas baixas. Embora se considere que a carga de combustíveis no interior do parque ou na faixa de gestão

de combustíveis seja relativamente baixa, face ao corte de erva efetuado, nos cálculos para determinação do calor incidente no painel sob o qual o fogo progride, usou-se uma carga de herbáceas (palha) de $0,6\text{kg/m}^2$ e de $1,0\text{kg/m}^2$, a que corresponde uma altura aproximada de herbáceas densas de 25 cm e de 40 cm, respetivamente. No entanto, e como foi referido anteriormente, os cálculos basearam-se em ensaios laboratoriais, na ausência de declive e vento que, seguramente, aumentarão a intensidade do fogo, sobretudo numa fase de propagação sustentada.

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados da altura dos painéis a partir da qual se começam a registar os três danos críticos da função de vulnerabilidade, descrita em 3.1.2 – esta altura corresponde à DMS que considera a transferência vertical do calor incidente no painel quando o fogo progride por baixo, considerando os efeitos radiativos e convectivos. Estes valores foram determinados através da Equação [2] apresentada na Secção 2.4.2.. Foram realizados cálculos para a situação em que o painel está horizontal (inclinação de 0°) e para a situação de maior inclinação (25°), em que a sua proximidade ao solo é a maior possível, dentro das condições operacionais típicas.

Tabela 8. DMS para cenário de fogo sob o painel, i.e., altura mínima do painel para diferentes cargas de combustível e inclinações.

Carga de palha (kg/m^2)	Altura atual dos painéis		Altura proposta dos painéis*	
	Inclinação= 0° Altura=1,5m	Inclinação= 25° Altura=0,5m	Inclinação= 0° Altura=2,5m	Inclinação= 25° Altura=1,5m
0,6	9,5	14,9	6,0	9,5
1,0	15,3	37,2	6,3	15,3

** na Secção 4.1 será proposto que a altura dos painéis na Zona 2 (faixa de ocupação compatível a descrever nessa secção) seja de 2,5 m quando o painel está na horizontal (0°).*

3.3. Ensaios de validação

Os ensaios de validação garantem uma maior confiabilidade aos resultados anteriormente apresentados, sobretudo no que respeita à transposição da escala laboratorial para a escala real, e à incorporação de algumas simplificações feitas ao longo do estudo. Nestes ensaios, o efeito do fogo sob os painéis foi meramente visual, consistindo na observação eventual de degradação dos materiais, da libertação de fumos ou de ignição do painel. Adicionalmente, foi medida a massa de cada painel antes e após o ensaio no sentido de perceber se houve deterioração do material, que não tivesse sido observada visualmente.

3.3.1. Cenário de exposição a uma frente de chamas

A exposição dos painéis a frentes de chamas com grande intensidade (alturas médias de chama entre 1,5 m e 4,0 m) durante um tempo de exposição entre 4 min e 7 min, consoante o ensaio, não conduziram a danos substanciais visíveis nos painéis. No último ensaio – Ensaios 4 – em que o painel estava a 20 cm da frente de chamas e elevado 50 cm da base da chama, verificou-se uma ligeira degradação dos materiais e empenamento na parte inferior do painel, sem que em qualquer altura tivesse significado ou libertado fumos visíveis. A Figura 10 mostra as fotografias dos painéis após cada ensaio.

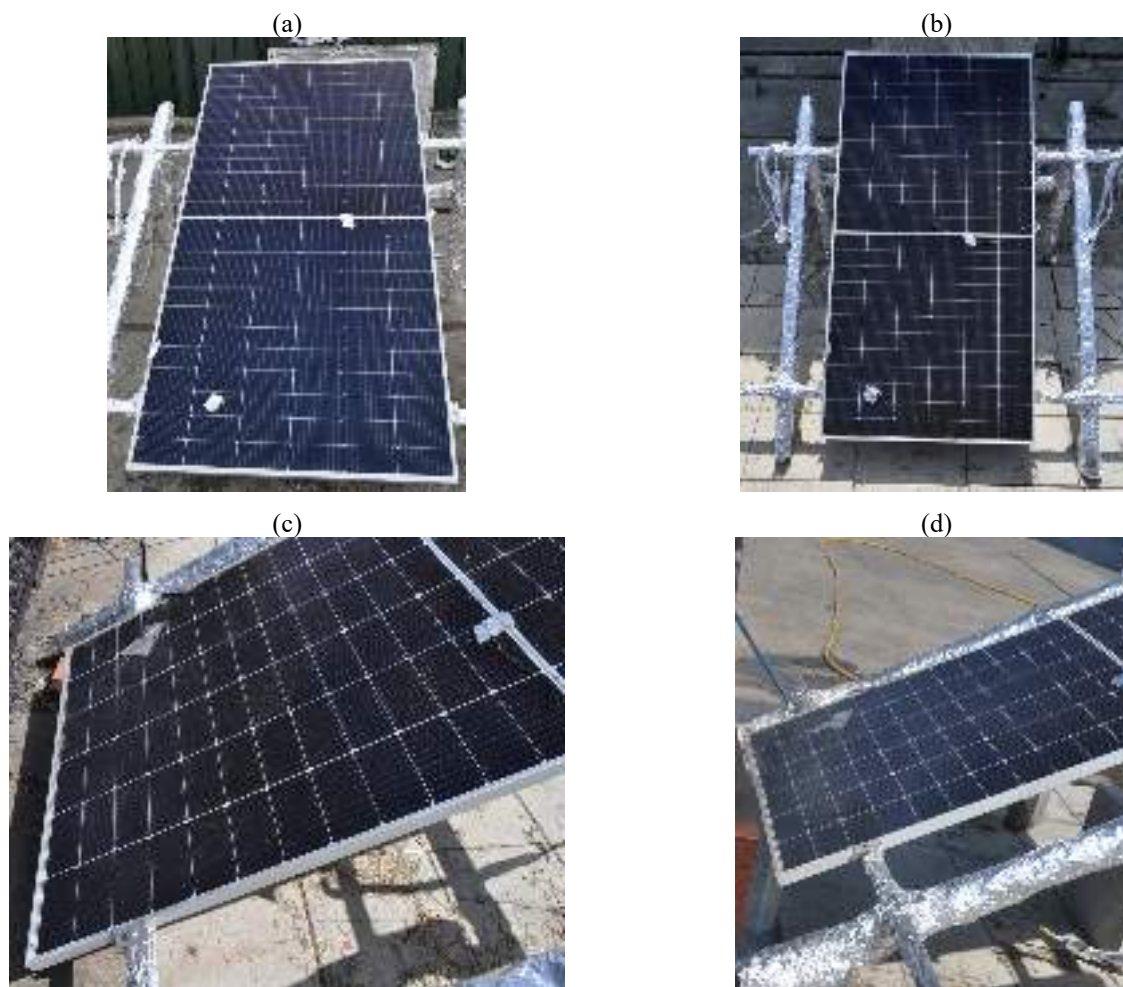


Figura 10. Fotografias dos painéis fotovoltaicos após os ensaios: a) Ensaio 1 – painel ao nível do solo e a 3,0 m da frente de chamas; b) Ensaio 2 – painel ao nível do solo e a 1,0 m da frente de chamas; c) Ensaio 3 – painel ao nível do solo e a 0,2 m da frente de chamas; d) Ensaio 4 – painel a 0,5 m de altura e a 0,2 m da frente de chamas. É possível observar uma ligeira deterioração da parte inferior do painel no Ensaio 4 (d).

A Tabela 9 apresenta as massas dos painéis antes e depois dos ensaios, permitindo verificar que, à exceção do último ensaio, não houve deterioração do material.

Tabela 9. Alteração da massa de cada painel depois de exposto à frente de chamas.

Ensaio	Massa inicial (kg)	Massa final (kg)	Perda de massa (%)
1 – Painel ao nível do solo e a 3,0 m da frente de chamas	31,95	31,94	0,0
2 – Painel ao nível do solo e a 1 m da frente de chamas	32,21	32,19	0,1
3 – Painel ao nível do solo e a 20 cm da frente de chamas	31,97	31,86	0,3
4 – Painel a 50 cm de altura e a 20 cm da frente de chamas	32,12	31,85	0,8

3.3.2. Cenário de fogo sob os painéis

Tal como anteriormente, os ensaios com chamas sob o painel ocorreram em condições muito mais intensas do que aquelas que é expectável que ocorram durante uma situação real de incêndio num parque fotovoltaico. No Ensaio 5, em que dois jatos de chama incidiram sobre a face inferior do painel, durante 4 min, verificaram-se danos substanciais no painel (Figura 11), nomeadamente o seu empenamento pelo calor, a fratura e quebra do vidro, o derretimento de material polimérico, a libertação de fumo visível e a ignição do painel. Após a ignição

o painel continuou exposto aos jatos de chama durante um minuto, até ser desligada esta fonte de calor induzido. O painel manteve-se em combustão com chama de comprimento médio de 10 cm, até que se extinguiu passados cerca de 55 s, sem que se propagasse ao restante painel, permanecendo apenas na área de rotura do vidro. A perda de massa do painel durante este processo foi de 383 g, o que corresponde a 1,2% da sua massa total.

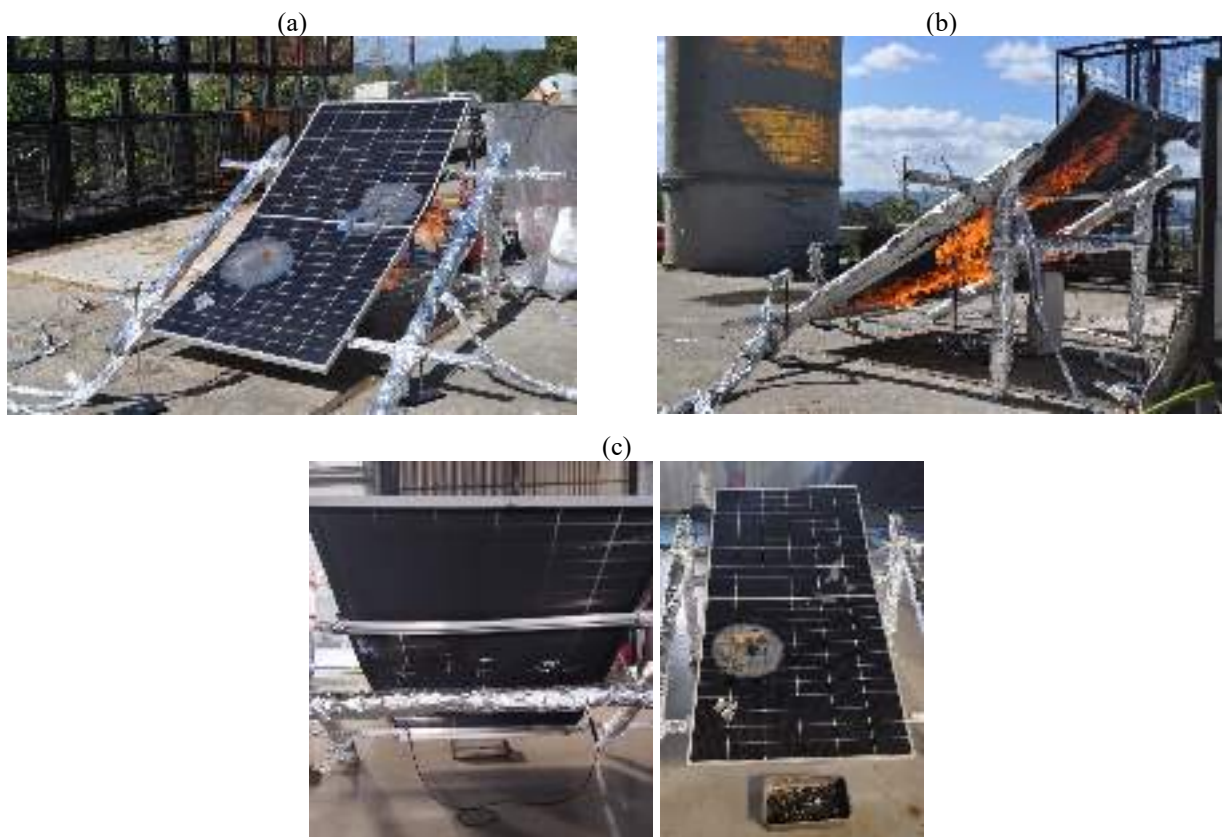


Figura 11. Fotografias do painel fotovoltaico ao longo do Ensaio 5: a) empenamento do painel e quebra do vidro; b) ignição da parte inferior do painel; c) aspeto do painel depois do ensaio.

No Ensaio 6 houve igualmente registo de danos, mas que se restringiram à degradação do material polimérico ao empenamento do painel e ao derretimento dos cabos elétricos (Figura 12). Não houve fratura do vidro, libertação visível de fumos ou sequer ignição do painel, mesmo estando exposto a um calor intenso resultante da queima simultânea de um leito de palha com carga de 5,0 kg/m², o que é muito superior àquela que normalmente se encontra num parque fotovoltaico devidamente gerido. A massa final do painel é de 31,10 kg, o que corresponde a uma variação de 2,9 % face a massa inicial.

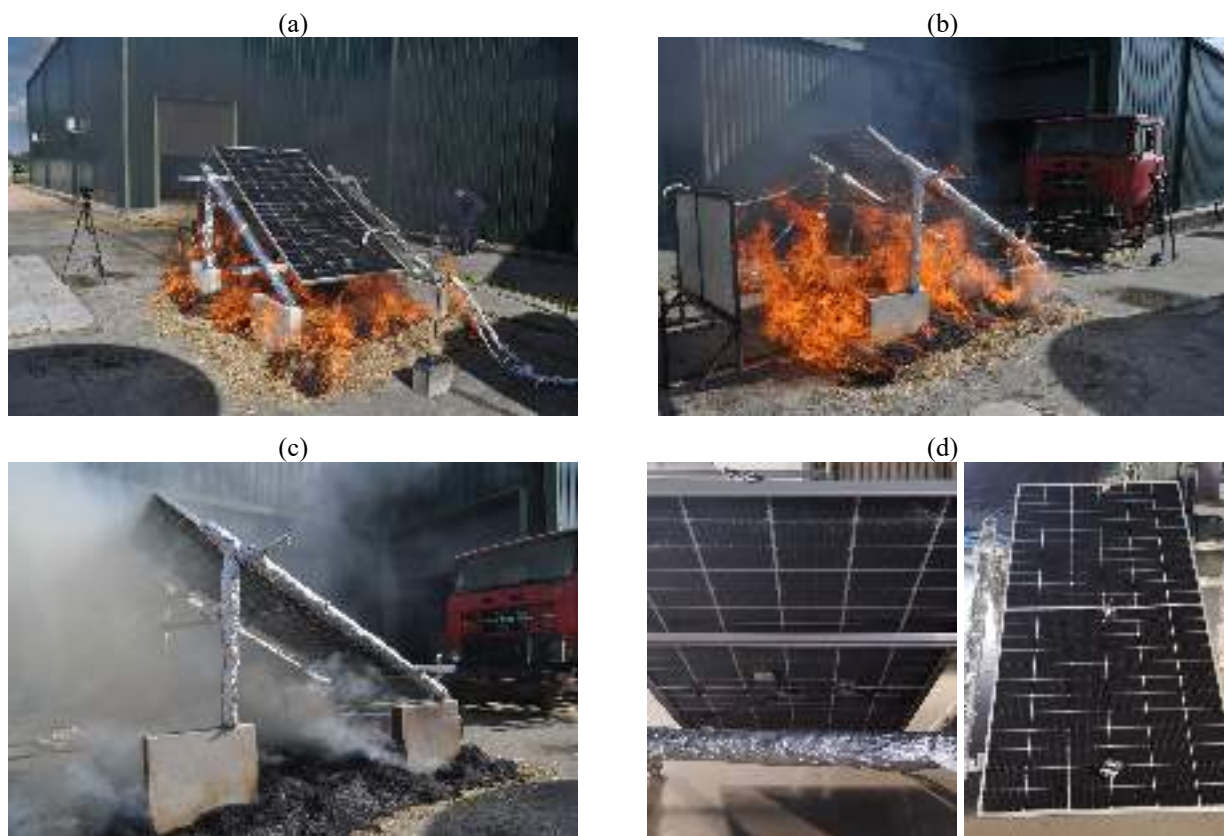


Figura 12. Fotografias do painel fotovoltaico ao longo do Ensaio 6: a) empenamento do painel; b) quebra do vidro; c) ignição; d) aspeto do painel depois do ensaio.

3.4. Discussão de resultados

Os resultados anteriores permitem constatar a baixa afetação que os painéis solares fotovoltaicos apresentam relativamente à exposição ao calor proveniente de incêndios rurais. Os cálculos apresentados na Secção 3.2.1 indicam que, na perspetiva de ocorrência de danos nos painéis, a largura da faixa de gestão de combustíveis na envolvente a um parque fotovoltaico poderá estar compreendida entre 1,2 m e 5,4 m, em função do cenário da envolvente ao parque.

Estes resultados foram corroborados pelos ensaios de validação em que os painéis foram expostos a frentes de chamas com alturas médias entre 1,5 m e 4,0 m, o que equivale a alturas de frentes de chamas típicas dos cenários C2 (terreno com herbáceas e com árvores) e C3 (terrenos com arbustos e com árvores), para os quais a DMS calculada varia entre 2 m e 3 m, respetivamente, mostrando uma boa correspondência entre os resultados. No entanto, uma situação de incêndio é frequentemente acompanhada de ventos fortes que não foram considerados neste estudo, pelo que deve ser considerada uma majoração da DMS de forma a contemplar cenários extremos em que o fogo poderá propagar-se com maior intensidade. Destaca-se ainda que a função de vulnerabilidade obtida no presente estudo é mais exigente do que aquela que foi obtida por outros autores (Yang *et al.* 2015).

Os parques fotovoltaicos podem igualmente ser afetados por incêndios rurais através da projeção de fagulhas que causam focos secundários sob os painéis resultando em novas frentes de chamas, expectavelmente de baixa intensidade face à baixa carga de combustíveis resultantes das operações de gestão de combustível. Neste sentido foram realizados ensaios para compreender a afetação dos painéis fotovoltaicos em função da intensidade do fogo que se desenvolve por baixo deles. Os ensaios laboratoriais permitiram verificar que, nas atuais condições de instalação de painéis, a uma altura mínima de 0,5 m relativamente ao solo, tanto para leitos de combustível de 0,6 kg/m² como de 1,0 kg/m², não se dá a ignição do painel ou a libertação de fumos visíveis. No entanto, é de esperar que os painéis sejam danificados pelo calor, podendo mesmo registar a quebra do vidro se o leito de palha tiver uma carga superior a 1,0 kg/m². Adicionalmente, os ensaios de validação realizados com a trave inferior do painel a 50 cm de altura e sobre um leito de palha com carga de 5 kg/m², a arder com uma intensidade muito superior àquela que seria esperada num parque fotovoltaico com combustível razoavelmente gerido não levou à ignição do painel, nem tampouco à fratura do vidro.

Aceita-se que em qualquer dos casos, a exposição dos painéis ao fogo possa levar a danos não visíveis dos equipamentos, no entanto, de acordo com o estudo efetuado, os painéis dificilmente ignificarão nas condições ensaiadas. Realça-se ainda que no caso extremo em que se sujeitou um painel a dois jatos de chama com intensidade muito superior àquela típica dos incêndios rurais, durante 4 minutos, o painel ignificou, mas a sustentação da chama foi de apenas 55 s, o que demonstra a baixa sustentabilidade do fogo nestes equipamentos do tipo vidro-vidro, pelo que a probabilidade de propagação do fogo entre painéis fotovoltaicos de forma independente, i.e., sem apoio de uma fonte de calor suplementar, é praticamente nula.

Resumindo, é possível que numa situação em que o incêndio rural atinja as imediações de um parque fotovoltaico, se verifiquem danos em alguns painéis, sobretudo na periferia do parque, mas é improvável que o fogo se propague ao longo de uma fila de painéis ou se generalize pelo parque. Pode assim concluir-se que a presença dos painéis não contribui para aumentar o perigo de incêndios no local onde estão instalados.

4. Conclusão (Parte 1)

O presente estudo permitiu desenvolver um conjunto de critérios técnicos para a proteção passiva de parques solares fotovoltaicos contra incêndios rurais, com base numa abordagem integrada entre a evidência científica, os requisitos legais em vigor e as especificidades funcionais destes equipamentos.

Com base em ensaios laboratoriais e modelação numérica, foram definidas distâncias mínimas de segurança (DMS) a considerar para os diferentes tipos de vegetação e declives presentes na envolvente dos parques. Os resultados evidenciam que, mesmo perante exposições intensas ao calor, os painéis fotovoltaicos do tipo vidro-vidro demonstram baixa ignitabilidade e fraca sustentabilidade do fogo.

5. Referências

- Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. In *USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122*. Intermt. For. and Range Exp. Stn., Ogden, Utah 84401.
- Decreto-Lei n.º 82/2021. (2021). *Presidência do Conselho de Ministros de 13 de outubro*. Diário da República n.º 199/2021, Série I de 2021-10-13. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/82-2021-172745163>
- Despacho n.º 8591/2022, de 13 de julho. (2022). *Diário da República n.º 134/2022, Série II de 2022-07-13*. Ministério da Administração Interna – Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/despacho/8591-2022-186038879>
- Yang, H.-Y., Zhou, X.-D., Yang, L.-Z., & Zhang, T.-L. (2015). Experimental Studies on the Flammability and Fire Hazards of Photovoltaic Modules. *Materials*, 8(7), 4210–4225. <https://doi.org/10.3390/ma8074210>

Coimbra, 14 de maio de 2025

Assinado por : **Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas**
Num. de Identificação: BI01054261

Assinado por: **Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida**
Num. de Identificação: 09829255
Data: 2025.10.22 10:14:00+01'00'

Domingos Xavier Viegas
Professor Emérito da Universidade de Coimbra
Diretor do CEIF, ADAI/UC

Miguel Almeida
Investigador Sénior da ADAI/UC

Assinado por: **Luís Mário da Silva Ribeiro**
Num. de Identificação: 10266185
Data: 2025.10.22 10:18:02+01'00'

Luís Mário Ribeiro
Investigador Sénior da ADAI/UC