

# LIVRO DE ATAS

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS  
DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS |  
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024

5º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE  
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS  
CONGRESSO CONSTRUÇÃO 2024

6-8 de Novembro, IST, Lisboa, Portugal



Atas CERIS

CERIS : Investigação e Inovação  
em Engenharia Civil para  
a Sustentabilidade

01



# Livro de atas. 5.º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Congresso Construção 2024

## Editores

A Comissão Organizadora: Jorge de Brito (Presidente), José Dinis Silvestre (Vice-Presidente), Albano Neves e Sousa, Ana Paula Pinto, António Moret Rodrigues, Augusto Gomes, Carlos Oliveira Cruz, Cristina Matos Silva, Fernando Branco, Inês Flores-Colen, João Gomes Ferreira, João Ramôa Correia, José Alexandre Bogas, Maria Glória Gomes, Pedro Gameiro Henriques, Rita Nogueira, Vitor Sousa

## Citação recomendada

de Brito, J.; Silvestre, J.D.; Neves e Sousa, A.; Pinto, A.P.; Rodrigues, A.M.; Gomes, A.; Cruz, C.O.; Silva, C.M.; Branco, F.; Flores-Colen, I.; Ferreira, J.G.; Correia, J.R.; Bogas, J.A.; Gomes, M.G.; Henriques, P.G.; Nogueira, R.; Sousa, V. (eds.) (2024) *Livro de atas. 5.º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. Congresso Construção 2024*. CERIS, Lisboa, Portugal. Atas CERIS 01-2024.

## Composição

Vitor Sousa

## Edição

CERIS - Instituto de Investigação e Inovação em Engenharia Civil para a Sustentabilidade  
Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa - Portugal, [ceris@tecnico.ulisboa.pt](mailto:ceris@tecnico.ulisboa.pt)

## N.º de Edição

1

## Local e data de publicação

Lisboa, 6-8 de novembro de 2024

## ISBN

978-989-95625-9-2

## Código CERIS

Atas CERIS 01-2024

## Notas

A totalidade desta publicação está protegida por direitos de autor. A informação contida neste guia foi compilada, tanto quanto é do conhecimento e convicção dos autores, de acordo com os princípios de boas práticas científicas. Os autores acreditam que a informação contida neste guia está correta, completa e atual, mas não aceitam qualquer responsabilidade por quaisquer erros, explícitos ou implícitos. As declarações contidas neste documento não refletem necessariamente a opinião das instituições.



## PLUMAS TÉRMICAS EM RADIADORES: PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE ENSAIOS DE FUMO À ESCALA REAL

Rafaela Mateus<sup>a,b</sup>, Armando Pinto<sup>b</sup>, José M. C. Pereira<sup>a</sup>

<sup>a</sup>LAETA, IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica/LASEF, Av. Rovisco Pais, 1, Lisboa, 1049-001, Portugal, rafaela.mateus@tecnico.ulisboa.pt, jose.chaves@tecnico.ulisboa.pt

<sup>b</sup>NAICI, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Edifícios, Av. do Brasil 101, 1700-075 Lisboa, Portugal, apinto@Inec.pt

### RESUMO

O estudo da transferência de calor por convecção natural é essencial na engenharia, nomeadamente em sistemas de aquecimento e ventilação de edifícios. Avanços significativos foram feitos na simulação, avaliação experimental e controlo da ventilação natural. Uma estratégia comum para promover a ventilação é usar radiadores para aproveitar o efeito de chaminé proporcionado pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior. Caracterizar as plumas térmicas geradas por esses radiadores é crucial para prever o escoamento do ar no interior do espaço, e para otimizar a transmissão de calor e a ventilação. Este trabalho incide no processamento de imagens e vídeos captados em ensaios experimentais de fumo em modelos à escala real, que são utilizados para caracterizar a evolução de plumas térmicas e visualizar padrões de escoamento. O estudo explora parâmetros de filtragem e separação do fumo, bem como as estimativas de concentrações e velocidade das partículas de fumo. Os resultados mostram a sensibilidade dos processos de filtragem e de separação a diferentes parâmetros e o impacto na estimativa das concentrações de velocidades do fumo. A metodologia demonstra versatilidade e eficácia para aplicações em diferentes contextos experimentais.

**Palavras-chave:** Transferência de calor, Convecção natural, Plumias térmicas, Fontes de fumo, Processamento de imagem.

### 1 INTRODUÇÃO

O estudo da transferência de calor por convecção natural é essencial em várias áreas da engenharia, nomeadamente em aquecimento, ventilação de edifícios e processos de transmissão de calor. Ao longo dos anos, foram registados avanços significativos no campo da ventilação natural (VN) (Carrilho da Graça e Linden 2016; Etheridge 2015). A utilização das plumas térmicas para promover a VN pode oferecer soluções eficientes para edifícios de grande volume (Y. Liu et al. 2020; Mateus, Pereira, e Pinto 2023).

O estudo de fontes de calor, como radiadores são focados na melhoria da eficiência energética e em garantir uma distribuição adequada do ar (Gomes 2013; Turner 1979; Wang et al. 2020). Para tal a compreensão do desenvolvimento das plumas térmicas é essencial para otimizar o aquecimento (Hernández 2015). A literatura concentra-se maioritariamente nos aspetos associados à geometria dos radiadores (Aydar e Ekmekçi 2012; Calisir e Baskaya 2021; Calisir, Yazar, e Baskaya 2019, 2021; Ekmekci e Aydar 2016; Myhren e Holmberg 2011; Rahmati e Gheibi 2020; Q. Wu et al. 2021), existindo uma lacuna na exploração da dinâmica do escoamento interno em espaços equipados com fontes de calor em escala real (Brandl et al. 2021; Calisir et al. 2016; Ganesh, Lata, e Nath 2020). A utilização de substâncias corantes, como fontes de fumo colorido, em ensaios experimentais, amplia as capacidades de visualização dos padrões de escoamento, permitindo uma análise mais detalhada da evolução temporal e espacial dessas plumas. Geralmente, esses padrões são registados por câmaras e exigem processamento de imagem posterior.



No processamento de imagens, a etapa de separação, é crucial para isolar regiões de interesse e remover o fundo, visando aprimorar a qualidade da região isolada e reduzir o ruído (Canales et al. 2024; Karthick et al. 2023). Diversas abordagens, como algoritmos genéticos, fusão de cor e profundidade, e cluster *fuzzy do kernel*, têm sido desenvolvidas para lidar com esses desafios (Canales et al. 2024; L. Chen, Zhao, e Zhang 2022; Karthick et al. 2023; B. Lu et al. 2023; Y. Lu et al. 2023; Mengíbar-Rodríguez e Chamorro-Martínez 2022; Oprisescu, Coliban, e Ivanovici 2022; Zhao e Du 2023). No domínio do processamento de imagens de fumo, a segmentação enfrenta desafios específicos devido à característica semitransparente e à variação associada ao fumo (Y. Li et al. 2022; Yuan et al. 2023), e vários estudos exploraram métodos de segmentação, com aprendizagem *semi-supervised*, redes neurais, modelos baseados em redes adversárias generativas para separação em tempo real de fumo (H. Li et al. 2024; Y. Li et al. 2022; Sun, Wen, e Li 2022; Yuan et al. 2023).

Para segmentar as áreas de interesse em imagens, podem ser utilizadas diferentes técnicas. Isso inclui o *color thresholding segmentation*, que utiliza limiares de cor para separar regiões. O *edge detection and segmentation* destaca bordas ou contornos distintivos numa imagem, enquanto o *Adaptive k-means clustering* oferece uma abordagem dinâmica para a segmentação de dados visuais (Aleksi, Hocenski, e Kraus 2018; Marmanis et al. 2018; Vijayan, Subramaniam, e Sathiyasekar 2024). No processamento de vídeos, a técnica de *object motion detection* é aplicada para identificar o movimento dos objetos, com diversas abordagens, incluindo *Frame Differencing*, *Optical Flow* e *Background Models* (Babu e Parthasarathy 2022; Chacon-Murguia e Ramirez-Alonso 2015; Huang et al. 2023; D. Liu et al. 2020; H. Wu e Liu 2022; H. Zhang et al. 2022; Y. Zhang et al. 2018). Adicionalmente, o *object motion tracking* é utilizado para monitorizar e registar a movimentação contínua de um objeto na cena, fornecendo informações detalhadas sobre sua posição, velocidade e direção (S. Chen et al. 2023; Qiu et al. 2020; Yu et al. 2020).

Dadas as necessidades de estudar a visualização de padrões de escoamento em grandes espaços com ventilação natural em escala real, este estudo incidiu no processamento de imagens e vídeos captados em ensaios experimentais de fumo em modelos à escala real, que são utilizadas para caracterizar a evolução de plumas térmicas devidas à convecção natural em dois radiadores. O estudo integra uma possível conversão de dados RGB para HSV e a segmentação da matriz de pixéis com filtros para separar as zonas do fumo colorido, bem como um tratamento dos dados que auxilie na estimativa de concentrações de fumo e velocidades de escoamento.

## 2 METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

A metodologia do processamento de imagem para análise das plumas térmicas tem duas partes. Na primeira parte, designada por “Análise de Fotografias”, várias fotografias (formato .jpg) são analisadas de acordo com o esquema da Figura 1-a, incluindo uma etapa de estudo de mapas de cor RGB versus HSV e o teste de vários parâmetros para a separação das zonas de cor, filtragem e cálculo das concentrações. Na etapa de separação, as áreas correspondentes a gamas/faixas de cores predefinidas são identificadas e isoladas no espaço RGB e HSV, e são criadas as máscaras. Esta etapa é crucial para isolar as áreas das plumas térmicas. A etapa de filtragem de cor desempenha um papel essencial no ajuste da aparência global da imagem, visando melhorar a qualidade visual, reduzir o ruído e destacar características específicas. Esta pode ser realizada antes ou após a etapa de separação das zonas de cor, dependendo do objetivo e do tipo de imagem original. A análise qualitativa foi realizada para três momentos dos ensaios, utilizando a vista frontal aproximada. Na segunda parte, denominada por “Análise de vídeos”, pretende-se examinar diversos vídeos disponíveis (no formato mp4) que representem escoamentos ascensionais típicos, utilizando partículas marcadoras, e avaliar diversos parâmetros relacionados à separação das áreas de cor, à filtragem de cada cor e ao cálculo dos tempos médios, distâncias e velocidades pertinentes, de acordo com o esquema da Figura 1-b. Nesse contexto,



o objetivo é determinar o intervalo de amostragem adequado entre as imagens processadas e verificar a viabilidade da realização dessa análise em tempo real.

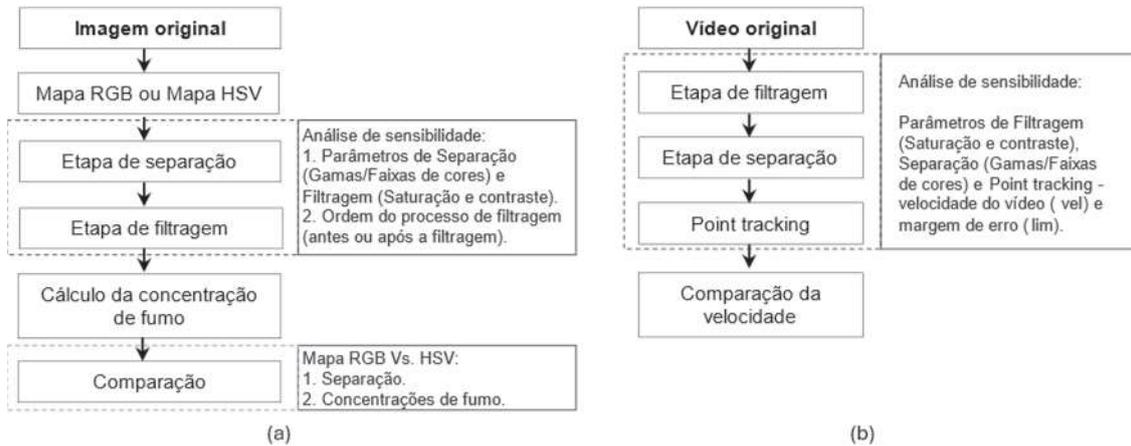


Figura 1 – Metodologia: (a) análise de fotografias e (b) análise de vídeos.

### 3 CASO DE ESTUDO

As imagens e vídeos das plumas térmicas utilizados neste estudo são resultados de um estudo experimental de um sistema de aquecimento cuja configuração é composta por vários componentes apresentados na Figura 2-a, destacam-se o termoacumulador e os dois radiadores, de alumínio fundido e extrudido com 8 elementos, na cor branca. O elemento de alumínio tem uma altura x largura x profundidade de 2000x80x95 mm<sup>3</sup> e um *heat output* para  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$  de 321 W, determinada de acordo com a norma EN 442 (EN 442-2 2015). Na Figura 2-a, o circuito de água quente é representado a vermelho, o circuito de retorno a azul e o circuito de água fria a verde. Esta instalação está situada no LNEC, Lisboa, Portugal, numa sala de ensaio de aproximadamente 4 200 m<sup>3</sup>, com condições ambientais não controladas. A relação altura da sala/altura do radiador é de 5.

Para os testes de fumo, foram utilizadas fontes técnicas de fumo de duas cores, vermelha e azul, para identificar a pluma térmica de cada radiador e as suas interações. Essas fontes de fumo têm dimensões de 120 x 50 x 50 mm<sup>3</sup> e uma duração média de 90 segundos, e foram posicionadas conforme os detalhes fornecidos na Figura 2-b. No processo de monitorização do ensaio foram utilizadas 3 câmaras para registar as plumas térmicas, com 60 fps, na vista frontal aproximada e total e na perspetiva aproximadamente isométrica. O estudo incluiu dois ensaios, em que no Ensaio 1 a velocidade inicial que caracteriza as fontes de fumo é de 0,95m/s e no Ensaio 2 é de 0,22m/s.

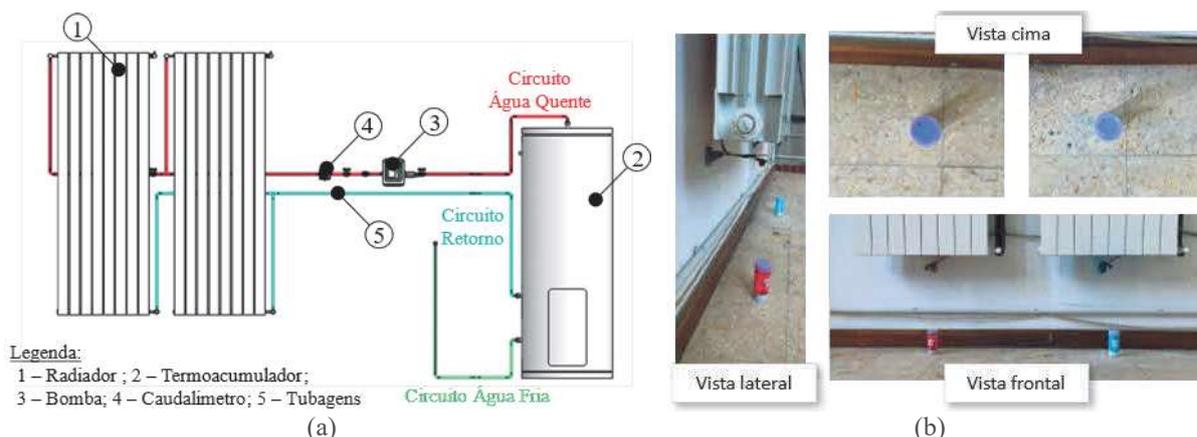


Figura 2 –Instalação experimental: (a) layout e (b) localização das fontes técnicas de fumo.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DE FOTOGRAFIAS

Na parte de análise de fotografias, foram consideradas as imagens resultantes dos ensaios experimentais, conduzindo a análise conforme ilustrado no esquema da Figura 1-a. Os cenários analisados estão detalhados no Quadro 1. O objetivo foi realizar uma análise comparativa entre a utilização de mapas RGB e HSV no processo de separação, visando estimar as concentrações de fumo. Optou-se pela color *thresholding segmentation*, devido à sua menor sensibilidade a limites complexos, variações de gradiente e ruído das imagens experimentais, em comparação à *edge detection*. A análise incluiu uma avaliação de sensibilidade, abrangendo diferentes parâmetros da etapa de separação para os mapas RGB e HSV (comparação dos cenários 1-2 e 5-6, respetivamente), da etapa de filtragem para os mapas RGB e HSV (comparação dos cenários 2-3 e 6-7, respetivamente) bem como a ordem das etapas de filtragem (comparação dos cenários 3-4 e 7-8, respetivamente), e limites para considerar um pixel RED ou BLUE no cálculo das concentrações (comparação dos cenários 7 e 9). Finalmente, a eficácia da utilização dos mapas RGB e HSV no processo de separação e estimativa das concentrações foi avaliada comparando os cenários 3 e 7 do Quadro 1.

Quadro 1 – Cenários da análise de fotografias.

Etapas	Variáveis			Cenários										
				RGB				HSV						
				1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Separação	Faixa Inicial	RED=[70, 0, 0; 150, 60, 80], BLUE=[0, 0, 50; 80, 120, 150]	RED=[0.85, 0.15, 0; 1, 1, 1]; BLUE=[0.4, 0.1, 0.1; 0.7, 1, 0.2]	•					•					
	Faixa Ref.	RED=[60, 0, 0; 255, 60, 90], [210, 110, 130; 240, 180, 190] [110, 30, 60; 190, 100, 150], [0, 0, 0; 100, 40, 20], [170, 80, 90; 210, 150, 160]; BLUE=[0, 0, 50; 80, 130, 225], [0, 0, 30; 90, 40, 60], [70, 40, 120; 120, 150, 220], [90, 80, 90; 150, 110, 220], [130, 70, 190; 190, 160, 220]	RED=[0.85, 0.15, 0; 1, 1, 1], [0.85, 0.1, 0.55; 1, 0.9, 1], [0, 0.4, 0; 0.05, 1, 1]; BLUE=[0.4, 0.1, 0.1; 0.7, 1, 0.2], [0.2, 0.2, 0; 0.85, 1, 0.95], [0.4, 0.1, 0.2; 0.7, 1, 0.3], [0.65, 0.65, 0.4; 0.9, 0.8, 0.5]			•	•	•		•	•	•	•	
Filtragem	Antes	(sat, c1, c2)=(1.5, 0.025, 0.85)	(sat, c1, c2)=(1.5, 0.025, 0.85)	•	•				•	•				
		(sat, c1, c2)=(1.2, 0.015, 0.9)	(sat, c1, c2)=(1.2, 0.015, 0.9)				•				•		•	
	Após	(sat, c1, c2)=(1.2, 0.015, 0.9)	(sat, c1, c2)=(1.2, 0.015, 0.9)				•					•		
Cálculo da Concentração	Lim.1	0.1	0.1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	Lim.2	-	0.5											•

\* Extremos de um intervalo de cores RGB [min.; max.]; \*\*Extremos de um intervalo de cores HSV [min.; max.].

A análise qualitativa foi realizada para três momentos dos ensaios, utilizando a vista frontal aproximada como referência. Os resultados dos Cenários 1 a 4, com os mapas RGB, são mostrados na Figura 3, enquanto os resultados dos Cenários 5 a 8, com os mapas HSV, são apresentados na Figura 4.

Na etapa de separação, foram analisados os cenários 1 e 2 para os mapas RGB e os cenários 5 e 6 para os mapas HSV. Com o aumento das faixas de cores, foi abrangida uma gama mais ampla de tons, incluindo tons intermédios de rosa e roxo nos mapas RGB. Nos mapas HSV, a inclusão das zonas de mistura foi mais eficiente. As diferenças entre os ensaios foram mínimas, permitindo a aplicação das mesmas faixas para ambos. As discrepâncias na separação foram destacadas com círculos amarelos. Na etapa de filtragem, foram examinadas duas variações nos valores de saturação e contraste. Nos mapas RGB, a comparação entre os Cenários 2 e 3 revelou sensibilidade aos resultados em relação a essas variáveis. No Cenário 3, com menor saturação e maior contraste, observou-se uma separação mais eficiente do fumo na pluma térmica, incluindo na zona de mistura e nos tons mais claros do fumo RED para o Ensaio 1. No Ensaio 2, houve uma melhoria, embora não tão significativa. As principais diferenças na etapa de filtragem foram destacadas com círculos verdes. Nos mapas HSV, a comparação



entre os Cenários 6 e 7 revelou que a etapa de separação foi pouco sensível às alterações desses parâmetros para ambos os ensaios.

Para determinar a ordem mais eficaz da etapa de filtragem em relação à etapa de separação, foram comparados os cenários 3 (antes) e 4 (após) para os mapas RGB, e os cenários 7 (antes) e 8 (após) para os mapas HSV. Em ambos o caso, observou-se que a separação antes da filtragem permitiu uma separação mais eficiente do fumo na pluma térmica. As maiores diferenças foram notadas nos 1º e 2º momentos dos Ensaios 1 e 2 para os mapas RGB, e no 3º momento do Ensaio 2 para os mapas HSV. O que indica que nesta abordagem de separação de fumo, a filtragem deve ser realizada antes da etapa de separação. Em relação aos limites para classificar um pixel como "RED" ou "BLUE" no cálculo da estimativa das concentrações nos mapas RGB, foram consideradas duas variações. Na Figura 5 observou-se sensibilidade ao valor do limite: um limite mais alto (Cenários 9) resultou em determinações menos eficientes, enquanto um limite de 0,1 (Cenário 7) produziu estimativas mais precisas, contudo verificou-se que não é necessário ajustar este limite entre ensaios. A análise da eficácia da utilização dos mapas RGB e HSV no processo de separação e estimativa das concentrações (cenários 3 vs. 7) demonstrou que os mapas HSV foram mais eficazes na separação do fumo, resultando em estimativas mais completas de concentração, com menos falhas em comparação com os mapas RGB, as diferenças foram assinaladas com círculos amarelos na Figura 5. A Figura 6 demonstra a versatilidade do processo de filtragem, separação e estimativa de concentrações em diferentes ensaios e perspetivas de imagens para o Ensaio 2. A análise qualitativa revela que, independentemente do ângulo de filmagem, o processo opera de forma eficaz, permitindo obter as estimativas de concentrações.

Além da avaliação qualitativa anterior, uma avaliação quantitativa foi conduzida, calculando a distância Euclidiana entre os pixels correspondentes das imagens originais. Os resultados confirmam o impacto significativo do ajuste das faixas, com variações na similaridade conforme apresentado no Quadro 2. A decisão de realizar a filtragem antes ou após a separação teve maior impacto nos mapas RGB do que nos mapas HSV, com valores de similaridade variando de acordo. Além disso, a filtragem antes da separação demonstrou vantagens em termos de tempo de execução. Embora a análise qualitativa tenha revelado diferenças mais visíveis na separação em "RED" e "BLUE" entre o uso dos mapas RGB e HSV, as diferenças quantitativas não foram tão marcantes.

Quadro 2 – Valores de similaridade entre cenários da análise de fotografias.

Cenários*	Ensaio 1			Ensaio 2		
	1º momento	2º momento	3º momento	1º momento	2º momento	3º momento
Cenário 1/ Cenário 2	0.91	0.85	0.84	0.88	0.82	0.77
Cenário 2/ Cenário 3	0.95	0.92	0.88	0.94	0.89	0.85
Cenário 3/ Cenário 4	0.95	0.91	0.93	0.93	0.89	0.93
Cenário 5/ Cenário 6	0.93	0.89	0.72	0.93	0.87	0.69
Cenário 6/ Cenário 7	0.97	0.96	0.93	0.97	0.95	0.92
Cenário 7/ Cenário 8	0.99	0.99	0.98	0.98	0.99	0.96
Cenário 3/ Cenário 7	0.94	0.94	0.90	0.93	0.89	0.90

\*Escala de cores aplicada individualmente a cada linha do quadro: do vermelho ao verde, com valores máximos a vermelho, mínimos a verde e intermédios a amarelo (percentil de 50).

## 4.2 ANÁLISE DE VÍDEOS

Na parte de análise de vídeos, os vídeos capturados durante os ensaios experimentais foram avaliados conforme ilustrado na Figura 1-b e apresentados em diferentes cenários no Quadro 3. O objetivo principal foi analisar o intervalo de amostragem apropriado entre as imagens processadas, considerando a viabilidade da análise em tempo real. Para isso, foi utilizado o *object motion tracking*, incluindo as contribuições que resultaram da parte de Análise de Imagens. A análise de sensibilidade realizada, abrangeu diferentes parâmetros, como a etapa de filtragem (comparação dos cenários 1-3),



a separação das cores (comparação dos cenários 3-4), a margem de erro do *point tracking* (comparação dos cenários 4-5 e 7-8) e a velocidade do vídeo (comparação dos cenários 5-7). Por fim, a análise do intervalo de amostragem adequado entre as imagens processadas e a verificação da viabilidade da realização dessa análise em tempo real teve por base os Cenários 5 e Cenário 6 para diferentes taxas de amostragem (30 fps e 60 fps), e a possibilidade de aplicação a várias perspetivas de filmagem.

Quadro 3 – Cenários da análise de vídeos.

Etapas	Variáveis	Cenários							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Filtragem	(sat, cont)=(1,1)	•							
	(sat, cont)=(1.2,1.3)		•						
	(sat, cont)=(1.1,1.2)			•	•	•	•	•	•
Separação	Faixa RED=[0, 0, 0; 0.05, 1, 1], Faixa BLUE=[0.2, 0.2, 0; 0.85, 1, 0.95];	•	•	•					
	Faixa RED=[0.85, 0.15, 0; 1, 1, 1], [0.85, 0.1, 0.35; 1, 1, 1], [0, 0, 0; 0.05, 1, 1], Faixa BLUE=[0.4, 0.1, 0.1; 0.7, 1, 0.2], [0.2, 0.2, 0; 0.85, 1, 0.95], [0.4, 0.1, 0.2; 0.7, 1, 0.3], [0.65, 0.65, 0.4; 0.9, 0.8, 0.5]				•	•	•	•	•
Rastreamento dos pontos	(lim,vel)=(50,1x)	•	•	•	•				
	(lim,vel)=(5,1x)					•			
	(lim,vel)=(5,0.5x)						•		
	(lim,vel)=(5,0.3x)							•	
	(lim,vel)=(1.25,0.3x)								•

Na análise foram utilizados vídeos de 10 segundos para cada um dos Ensaios 1 e 2, divididos em duas partes: inicial (Parte 1) e desenvolvida (Parte 2) da pluma térmica. A comparação foi feita usando *frames* de vista frontal aproximada como referência principal. Na etapa de filtragem, três variações nas configurações de saturação e contraste foram exploradas, resultando nos Cenários 1 a 3 para cada ensaio. O Cenário 2 apresentou saturação e contraste superiores ao Cenário 1, enquanto o Cenário 3 teve valores inferiores ao Cenário 2, mas superiores ao Cenário 1. Aumentar significativamente a saturação e o contraste resultaram em menor filtragem do fumo "RED" e "BLUE", enquanto os parâmetros do Cenário 3 realçaram o fumo "RED" sem comprometer a separação, conforme exibido na Figura 7. Na etapa de separação, foram exploradas duas variações nas faixas "RED" e "BLUE". O Cenário 3 tinha uma única faixa de cores para cada fumo, enquanto o Cenário 4 tinha múltiplas faixas. A inclusão da zona de mistura de fumos associados ao "RED" foi identificada na separação do Cenário 4, mantendo-se consistente nos *frames* subsequentes de ambos os ensaios, como é visível na Figura 7.

Na etapa de rastreamento dos pontos correspondentes às partículas de fumo colorido, foi avaliada a sensibilidade aos parâmetros da margem de erro do *point tracking*. Foram consideradas três variações do parâmetro de margem de erro (*MaxBidirectionalError* do *vision.PointTracker*), comparando os cenários 4 e 5, e os cenários 7 e 8. Ambos os pares de cenários tinham a mesma velocidade, mas margens de erro distintas. Nos cenários 4 e 5, com velocidade de aquisição de vídeo original (1x), as margens de erro foram de 50 e 5, respetivamente, enquanto nos cenários 7 e 8, com velocidade reduzida (0.3x), as margens de erro foram de 5 e 1.25, respetivamente. A análise baseada na velocidade no ponto  $[x,y]_{RED}=[241.5,379.5]$  e  $[x,y]_{BLUE}=[391.5,375.5]$ , mostrada na Figura 8, revela diferenças significativas na velocidade da faixa "RED" entre os cenários 4 e 5, com velocidades maiores em margens de erro menores. Nos cenários 7 e 8, observa-se o oposto, com velocidades menores em margens de erro menores, especialmente em velocidades de vídeo reduzidas. Recomenda-se o uso de margens de erro mais baixas (entre 5 e 1.25) para uma maior precisão na faixa "RED", sem comprometer a faixa "BLUE".

Em relação à velocidade do vídeo, observou-se que para a mesma margem de erro, a velocidade do ponto é consistente para a faixa "BLUE". Para a faixa "RED", a velocidade mais alta resulta em diferenças de cerca de 0.03 m/s, enquanto para velocidades reduzidas (0.5x e 0.3x), as variações são mínimas. Sugere-se o uso



de velocidades reduzidas, especialmente em torno de 0.5x e 0.3x, para resultados mais precisos, especialmente para a faixa "RED". A comparação entre os cenários 5 e 6 permitiu verificar a influência do intervalo de amostragem (30 fps e 60 fps) no rastreamento de pontos. Observou-se que, para a faixa "BLUE", não houve diferença significativa na velocidade de rastreamento com a alteração do intervalo. Porém, para a faixa "RED", uma taxa de amostragem de 60 fps resultou em velocidades mais altas em comparação com 30 fps, independentemente da velocidade do vídeo. Isso sugere que uma taxa de amostragem mais alta pode melhorar a precisão do rastreamento para a faixa "RED". No entanto, taxas de amostragem mais altas podem exigir mais recursos computacionais, o que pode afetar o processamento em tempo real. Apesar de as comparações terem sido feitas a 30 fps é possível com recursos tecnológicos mais robustos realizar análises em tempo real com taxas de amostragem mais altas.

Por fim, na Figura 9 demonstra-se a capacidade de rastreamento simultâneo de vários pontos. Esta característica evidencia a sua versatilidade aplicada aos vídeos de separação do Cenário 6 para o Ensaio 2 Parte 2. Pela análise dos resultados é notório que na região mais próxima do radiador (ponto P1) houve uma velocidade superior, enquanto as regiões de menor velocidade (ponto P3) correspondem às zonas da pluma mais próximas da cobertura, tanto para a faixa "RED" quanto para a faixa "BLUE" do fumo na pluma térmica.

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo, uma abordagem de processamento de imagem foi adotada para analisar os resultados experimentais de dois ensaios, utilizando fumos coloridos para visualizar o desenvolvimento de plumas térmicas sobre radiadores. A metodologia implementada foi dividida em duas partes: a parte de análise de fotografias e a parte de análise de vídeos dos resultados experimentais.

Na análise de fotografias, considerando 9 cenários distintos, as principais conclusões foram a sensibilidade aos valores das gamas/faixas "RED" e "BLU" na etapa de separação, a maior sensibilidade às alterações de saturação e contraste nos mapas RGB na etapa de filtragem, a eficiência da filtragem antes da separação e a sensibilidade ao limite de classificação "RED" e "BLUE" na estimativa de concentrações, com resultados mais consistentes nos mapas HSV.

Na análise de vídeos, considerando 8 cenários distintos, as principais conclusões foram o impacto significativo dos ajustes de saturação e contraste na eficácia da filtragem, a influência do número de faixas de cores na separação, a sensibilidade à margem de erro no rastreamento de pontos, a importância do intervalo de amostragem na velocidade dos pontos e o potencial para análise em tempo real com taxa de 60 fps. A análise mostrou-se versátil, permitindo o rastreamento simultâneo de vários pontos e adaptando-se a diferentes ângulos de filmagem.

Com base nas conclusões do estudo, perspectivas futuras incluem explorar o impacto de variações nas condições ambientais na convecção natural e investigar configurações em diversos ambientes. Para aplicações mais gerais, propõe-se a otimização automática de parâmetros de processamento de imagem e a integração de técnicas de aprendizagem automática. Além disso, a metodologia pode ser aplicada na monitorização ambiental, incluindo deteção de poluentes e análise de padrões climáticos.

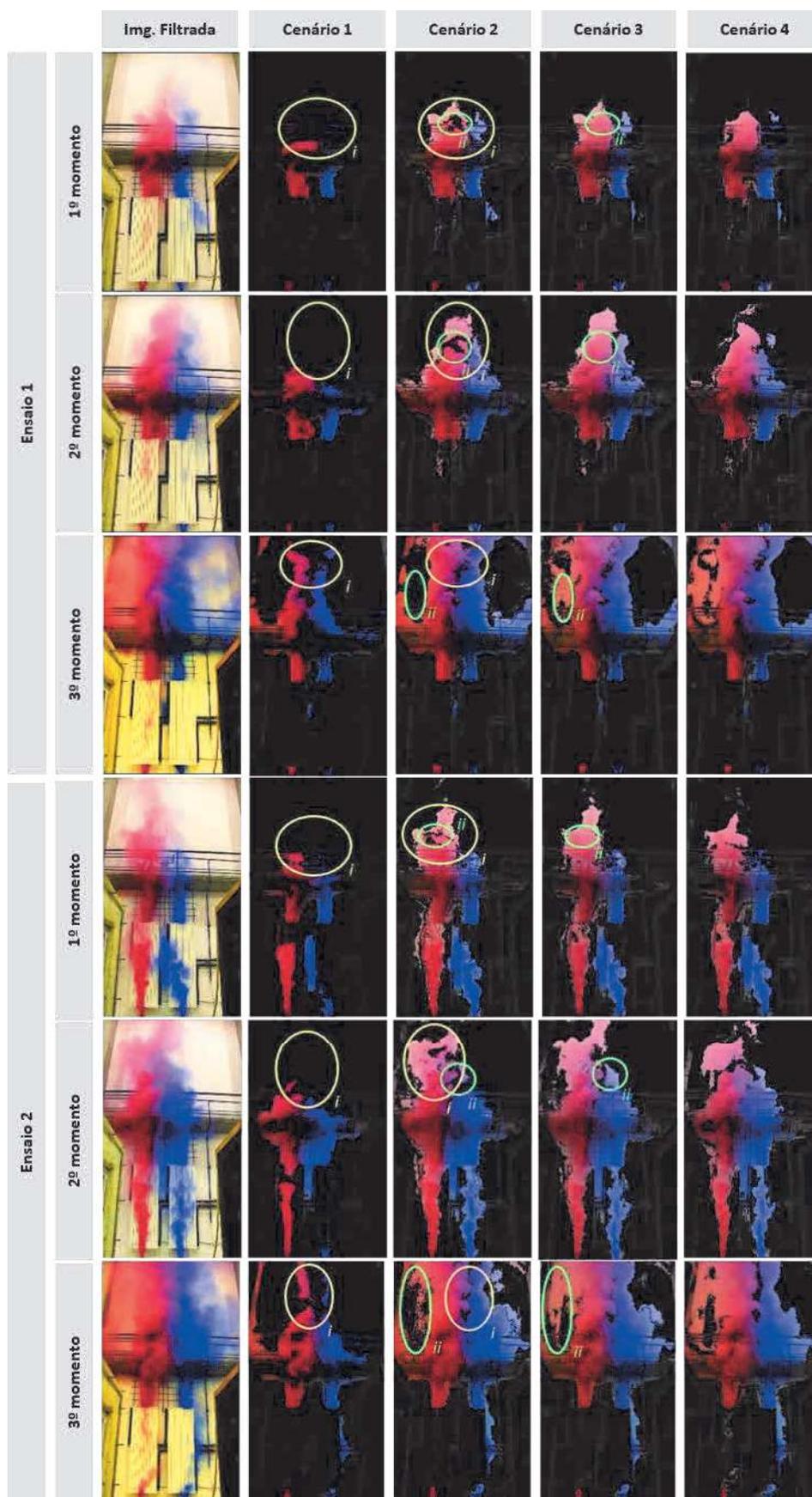


Figura 3 – Cenário 1 a 4 da análise de fotografias.

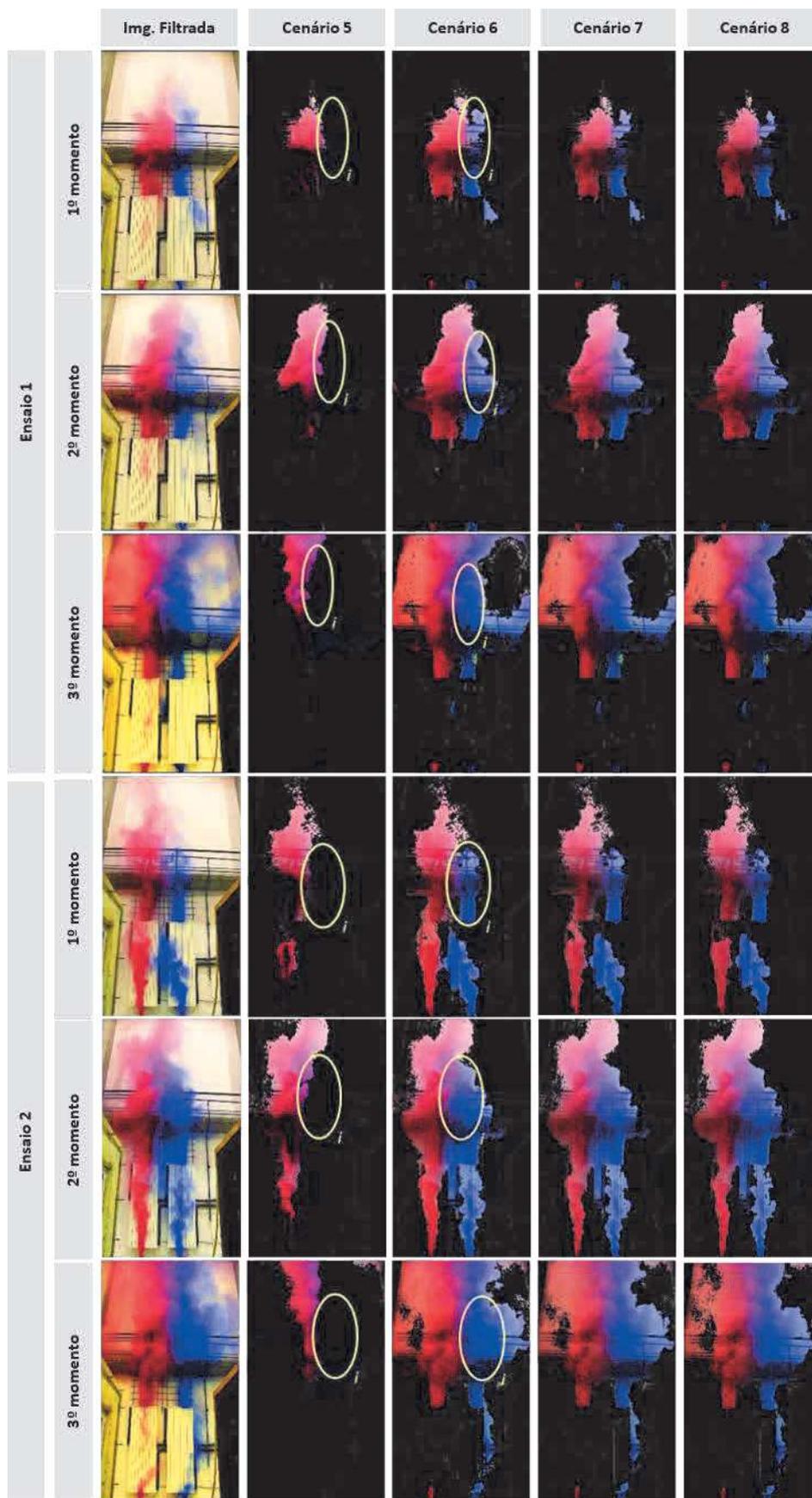


Figura 4 – Cenário 5 a 8 da análise de fotografias.

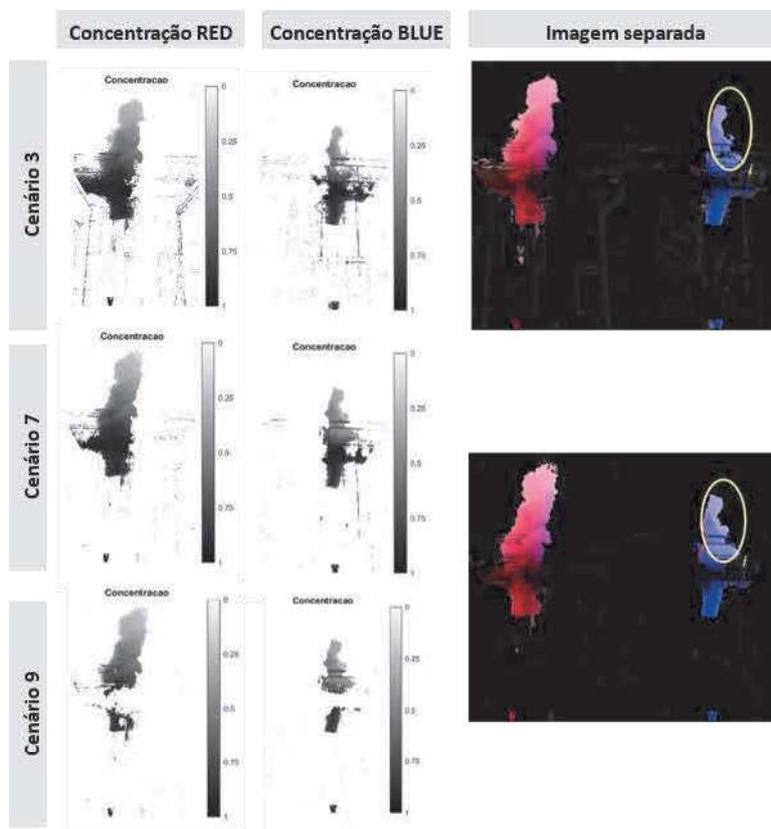


Figura 5 – Estimativa da concentração para o Ensaio 1 da análise de fotografias.

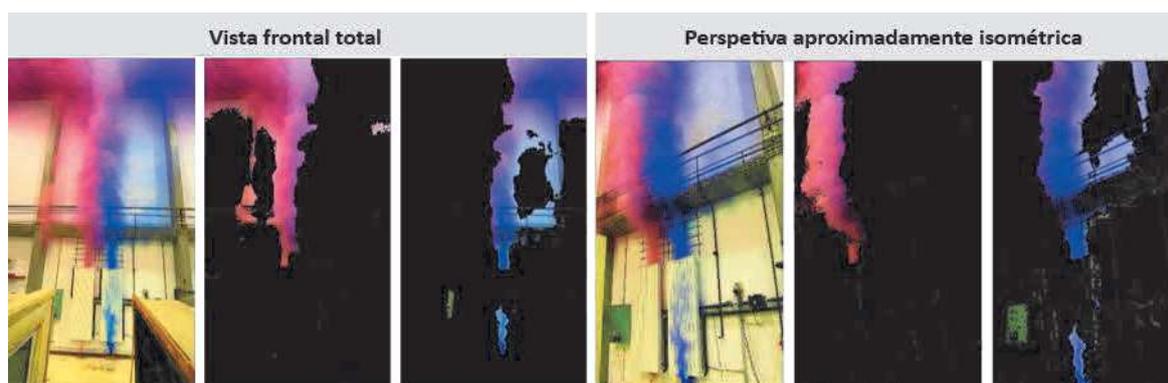


Figura 6 – Aplicação das etapas em diferentes vista e prespetiva para o Ensaio 2 da análise de fotografias.



		Cenário 1			Cenário 2			Img. Filtrada	Cenário 3		Cenário 4	
		Img. Filtrada	RED	BLUE	Img. Filtrada	RED	BLUE		RED	BLUE	RED	BLUE
Ensaio 1	Frame Parte 1											
	Frame Parte 2											
Ensaio 2	Frame Parte 1											
	Frame Parte 2											

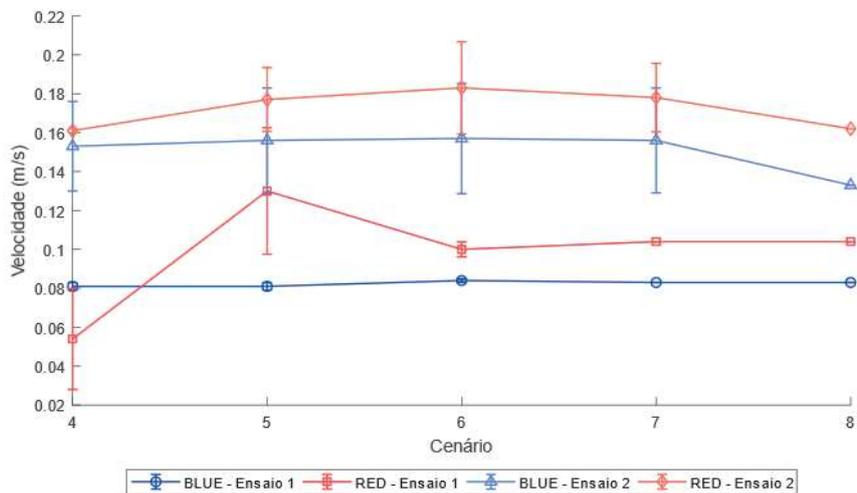


Figura 8 – Estimativa da velocidade no ponto  $[x,y]_{RED}=[241.5,379.5]$  e  $[x,y]_{BLUE}=[391.5,375.5]$  para os Cenários 4 a 8 do Ensaio 1 e Ensaio 2 da análise de vídeos.

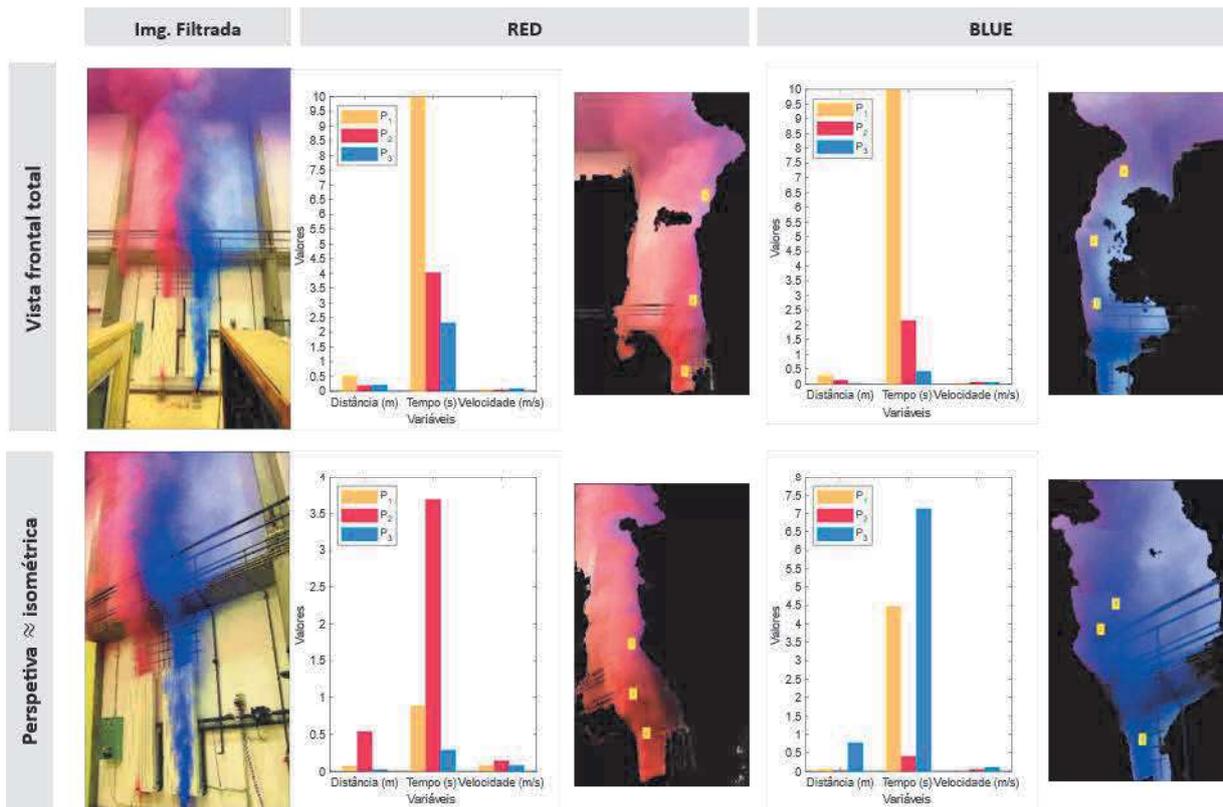


Figura 9 – Estimativa da velocidade para múltiplos pontos em diferentes vista e perspetiva da análise de vídeos (cenário 6 do Ensaio 2 Parte 2).

## REFERÊNCIAS

- Aleksi, Ivan, Željko Hocenski, e Dieter Kraus. 2018. Real-time biscuit tile image segmentation method based on edge detection. *ISA Transactions* 76: 246–54.
- Aydar, Emir, e Ismail Ekmekçi. 2012. Thermal efficiency estimation of the panel type radiators with CFD analysis. *Isi Bilimi Ve Teknigi Dergisi/ Journal of Thermal Science and Technology* 32 (2): 63–71.



- Babu, Praveenkumar, e Eswaran Parthasarathy. 2022. FPGA implementation of multi-dimensional Kalman filter for object tracking and motion detection. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 33: 101084. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.101084>.
- Brandl, D et al. 2021. Thermal evaluation of a component heating system for a monastery cell with measurements and CFD simulations. *Journal of Building Engineering* 39 (February): 102264. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102264>.
- Calisir, Tamer, e Senol Baskaya. 2021. The influence of different geometrical dimensions of convectors on the heat transfer from panel radiators. *SN Applied Sciences* 3(3): 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04276-2>.
- Calisir, Tamer, Senol Baskaya, Hakan Onur Yazar, e Sinan Yucedag. 2016. Experimental and Numerical Prediction of Flow Field around a Panel Radiator. *Conference on Environment and Renewable Energy*.
- Calisir, Tamer, Hakan O. Yazar, e Senol Baskaya. 2019. Thermal performance of PCCP panel radiators for different convector dimensions – An experimental and numerical study. *International Journal of Thermal Sciences* 137 (5): 375–87. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.007>.
- Calisir, Tamer, Hakan O Yazar, e Senol Baskaya. 2021. Evaluation of flow field over panel radiators to investigate the effect of different convector geometries. *Journal of Building Engineering* 33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101600>.
- Canales, Jared Cervantes et al. 2024. Optimal segmentation of image datasets by genetic algorithms using color spaces. *Expert Systems With Applications* 238 (PD): 121950. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121950>.
- Carrilho da Graça, Guilherme, e Paul Linden. 2016. Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings. *Building and Environment* 107: 263–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.007>.
- Chacon-Murguia, Mario I, e Graciela Ramirez-Alonso. 2015. Fuzzy-neural self-adapting background modeling with automatic motion analysis for dynamic object detection. *Applied Soft Computing Journal* 36: 570–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.08.007>.
- Chen, Long, Yin-ping Zhao, e Chuanbin Zhang. 2022. Efficient kernel fuzzy clustering via random Fourier superpixel and graph prior for color image segmentation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 116 (August): 105335. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105335>.
- Chen, Siyuan et al. 2023. Novel learning framework for optimal multi-object video trajectory tracking. *Virtual Reality & Intelligent Hardware* 5(5): 422–38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.vrih.2023.04.001>.
- Ekmekci, İsmail, e Emir Aydar. 2016. A new design for panel radiators using CFD. *CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2016 – ICAME2016* (May).
- EN 442-2. 2015. EN 442-2, Radiators and Convectors – Part 2: Test Methods and Rating. *COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION*.
- Etheridge, David. 2015. A perspective on fifty years of natural ventilation research. *Building and Environment* 91: 51–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033>.
- Ganesh, Ghogare Abhijeet, Shobha Lata, e Tikendra Nath. 2020. Numerical simulation for optimization of the indoor environment of an occupied office building using double-panel and ventilation



- radiator. *Journal of Building Engineering* 29(December 2019): 101139. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101139>.
- Gomes, Maria. 2013. Avaliação das Taxas de Infiltração de Ar no Sector Residencial. *MSc Thesis - Universidade de Coimbra*.
- Hernández, R. H. 2015. Natural convection in thermal plumes emerging from a single heat source. *International Journal of Thermal Sciences* 98: 81–89. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072915001751>.
- Huang, Kan et al. 2023. Motion Context guided Edge-preserving network for video salient object detection. *Expert Systems With Applications* 233(June): 120739. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120739>.
- Karthick, P et al. 2023. Investigations of color image segmentation based on connectivity measure , shape priority and normalized fuzzy graph cut. *Applied Soft Computing* 139: 110239. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110239>.
- Li, Haibin, Jiawei Qi, Yaqian Li, e Wenming Zhang. 2024. A dual-branch selection method with pseudo-label based self-training for semi-supervised smoke image segmentation. *Digital Signal Processing* 145: 104320. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104320>.
- Li, Yuming, Wei Zhang, Yanyan Liu, e Xiaorui Shao. 2022. A lightweight network for real-time smoke semantic segmentation based on dual paths. *Neurocomputing* 501: 258–69. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.06.026>.
- Liu, Dongfang et al. 2020. Video object detection for autonomous driving : Motion-aid feature calibration. *Neurocomputing* 409: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.05.027>.
- Liu, Yanan et al. 2020. Effects of different types of entrances on natural ventilation in a subway station. *Tunnelling and Underground Space Technology* 105 (May): 103578. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103578>.
- Lu, Bo et al. 2023. Fusion-based color and depth image segmentation method for rocks on conveyor belt Standard Deviation of Saturation. *Minerals Engineering* 199(April).
- Lu, Yujie et al. 2023. A deep learning method for building façade parsing utilizing improved SOLOv2 instance segmentation. *Energy & Buildings* 295 (1239): 113275. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113275>.
- Marmanis, D et al. 2018. Classification with an edge : Improving semantic image segmentation with boundary detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 135: 158–72. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.009>.
- Mateus, Rafaela, José M C Pereira, e Armando Pinto. 2023. Natural ventilation of large air masses : experimental and numerical techniques review. *Energy & Buildings*: 113120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113120>.
- Mengíbar-Rodríguez, Míriam, e Jesús Chamorro-Martínez. 2022. An image-based approach for building fuzzy color spaces. *Information Sciences* 616: 577–92.
- Myhren, Jonn Are, e Sture Holmberg. 2011. Improving the thermal performance of ventilation radiators e The role of internal convection fins. *International Journal of Thermal Sciences* 50(2): 115–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.10.011>.
- Oprinescu, Serban, Radu-mihai Coliban, e Mihai Ivanovici. 2022. Polarization-based optical



- characterization for color texture analysis and segmentation. *Pattern Recognition Letters* 163: 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2022.09.019>.
- Qiu, Ji, Lide Wang, Yu Hen, e Yin Wang. 2020. Two motion models for improving video object tracking performance. *Computer Vision and Image Understanding* 195 (March): 102951. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2020.102951>.
- Rahmati, A. R., e A. Gheibi. 2020. Experimental and numerical analysis of a modified hot water radiator with improved performance. *International Journal of Thermal Sciences* 149. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106175>.
- Sun, Guangmin, Yuxuan Wen, e Yu Li. 2022. Instance segmentation using semi-supervised learning for fire recognition. *Heliyon* 8(March).
- Turner, John Stewart. 1979. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge university press.
- Vijayan, Hima, M Subramaniam, e K Sathiyasekar. 2024. A-MKMC : An effective adaptive-based multilevel K-means clustering with optimal centroid selection using hybrid heuristic approach for handling the incomplete data. *Data & Knowledge Engineering* 150 (March 2023): 102243. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2023.102243>.
- Wang, Ying et al. 2020. Numerical study of an unsteady confined thermal plume under the influence of gas radiation. *International Journal of Thermal Sciences* 156. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106474>.
- Wu, Han, e Guizhong Liu. 2022. A dynamic infrared object tracking algorithm by frame differencing. *Infrared Physics and Technology* 127 (November 2021): 104384. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104384>.
- Wu, Qing, Zhaojun Wang, Jiankai Dong, e Jing Liu. 2021. A method for judging the overheating of the radiator in the compensation of window draught based on thermal image velocimetry. *Building and Environment* 197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107858>.
- Yu, Hongyang et al. 2020. Conditional GAN based individual and global motion fusion for multiple object tracking in UAV videos. *Pattern Recognition Letters journal* 131: 219–26.
- Yuan, Feiniu, Yu Shi, Lin Zhang, e Yuming Fang. 2023. A cross-scale mixed attention network for smoke segmentation. *Digital Signal Processing* 134: 103924. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.103924>.
- Zhang, Hongrui et al. 2022. A motion-appearance-aware network for object change detection. *Knowledge-Based Systems* 255: 109612. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.109612>.
- Zhang, Yugui, Jin Zheng, Chi Zhang, e Bo Li. 2018. An effective motion object detection method using optical flow estimation under a moving camera. 55 (April): 215–28.
- Zhao, Xiangjun, e Zhenlong Du. 2023. Video colorization with semantic preservation and consistency. *Computers and Electrical Engineering* 108 (62177028): 108697. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108697>.