



A relevância da modelagem computacional na otimização dos sistemas de ventilação para a mitigação de poluentes em cozinhas industriais

ALISSON SANTOS SILVA

outubro de 2025

**A relevância da modelagem computacional na
otimização dos sistemas de ventilação para a
mitigação de poluentes em cozinhas industriais**

Alisson Santos Silva

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em Energia**

Orientador: Professor Carlos Miguel Pereira da Silva Santos, do ISEP

Júri:

Presidente:

Rui Filipe Neves de Araújo Rego, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

Abel Ilah Rouboa, Professor Associado, FEUP

Carlos Miguel Pereira da Silva Santos, Professor Adjunto, ISEP

Agradecimentos

Ao encerrar esta etapa tão marcante da minha trajetória, expresso a minha mais sincera gratidão a todos quantos tornaram possível este trabalho. Em primeiro lugar, agradeço à minha família, cujo apoio inabalável sustentou cada passo desta jornada. À minha esposa, sou-lhe imensamente grato pela paciência e compreensão; dia após dia, sonhou comigo, orientou-me perante os desafios e celebrou as minhas conquistas.

Ao meu orientador, Engenheiro Carlos Santos, devo profundo reconhecimento pela orientação dedicada e pela confiança que sempre depositou em mim. Estendo também os meus agradecimentos ao grupo *France Air Portugal*, que gentilmente disponibilizou os dados experimentais, o espaço de investigação e o tempo de cada colaborador, partilhando o seu conhecimento com generosidade e paciência.

Aos que um dia duvidaram, manifesto o meu reconhecimento: as vossas palavras reforçaram a minha determinação e ensinaram-me que, com esforço e perseverança, somos capazes de ultrapassar qualquer adversidade.

Sou grato ao Brasil, minha pátria e berço dos valores que ainda hoje me impulsionam, por ter-me dado a base sobre a qual edifiquei este percurso. Por fim, agradeço a Portugal, que acolheu a mim e à minha esposa quando procurámos novos desafios, oferecendo-nos o apoio e as oportunidades essenciais para que este trabalho ganhasse forma e alcance académico.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de sistemas de ventilação em cozinhas profissionais, integrando resultados experimentais, cálculos normativos e simulações numéricas, de modo a fornecer critérios de projeto mais realistas para a contenção de poluentes e a eficiência energética. O percurso metodológico estruturou-se em três eixos complementares. No eixo experimental, foi conduzido um ensaio em cozinha-laboratório equipada com hotte de extração, cortinas de ar e sistema de compensação, com grelhador operando em regime intensivo e alimentação controlada de água para geração de vapor. As variáveis de temperatura, humidade relativa, pressão e caudais foram monitorizadas a cada dois segundos em pontos estratégicos, e a taxa de remoção de vapor foi determinada por análise psicrométrica a partir das propriedades do ar húmido e dos caudais de extração. No eixo normativo, o dimensionamento foi realizado de acordo com a norma EN 16282, aplicando-se o método preliminar baseado na velocidade de captura e o método detalhado, que considera carga térmica, fatores geométricos e indução da pluma. Os resultados forneceram caudais de 3033 e 2844 metros cúbicos por hora, respetivamente, sendo o segundo adotado como referência para as análises. No eixo numérico, desenvolveu-se modelação computacional em plataforma comercial integrada ao ambiente CAD, com malha cartesiana de células cortadas, modelo de turbulência modificado e transporte de espécie para vapor de água. Foram avaliados critérios de convergência espacial e temporal, estabelecendo-se malha de base de 30 milímetros e passo temporal de 0,25 segundos como compromisso entre custo computacional e precisão. A investigação organizou-se em dezasseis cenários: o primeiro validou o modelo CFD frente ao ensaio físico; os seguintes isolaram o efeito da cortina e da compensação; e os restantes compararam combinações de geometria, extração e emissão normativas e experimentais. A validação demonstrou que o modelo reproduz a evolução temporal e espacial da pluma com fidelidade aceitável, obtendo erro médio de 7,62 por cento e coeficiente de determinação de 0,79. A análise dos dispositivos auxiliares revelou funções complementares: a compensação moderou picos térmicos, enquanto a cortina organizou o jato e reduziu o espalhamento lateral; a ausência de ambos levou a maior instabilidade, acréscimo da carga térmica acumulada e redução da eficiência de captação para 50 por cento. Nos cenários comparativos, verificou-se que todos apresentaram algum nível de fuga, mesmo quando dimensionados por norma, e que a variabilidade da emissão e os efeitos de parede da geometria real intensificam episódios críticos. Concluiu-se que critérios normativos baseados em limites fixos são insuficientes para representar a complexidade de cozinhas reais, e que abordagens integradas, considerando experimentação, simulação e análise crítica de normas, oferecem subsídios mais robustos para o projeto de sistemas de ventilação, alinhando segurança, eficiência energética e sustentabilidade.

Palavras-chave: Ventilação profissional, Cozinhas industriais, Contenção de poluentes, CFD

Abstract

This dissertation aims to evaluate the performance of ventilation systems in professional kitchens by integrating experimental results, normative calculations, and numerical simulations, in order to provide more realistic design criteria for pollutant containment and energy efficiency. The methodological approach was structured around three complementary axes. In the experimental axis, a test was carried out in a kitchen laboratory equipped with an extraction hood, air curtains, and a compensation system, with a grill operating under intensive regime and controlled water feeding for vapor generation. Temperature, relative humidity, pressure, and airflow variables were monitored every two seconds at strategic points, and the vapor removal rate was determined through psychrometric analysis based on moist air properties and extraction flows. In the normative axis, the design was carried out in accordance with EN 16282, applying the preliminary method based on capture velocity and the detailed method that considers thermal load, geometric factors, and plume induction. The results yielded extraction rates of 3033 and 2844 cubic meters per hour, respectively, with the latter adopted as the reference for analysis. In the numerical axis, computational modeling was developed in a commercial platform integrated into the CAD environment, using a Cartesian cut-cell mesh, a renormalized turbulence model, and species transport for water vapor. Spatial and temporal convergence criteria were evaluated, establishing a base mesh of 30 millimeters and a time step of 0.25 seconds as a compromise between computational cost and accuracy. The investigation was organized into sixteen scenarios: the first validated the CFD model against the physical test; the following isolated the effects of the air curtain and compensation; and the remaining compared combinations of normative and experimental geometry, extraction, and emission. Validation demonstrated that the model reproduced the temporal and spatial evolution of the plume with acceptable fidelity, achieving a mean error of 7.62 percent and a coefficient of determination of 0.79. The analysis of auxiliary devices revealed complementary functions: compensation mitigated thermal peaks, while the curtain organized the jet and reduced lateral dispersion; the absence of both led to greater instability, increased accumulated thermal load, and reduced capture efficiency to 50 percent. In comparative scenarios, it was found that all presented some level of leakage, even when dimensioned by the standard, and that emission variability and wall effects of the real geometry intensified critical episodes. It was concluded that normative criteria based on fixed limits are insufficient to represent the complexity of real kitchens, and that integrated approaches, considering experimentation, simulation, and critical analysis of standards, provide more robust support for the design of ventilation systems, aligning safety, energy efficiency, and sustainability.

KEYWORDS: Professional ventilation, Industrial kitchens, Pollutant containment, CFD

Índice

Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas.....	xv
Acrónimos e Símbolos.....	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Organização do trabalho	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Ventilação em cozinhas industriais	4
2.1.1. Conceitos de ventilação e renovação de ar	4
2.1.2. Desafios operacionais específicos em cozinhas industriais	8
2.2. Normas e regulamentações	9
2.2.1. Norma EN 16282 – Equipamentos para cozinhas profissionais	10
2.2.1.1. Princípios gerais e critérios para ventilação	12
2.2.1.2. Métodos de dimensionamento	15
2.2.1.2.1. Dimensionamento preliminar	16
2.2.1.2.2. Dimensionamento detalhado.....	17
2.2.2. Avaliação da qualidade do ar interior: Portaria n.º 138-G/2021.....	20
2.2.3. Normas e regulações complementares	22
2.3. Poluentes e estratégias de controlo	23
2.3.1. Emissões em processos de confeção	24
2.3.2. Tecnologias e indicadores de eficiência na mitigação de poluentes.....	26
2.4. Aspectos económicos e ambientais	30
2.4.1. Consumo energético dos sistemas HVAC em cozinhas industriais.....	31
2.4.2. Sistemas HVAC como vetores ESG	35
2.5. Modelação computacional aplicada à ventilação	38
2.5.1. Princípios e limitações dos métodos numéricos.....	39
2.5.2. Desafios e oportunidades na integração da CFD.....	42
3. Métodos e Aplicação.....	45
3.1. Infraestrutura experimental.....	45
3.2. Procedimento experimental	49
3.3. Dimensionamento normativo	52
3.4. Modelação computacional.....	53
3.4.1. Arquitetura e fundamentos numéricos	53
3.4.2. Estudo de convergência e sensibilidade	60
3.4.3. Definição das condições de contorno e inicialização.....	64

3.5. Abordagem para análise dos resultados	69
4. Resultados e Discussão	75
4.1. Validação experimental.....	75
4.2. Impacto dos elementos construtivos.....	79
4.3. Análise da contenção da pluma	87
5. Conclusão	95
5.1. Conclusões finais	95
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	97
Referências.....	101
Declaração de Integridade	113

Lista de Figuras

Figura 1 - Ventilação natural. Autor (IA – ChatGPT, 2025).....	5
Figura 2 - Ventilação mecânica. Autor (IA – ChatGPT, 2025).....	6
Figura 3 - Ventilação mista. Autor (IA – ChatGPT, 2025)	7
Figura 4 - Sistemas de ventilação local (a) e geral (b). Autor (IA – ChatGPT, 2025)	7
Figura 5 - Afastamento frontal (a) e lateral (b), considerando o ângulo de ascensão da pluma (France Air, 2025).....	14
Figura 6 - Representação da extração de fluxo de ar induzida termicamente (Adaptado de EN 16282)	19
Figura 7 - Consumo energético por área física (Mudie et al., 2014).....	32
Figura 8 - Consumo energético por função (Mudie et al., 2014)	32
Figura 9 - Consumo diário vs. refeições servidas (Mudie et al., 2014)	33
Figura 10 - Perfil de consumo elétrico em 24 horas (Mudie et al., 2014).....	33
Figura 11 - Consumo por equipamento (Mudie et al., 2014)	34
Figura 12 - Consumo comparado por grelhador (Mudie et al., 2014)	34
Figura 13 - Hotte Mooréa® Pulse HPC (France Air, 2025).....	46
Figura 14 - Esquema do funcionamento integrado de extração e insuflação (France Air, 2025)	46
Figura 15 - Perfis de velocidade do ar insuflado pelo sistema de compensação (France Air, 2025)	47
Figura 16 - Grelhador horizontal GHPI 2/600 (GRESILVA, 2025)	47
Figura 17 - Arranjo experimental. (Autor, 2019).....	48
Figura 18 - Dados brutos dos sensores ao longo do experimento. (Autor, 2025)	50
Figura 19 - Evolução temporal do caudal de vapor de água. (Autor, 2025)	52
Figura 20 - Layout do domínio. Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	52
Figura 21 - Malha computacional próxima à interface sólido-fluido (Mentor, 2024)	56
Figura 22 - Tipos de malha computacional (Mentor, 2024).....	56
Figura 23 - Níveis de refinamento: (a) básica; (b) axial nível 1; (c) axial nível 2; (d) angular (Mentor, 2024).....	57
Figura 24 - Plano horizontal a 2 m de altura. Autor (FLOEFD 2412, 2025)	61
Figura 25 - Curva de convergência numérica em função do refinamento de malha. (Autor, 2025)	62
Figura 26 - Curva de estabilização temporal. (Autor, 2025)	63
Figura 27 - Malha geométrica. Autor (FLOEFD 2412, 2025)	64
Figura 28 - Condições de fronteira aplicadas no domínio numérico. Autor (FLOEFD 2412, 2025)	65
Figura 29 - Curva de potência térmica (a), vapor experimental (b) e vapor normativo (c). Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	66
Figura 30 - Pontos de monitoramento: instrumentação (a) bordas da hotte (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)	68
Figura 31 - Comparação temporal entre resultados experimentais e CFD. (Autor, 2025)	76

Figura 32 - Dispersão entre valores experimentais e CFD. (Autor, 2025).....	77
Figura 33 - Análise temporal do erro. (Autor, 2025).....	78
Figura 34 - Campo de temperatura a 624s (a), 824s (b) e 1190s (c). Autor (FLOEFD 2412, 2025)	79
Figura 35 - Campos de velocidade para o Ensaio [1] no (a) plano XY e no (b) plano XZ. Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	80
Figura 36 - Campos de velocidade para o Ensaio [2] no (a) plano XY e no (b) plano XZ. Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	81
Figura 37 - Campos de velocidade para o Ensaio [3] no (a) plano XY e no (b) plano XZ. Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	82
Figura 38 - Campos de velocidade para o Ensaio [4] no (a) plano XY e no (b) plano XZ. Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	82
Figura 39 - Pluma térmica: Ensaio [1] (a) e Ensaio [2] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)	86
Figura 40 - Média da fração mássica em cada ponto de controle. (Autor, 2025).....	87
Figura 41 - Ensaio [5] (a) e Ensaio [6] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	88
Figura 42 - Ensaio [7] (a) e Ensaio [8] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	89
Figura 43 - Ensaio [9] (a), Ensaio [10] (b), Ensaio [11] (c) e Ensaio [12] (d). Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	90
Figura 44 - Expansão da pluma térmica no corte lateral do Ensaio [9]. Autor (FLOEFD 2412, 2025)	91
Figura 45 - Ensaio [13] (a) e Ensaio [14] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	92
Figura 46 - Vistas laterais: Ensaio [13] (a) e Ensaio [14] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)	92
Figura 47 - Ensaio [15] (a) e Ensaio [16] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025).....	93

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Módulos da Norma EN 16282:2017 (<i>EN 16282</i>)	11
Tabela 2 - Débitos de ar novo conforme o número de refeições (<i>EN 16282</i>)	14
Tabela 3 - Valores indicativos para instalações auxiliares (<i>EN 16282</i>)	17
Tabela 4 - Classes de qualidade do ar interior (<i>IPQ, 2007</i>)	22
Tabela 5 - Distribuição espacial dos sensores de monitoramento. (<i>Autor, 2025</i>).....	49
Tabela 6 - Erro na convergência da malha espacial. (<i>Autor, 2025</i>)	62
Tabela 7 - Erro na convergência da malha temporal. (<i>Autor, 2025</i>).....	63
Tabela 8 - Propriedades termofísicas dos fluidos simulados. (<i>Autor, 2025</i>).....	66
Tabela 9 - Síntese da bateria de ensaios numéricos. (<i>Autor, 2025</i>).....	67
Tabela 10 - Estatísticas de temperatura (<i>Autor, 2025</i>)	83
Tabela 11 - Índice de exposição integrada nos pontos v1.0 a v1.6 (<i>Autor, 2025</i>)	85
Tabela 12 - Homogeneidade espacial de temperatura e fração mássica (<i>Autor, 2025</i>).....	85
Tabela 13 - Eficiência de captação em cada cenário. (<i>Autor, 2025</i>)	87

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ACH	<i>Air Changes per Hour</i>
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DES	<i>Detached Eddy Simulation</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
DCKV	<i>Demand Controlled Kitchen Ventilation</i>
DOM	<i>Discrete Ordinates Method</i>
EN	<i>European Norm</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
IDA	Categorias de Qualidade do Ar Interior (EN 16798)
IEI	<i>Integrated Exposure Index</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LCC	<i>Life Cycle Costing</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
NP	Norma Portuguesa
NRMSE	<i>Normalized Root Mean Square Error</i>
NSE	<i>Nash–Sutcliffe Efficiency</i>
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PAH	<i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i>
PBIAS	<i>Percent Bias</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier–Stokes</i>

RSD	<i>Règlement Sanitaire Départemental</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
PISO	<i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i>
PIMPLE	<i>Combinação PISO + SIMPLE</i>
QUICK	<i>Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics</i>
UFP	<i>Ultrafine Particles</i>
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

Lista de Símbolos

a	Coeficiente de ajuste	—
a_n	Coeficiente de vizinhança na discretização	—
a_p	Coeficiente do termo principal na discretização	—
b	Termo-fonte genérico	—
b'	Termo-fonte modificado	—
$C(t)$	Concentração instantânea do poluente	—
C_{edge}	Concentração na borda/escape	—
C_{in}	Concentração no interior da coifa	—
C_{inlet}	Concentração na entrada do filtro	—
C_{outlet}	Concentração na saída do filtro	—
C_{room}	Concentração média no ambiente	—
C_{source}	Concentração na fonte	—
C_o	Número de Courant	—
D	Coeficiente de difusão	m^2/s
E_{rel}	Erro relativo	%
E_{vent}	Consumo de energia de ventilação	kWh
\vec{g}	Aceleração gravitacional	m/s^2
h	Entalpia específica	kJ/kg
h_a	Altura do equipamento	m
h_d	Altura acima da fonte térmica	m
h_f	Altura de deslocamento do jato/fluxo	m

h_{hydr}	Diâmetro hidráulico do bloco de equipamentos	m
IEI	Índice de Exposição Integrada	–
IEI_T	Índice de Exposição Integrada de temperatura	s. °C
$\langle IEI_T \rangle^{(s)}$	Média espacial de IEI no cenário s	s. °C
k	Energia cinética turbulenta	m^2/s^2
L	Comprimento do conjunto de equipamentos	m
L_{cur}	Parâmetro de refinamento longitudinal	–
\dot{m}	Caudal mássico	kg/s
\dot{m}_{ar}	Caudal mássico de ar	kg/s
\dot{m}_{vapor}	Caudal mássico de vapor	kg/s
M_{capt}	Massa capturada no período	kg
M_{tot}	Massa total gerada no período	kg
M_{rem}	Massa total removida	kg
N	Número de elementos	–
p	Pressão	Pa
p_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
p_k	Produção de energia cinética turbulenta	m^2/s^3
p_{sat}	Pressão de saturação	Pa
p_v	Pressão parcial de vapor	Pa
\vec{q}	Densidade de fluxo de calor	W/m ²
$q_{(v-dir)}$	Fluxo adicional de ar fornecido diretamente à hotte	m ³ /h
$q_{(v-th)}$	Fluxo de ar induzido termicamente	m ³ /h
$q_{(v-th,ext)}$	Volume total extraído	m ³ /h
$q_{(v-th,ne)}$	Fluxo térmico adicional para equipamentos fora da cobertura	m ³ /h
\dot{Q}	Caudal volumétrico	m ³ /h
\dot{Q}_{ext}	Caudal volumétrico de extração	m ³ /h
\dot{Q}_S	Emissão de calor sensível dos equipamentos	W
$\dot{Q}_{(S,K)}$	Carga térmica sensível por convecção	W
R	Constante específica do gás	J/kg. K
R^2	Coeficiente de determinação	–
r	Fator de redução	–
S_h	Termo-fonte de energia	W/m ³

S_m	Termo-fonte de massa	$\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$
S_ϕ	Termo-fonte da variável ϕ	—
T	Temperatura	$^\circ\text{C}$
T_{amb}	Temperatura ambiente	$^\circ\text{C}$
U	Perímetro aberto sob a hotte	m
v	Velocidade de captura	m/s
V	Volume útil do ambiente	m^3
Y_{H_2O}	Fração mássica de vapor de água	—
Γ_ϕ	Difusividade efetiva da variável ϕ	m^2/s
μ	Viscosidade dinâmica	Pa.s
μ_t	Viscosidade turbulenta	Pa.s
ρ	Massa volúmica	kg/m^3
τ	Tensor de tensões viscosas	Pa
ϕ	Umidade relativa	%
ϕ_{esc}	Fração de escape	—
ω	Razão de mistura	kg/kg
η_c	Eficiência de captação	%
η_{cont}	Eficiência de contenção	%
η_{co}	Eficiência de filtração	%
η_{dil}	Eficiência de diluição	%
η_{en}	Eficiência energética do sistema	%
Δ_x	Tamanho característico da célula	m
Δ_t	Passo de tempo	s

1. Introdução

A qualidade do ar em ambientes industriais tem assumido papel central nos debates sobre saúde ocupacional e sustentabilidade ambiental. Entre esses ambientes, as cozinhas industriais destacam-se pela emissão constante de poluentes atmosféricos, como partículas finas (PM_{2.5}), compostos orgânicos voláteis (VOCs) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), diretamente associados a doenças respiratórias, cardiovasculares e a efeitos carcinogénicos (Alves et al., 2021; Mak & Yik, 2002).

Estudos recentes demonstram que práticas culinárias como fritura e grelhamento potencializam a emissão desses poluentes, enquanto métodos como o cozimento a vapor geram emissões consideravelmente menores, evidenciando a necessidade de estratégias flexíveis de ventilação (J. Gao et al., 2013; Mak & Yik, 2002).

Apesar desse cenário, o dimensionamento dos sistemas de ventilação em cozinhas industriais ainda é marcado por abordagens generalistas, frequentemente fundamentadas em experiências empíricas ou em normas técnicas que, embora relevantes, nem sempre contemplam as particularidades operacionais e dinâmicas reais de cada ambiente (CEN, 2016; Vainiotalo & Matveinen, 1993). A norma EN 16282, por exemplo, estabelece diretrizes importantes, mas a sua aplicação prática pode ser limitada pela adoção de pressupostos conservadores ou métodos de cocção (A. Li et al., 2014).

Embora os sistemas HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) respondam por uma parcela expressiva do consumo energético em edifícios comerciais (Kosonen & Mustakallio, 2003), os impactos ambientais e operacionais decorrentes de sua utilização evidenciam a necessidade de estratégias técnicas que priorizem simultaneamente a eficiência energética e o controlo rigoroso de poluentes.

Nesse contexto, ferramentas de modelação computacional, como o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), têm-se destacado pela capacidade de prever padrões de fluxo de ar e zonas críticas de concentração de poluentes, subsidiando o desenvolvimento de soluções otimizadas de ventilação antes mesmo de sua implementação prática (Z. Chen et al., 2020; To & Yeung, 2011). Entretanto, a maioria dos estudos ainda carece de validação experimental robusta e integração sistemática com dados de campo e recomendações normativas, criando uma lacuna importante entre o avanço científico e a sua aplicação prática (Kosonen & Mustakallio, 2003).

Diante desse cenário, este estudo propõe a integração entre dados experimentais, simulação CFD e critérios normativos como estratégia para aprimorar o dimensionamento de sistemas de ventilação em cozinhas industriais, superando práticas baseadas em empirismo e prescrições

generalistas. Busca-se, assim, validar uma metodologia integrada capaz de fornecer subsídios técnicos mais precisos para o dimensionamento de sistemas de ventilação em cozinhas industriais.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste estudo é desenvolver e validar uma metodologia para o dimensionamento de sistemas de ventilação em cozinhas industriais, integrando simulação CFD, experimentação em campo e análise normativa. Para atingir esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar experimentos numa cozinha-laboratório, avaliando o desempenho do sistema de ventilação em diferentes condições operacionais;
- Reproduzir o experimento em ambiente virtual por meio de simulação CFD, analisando padrões de fluxo de ar e de dispersão de poluentes;
- Comparar os resultados experimentais e simulados com as recomendações da Norma EN 16282, identificando limitações e oportunidades de aprimoramento;
- Propor recomendações técnicas para o setor e contribuições para o avanço das normas técnicas.

1.2. Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1 – Introdução, são apresentados o contexto, o problema de investigação, a motivação, os objetivos e a relevância do estudo. O Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica discute os fundamentos da ventilação em cozinhas industriais, a caracterização dos poluentes, o estado da arte em modelação CFD e as principais normas técnicas aplicáveis. O Capítulo 3 – Metodologia detalha os procedimentos experimentais, as estratégias de modelação computacional, os critérios de validação e as limitações do estudo. O Capítulo 4 – Resultados e Discussão apresenta e analisa criticamente os resultados obtidos, destacando convergências e divergências entre experimento, simulação e normas técnicas. Por fim, o Capítulo 5 – Conclusão sintetiza as principais contribuições do trabalho, recomendações práticas e sugestões para investigações futuras.

Ao reconhecer as limitações das práticas convencionais e a necessidade de avançar para além de abordagens prescritivas ou empíricas, este trabalho não pretende estabelecer um novo referencial normativo completo, mas demonstrar que a aplicação conjunta de experimentação, modelação computacional e análise crítica das normas vigentes pode complementar os métodos atuais. Nesse sentido, procura-se evidenciar que a engenharia aplicada pode oferecer soluções mais precisas, eficientes e adaptáveis à complexidade dos ambientes reais. Assim, espera-se que os resultados desta pesquisa possam contribuir, de forma concreta, para a melhoria das práticas profissionais, para a atualização das recomendações normativas e para a promoção de ambientes mais seguros, sustentáveis e energeticamente otimizados no setor das cozinhas industriais.

2. Revisão Bibliográfica

A compreensão aprofundada dos desafios associados à qualidade do ar em cozinhas industriais, conforme apresentado na introdução deste trabalho, exige uma análise crítica da literatura técnica e científica que fundamenta tanto o diagnóstico dos riscos como a proposição de soluções inovadoras de projeto. As evidências sobre os impactos dos poluentes atmosféricos e o papel decisivo dos sistemas de ventilação na eficiência energética e na salubridade dos ambientes ressaltam a necessidade de um enquadramento teórico robusto para orientar o desenvolvimento e a validação de novas abordagens de ventilação.

O contexto contemporâneo, marcado pelo aumento das exigências regulatórias e pela busca de maior responsabilidade socioambiental, evidencia as limitações das práticas tradicionais de dimensionamento, ainda frequentemente ancoradas em normas conservadoras ou em experiências empíricas pouco adaptadas à realidade dinâmica das cozinhas profissionais. Nesse cenário, a revisão da literatura torna-se essencial para identificar avanços, lacunas e tendências que possam sustentar a evolução do setor em direção a estratégias integradas e baseadas em evidências.

O aprofundamento teórico oferecido neste capítulo percorre desde os fundamentos físicos e regulatórios da ventilação, passando pela caracterização detalhada dos principais poluentes presentes nos processos culinários, até as estratégias contemporâneas de mitigação e monitorização. Destaca-se a importância de critérios normativos, os desafios de aplicação prática dessas normas perante a heterogeneidade operacional das cozinhas industriais e a necessidade de tecnologias de avaliação e controle que ultrapassem abordagens generalistas.

Avanços metodológicos, como a modelação computacional via CFD, são explorados à luz do seu potencial para prever padrões de fluxo e identificar zonas críticas de exposição, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de ventilação mais eficientes e seguros. Contudo, reconhece-se também a lacuna persistente entre o progresso científico e a sua tradução em soluções normativas e práticas, especialmente no que diz respeito à validação experimental, à integração de dados de campo e à customização de soluções para diferentes realidades de uso.

Ao consolidar os conhecimentos existentes e expor as principais diretrizes técnicas, desafios operacionais e inovações tecnológicas do setor, este capítulo estabelece as bases necessárias para a proposição e validação de abordagens metodológicas mais rigorosas e adaptadas, com o intuito de sustentar decisões técnicas robustas e promover avanços efetivos no controle de poluentes e na eficiência energética em cozinhas industriais.

2.1. Ventilação em cozinhas industriais

A ventilação em cozinhas industriais destaca-se como um dos temas mais relevantes quando se trata de promover ambientes internos saudáveis, produtivos e em conformidade com as exigências legais e normativas. Ao contrário de outros espaços de uso coletivo, as cozinhas reúnem características singulares ao operarem com múltiplos equipamentos de cocção de alta potência, grande concentração de trabalhadores, intensa geração de calor e emissão constante de poluentes atmosféricos. Essas condições aumentam a complexidade do controlo ambiental, tornando os sistemas de ventilação um componente central não apenas para a diluição de contaminantes, mas também para o conforto térmico, a segurança ocupacional e a eficiência energética da instalação.

Nesse contexto, compreender os fundamentos e desafios da ventilação nesses espaços é indispensável para a elaboração de projetos eficazes e para a gestão dos riscos inerentes a tais ambientes. O simples dimensionamento baseado em soluções padronizadas revela-se insuficiente perante a elevada variabilidade operacional e as restrições arquitetónicas, ao mesmo tempo em que deve atender a rigorosos requisitos normativos relacionados com a saúde pública e a segurança alimentar.

Adicionalmente, a evolução normativa e o avanço do conhecimento científico trouxeram a necessidade de sistemas de ventilação inteligentes, monitorizáveis e adaptáveis, em que a ventilação não pode ser entendida apenas como um requisito de conforto, mas como uma ferramenta estratégica para a proteção da saúde coletiva e para o cumprimento de padrões internacionais de qualidade do ar interior. Ao longo deste capítulo, serão discutidos os principais conceitos, abordagens técnicas e desafios operacionais que caracterizam a ventilação em cozinhas industriais, estabelecendo as bases para a compreensão dos mecanismos de controlo de poluentes, avaliação de desempenho e impacto das soluções adotadas sobre a saúde, o ambiente e a eficiência das operações.

2.1.1. Conceitos de ventilação e renovação de ar

A preocupação com a qualidade do ar interior tem-se intensificado nas últimas décadas, refletindo a crescente compreensão do seu impacto direto na saúde, no conforto e na produtividade dos ocupantes. Em edifícios industriais e de serviços, a ventilação assume um papel central não apenas por favorecer ambientes saudáveis, mas também por responder às exigências de normativos técnicos e legais cada vez mais rigorosos. Diante desse cenário, conhecer os fundamentos físicos, as suas abordagens e as suas consequências práticas é indispensável para o desenvolvimento de sistemas eficientes, capazes de promover espaços internos seguros e adequados ao desempenho das atividades humanas.

Fisicamente, a ventilação pode ser entendida como o processo pelo qual massas de ar são deslocadas entre o interior e o exterior de um edifício, seja por diferenças de pressão, variações de temperatura, ação do vento ou por meios mecânicos, como ventiladores e exaustores (Awbi, 2015; Etheridge & Sandberg, 2020). Esse fluxo controlado possibilita a constante renovação do ambiente, garantindo a substituição do ar estagnado por uma atmosfera mais saudável.

Além de sua função física, a ventilação constitui uma estratégia reconhecida pelas principais normas técnicas e regulamentações internacionais e nacionais, que a definem como elemento indispensável para assegurar a salubridade, o conforto e a produtividade dos espaços ocupacionais e industriais — objetivo que se tornou ainda mais evidente diante das epidemias globais de doenças respiratórias, como os surtos de tuberculose (1990), SARS (2003), H1N1 (2009) e, mais recentemente, a pandemia de SARS-CoV-2 (2020). Em todos esses casos, foi amplamente demonstrado que ambientes internos com ventilação insuficiente favorecem significativamente a transmissão pelo ar, salientando a necessidade de estratégias eficazes de renovação do ar para proteção coletiva (Morawska & Cao, 2020; Waring & Siegel, 2011).

No contexto das cozinhas industriais, a ventilação assume um papel ainda mais crítico devido à intensa geração de poluentes durante o preparo dos alimentos. O processo de cocção liberta uma variedade expressiva de partículas finas ($PM_{2.5}$) e compostos orgânicos voláteis (COVs), cujas concentrações podem afetar diretamente a saúde ocupacional e a qualidade ambiental desses espaços (Atamaleki et al., 2024; Huang et al., 2020). Além disso, edifícios modernos de baixo consumo energético, caracterizados por elevada estanqueidade, tornam a remoção eficiente desses poluentes um desafio adicional.

Por essa razão, diferentes estratégias têm sido empregadas para garantir uma renovação eficaz do ambiente; entre essas opções, destaca-se a ventilação natural, que se baseia na ação do vento e no efeito chaminé para promover a troca do ar interno sem a necessidade de equipamentos motorizados (Awbi, 2015; Etheridge & Sandberg, 2020). A Figura 1 ilustra um exemplo típico desse tipo de sistema, evidenciando como o fluxo de ar pode ser induzido de modo eficiente pela própria arquitetura e pelas condições ambientais externas. Apesar de suas vantagens em termos de baixo consumo energético e simplicidade de manutenção, a sua eficiência pode ser comprometida pela dependência das condições climáticas e pelo projeto arquitetônico do edifício.

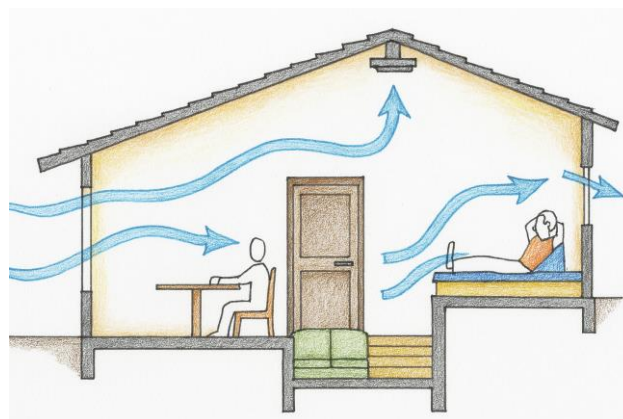


Figura 1 - Ventilação natural. Autor (IA – ChatGPT, 2025)

Por outro lado, em situações em que o controle preciso da renovação do ar é imprescindível, recorre-se à ventilação mecânica, que utiliza ventiladores, exaustores e insufladores para

garantir a movimentação constante do ar, independentemente das condições externas (ASHRAE, 2016; IPQ, 2007). Esse tipo de sistema, representado esquematicamente na Figura 2, exemplifica como todo o fluxo de ar dentro do edifício pode ser gerado e controlado por equipamentos mecânicos, dispensando a dependência de aberturas naturais.

A grande vantagem desse sistema está na sua fiabilidade e na capacidade de filtrar o ar, tornando-o especialmente adequado para ambientes com elevadas cargas de poluentes. Em contrapartida, sistemas mecânicos tendem a exigir maior investimento inicial, manutenção frequente e implicam custos operacionais mais elevados (Awbi, 2015).

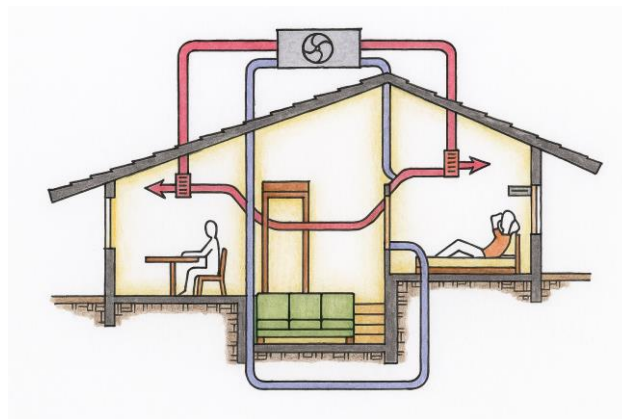


Figura 2 - Ventilação mecânica. Autor (IA – ChatGPT, 2025)

Há ainda abordagens híbridas, que integram os mecanismos natural e mecânico, ajustando automaticamente o modo de operação para otimizar a eficiência energética e responder às exigências específicas de ocupação (Awbi, 2015; IPQ, 2007). Como ilustrado na Figura 3, esses sistemas mistos são capazes de alternar entre a ventilação natural e a mecânica, ou operar ambos de forma complementar, proporcionando flexibilidade e maior controle sobre as condições internas.

Isso permite não apenas uma resposta mais eficiente às variações climáticas e aos diferentes padrões de uso do edifício, mas também uma redução significativa no consumo energético, ao utilizar recursos naturais sempre que possível e recorrer à ventilação mecânica apenas quando necessário.

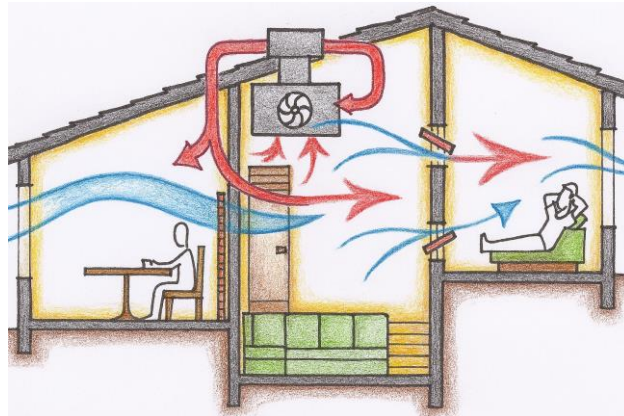


Figura 3 - Ventilação mista. Autor (IA – ChatGPT, 2025)

Outro aspecto relevante, especialmente em ambientes industriais complexos como cozinhas, é a distinção entre a ventilação local e a geral. Enquanto a ventilação local se concentra na captação e remoção de poluentes diretamente nas fontes de emissão, a ventilação geral encarrega-se de renovar uniformemente o ar de todo o ambiente, reduzindo as concentrações médias de contaminantes em todos os setores do espaço (ASHRAE, 2016; CEN, 2016). Na prática, a combinação dessas estratégias é frequentemente adotada para aumentar a eficácia do sistema de ventilação em contextos onde múltiplas fontes de poluentes coexistem.

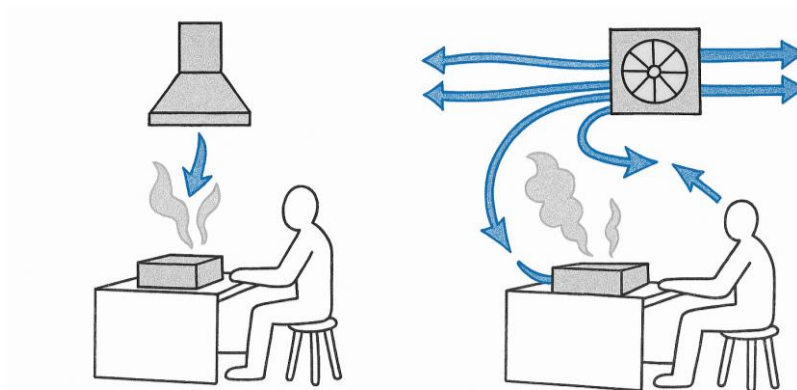


Figura 4 - Sistemas de ventilação local (a) e geral (b). Autor (IA – ChatGPT, 2025)

Independentemente do método de ventilação adotado, o desempenho efetivo desses sistemas depende fundamentalmente da capacidade de promover a renovação adequada do ar em cada ambiente. Por esse motivo, normas internacionais e nacionais, como a NP EN 16798-1:2019 e a ANSI/ASHRAE 62.1-2016, enfatizam a necessidade de parâmetros quantitativos objetivos para avaliar a eficiência da ventilação, considerando não apenas o tipo de sistema, mas também as exigências específicas de cada espaço e da sua ocupação (Awbi, 2015; Persily & de Jonge, 2017).

Nesse contexto, a taxa de renovação de ar ACH (*Air Changes per Hour*) destaca-se como um dos principais indicadores de desempenho, sendo amplamente utilizada como critério normativo e em decisões de projeto, uma vez que expressa o número de vezes que o volume total de ar de um recinto é completamente renovado em uma hora. O seu cálculo é dado pela Equação 1,

$$ACH = \frac{\dot{Q}}{V}, \quad (1)$$

em que \dot{Q} é o caudal volumétrico de ar fornecido ou extraído (m^3/h) e V é o volume útil do ambiente (m^3). Este parâmetro é determinante para o desempenho dos sistemas de ventilação, pois reflete a eficácia do sistema em diluir e remover poluentes, controlar a concentração de CO_2 , regular a humidade e os odores, além de influenciar diretamente o conforto térmico e a saúde dos ocupantes (Awbi, 2015; Persily & de Jonge, 2017). Quando a taxa de renovação de ar é insuficiente, ocorre o acúmulo de contaminantes e a deterioração da qualidade ambiental; por outro lado, taxas excessivamente elevadas podem provocar desperdício energético e custos operacionais desnecessários. Assim, o estabelecimento de valores de referência para a ACH é indispensável para garantir o equilíbrio entre qualidade do ar e eficiência dos sistemas.

A ANSI/ASHRAE 62.1-2016, por exemplo, recomenda para cozinhas industriais, valores entre 6 e 12 trocas por hora, enquanto ambientes de escritórios ou salas de aula podem operar com 2 a 4 ACH, dependendo da densidade de ocupação e das atividades realizadas. A NP EN 16798-1:2019 enfatiza a necessidade de ajustar a taxa de acordo com a finalidade do espaço, a produção de poluentes e a presença de fontes internas, sempre procurando garantir uma qualidade do ar interior compatível com o uso pretendido.

2.1.2. Desafios operacionais específicos em cozinhas industriais

As cozinhas industriais destacam-se como ambientes críticos do ponto de vista da ventilação, devido à elevada complexidade operacional e à intensa geração simultânea de poluentes e calor. Diversos estudos apontam que a combinação de múltiplas fontes móveis e estacionárias de contaminantes cria um ambiente com grande variabilidade espacial e temporal nas cargas térmicas e nos níveis de poluição (Huang et al., 2020; J. Li et al., 2024; Zhao & Zhao, 2018). Além disso, há uma dependência da operação de exaustores localizados e de sistemas de reposição de ar para manter padrões aceitáveis de qualidade do ar interior, uma vez que apenas a ventilação geral frequentemente se mostra insuficiente para eliminar picos de emissão e garantir a homogeneidade da renovação do ar (J. Li et al., 2024).

Outro fator fundamental para o dimensionamento dos sistemas de ventilação é o estilo de cocção predominante. As taxas de emissão de poluentes em cozinhas industriais e residenciais são fortemente influenciadas pelos métodos de confeção adotados (H. Zhang et al., 2017; Zhao & Zhao, 2018). Técnicas como fritura, grelhados e, sobretudo, refogados destacam-se como algumas das principais responsáveis pela geração de partículas finas e compostos orgânicos voláteis, enquanto métodos mais suaves, como o cozimento a vapor, apresentam emissões

significativamente menores (Lu et al., 2021). Estudos experimentais demonstram que o perfil operacional e cultural do estabelecimento, associado ao tipo de alimento, à temperatura e ao uso de óleos, pode elevar as taxas de emissão em ordens de grandeza, reforçando a necessidade de soluções personalizadas de ventilação (H. Zhang et al., 2017; Zhao & Zhao, 2018).

Estudos também evidenciam que o excesso de calor gerado nas cozinhas, associado ao *layout* variável e à elevada densidade ocupacional, pode resultar em desconforto térmico, fadiga e riscos para a saúde dos trabalhadores (Seppänen et al., 1999; Zhao et al., 2019). Sistemas de ventilação projetados sem considerar a distribuição dinâmica dos equipamentos e dos fluxos ocupacionais tendem a apresentar zonas mortas, acumulação de calor e falhas no controlo da humidade e dos poluentes (Awbi, 2015; IPQ, 2017).

A crescente tendência de edifícios energeticamente eficientes introduz novas camadas de complexidade. Edificações modernas, com elevada estanqueidade e baixa infiltração de ar, dificultam a dissipação de poluentes e calor, tornando indispensável o uso de sistemas mecânicos de ventilação com controlo preciso de pressurização e de distribuição (J. Li et al., 2024; Liang et al., 2024). Além disso, cozinhas industriais enfrentam desafios específicos relacionados com a manutenção de padrões rigorosos de segurança alimentar e higiene. O controlo da condensação, da humidade e da circulação de poluentes é essencial para prevenir a formação de biofilmes, a proliferação de micro-organismos e a contaminação cruzada dos alimentos (IPQ, 2019; República Portuguesa, 2021). Trabalhos recentes sublinham que a ventilação ineficiente pode aumentar a deposição de partículas sobre superfícies, elevando o risco de contaminação e comprometendo a segurança alimentar (Huang et al., 2020; Zhao et al., 2019).

Por fim, restrições arquitetónicas, como a limitação de espaço para dutos e a integração com outros sistemas prediais (*sprinklers*, iluminação, infraestrutura elétrica), representam obstáculos adicionais ao desempenho ótimo dos sistemas de ventilação (Awbi, 2015). Não por acaso, a NP EN 16282-1:2017, a NP EN 16798-1:2019 e a ANSI/ASHRAE 62.1-2016 recomendam abordagens de projeto personalizadas, baseadas na avaliação detalhada das cargas térmicas, da ocupação, das técnicas de confeção e dos padrões de uso específicos de cada instalação.

2.2. Normas e regulamentações

Apesar do avanço normativo, a adoção de práticas empíricas ou a replicação de soluções tradicionais pode resultar em sistemas de ventilação com baixa eficiência de captura, falhas na renovação do ar e riscos elevados para a saúde ocupacional. Lunden et al. (2015) mostraram que exaustores mal especificados podem apresentar eficiências inferiores a 30%, expondo trabalhadores a concentrações críticas de partículas finas. De forma semelhante, Vicente et al. (2021) e Clark et al. (2018) relatam incidentes e ineficiências decorrentes de abordagens não fundamentadas, reforçando a necessidade de critérios técnicos rigorosos e da superação do empirismo ainda presente no setor. A literatura corrobora que projetos baseados apenas em práticas consagradas frequentemente subestimam riscos sanitários e impactos económicos,

comprometendo a sustentabilidade e a conformidade regulatória dos empreendimentos (Schraufnagel et al., 2019).

Nesse contexto, torna-se indispensável compreender a lógica subjacente às normas, as suas motivações e limitações, bem como a sua capacidade de acompanhar a evolução dos desafios técnicos e das exigências sociais por ambientes de trabalho mais responsáveis e sustentáveis. O simples cumprimento dos requisitos revela-se insuficiente perante a dinâmica do setor, em que a variabilidade de *layouts*, processos de confeção, níveis de automação e exigências de eficiência energética impõe a necessidade de parâmetros normativos adaptáveis e continuamente atualizados (Bartolozzi et al., 2024; Kosonen & Mustakallio, 2003).

Assim, as discussões aprofundadas que orientam o projeto, a instalação e a operação dos sistemas de ventilação representam, portanto, um passo fundamental para a construção de ambientes de cozinha que respondam não apenas à legislação, mas também às expectativas crescentes de desempenho, segurança e sustentabilidade. Analisar criticamente este arcabouço regulatório significa, em última instância, contribuir para a evolução do setor, promovendo uma cultura de melhoria contínua, inovação e responsabilidade social.

2.2.1. Norma EN 16282 – Equipamentos para cozinhas profissionais

A crescente complexidade dos ambientes de cozinha profissional impôs a necessidade de diretrizes normativas robustas que assegurem a eficiência, a segurança e a sustentabilidade das operações (Gao et al., 2013; Han et al., 2019). Nesse contexto, a norma europeia EN 16282 estabelece um conjunto abrangente de requisitos técnicos voltados ao projeto, à instalação e à operação de equipamentos e sistemas de ventilação para cozinhas profissionais, consolidando-se como referência central para o setor, inclusive em mercados que reconhecem a importância de padrões elevados (CEN, 2016).

A norma é composta por oito partes complementares, que abrangem desde os princípios gerais de desempenho até métodos de verificação e requisitos de segurança, promovendo uma abordagem integrada à ventilação em cozinhas profissionais. Essa estrutura modular não apenas facilita a aplicação flexível das diretrizes conforme a tipologia e a dimensão da cozinha, mas também permite a adaptação dos requisitos em função das especificidades operacionais, como a carga térmica, os poluentes gerados e o volume de produção, conforme destacado por Kosonen & Mustakallio (2003). Ao organizar o conteúdo em módulos independentes, conforme a Tabela 1, a norma potencializa a personalização das soluções de acordo com a realidade de cada ambiente, promovendo maior efetividade e segurança nas operações.

Tabela 1 - Módulos da Norma EN 16282:2017 (EN 16282)

EN 16282 - Equipamentos para cozinhas profissionais	
Parte 1	Princípios gerais e método de cálculo
Parte 2	Exaustores e sistemas de exaustão para remoção de poluentes
Parte 3	Sistemas de ventilação de teto
Parte 4	Requisitos de segurança
Parte 5	Sistemas de indução de ar
Parte 6	Dispositivos de filtragem e separação
Parte 7	Requisitos de segurança e prevenção de incêndios
Parte 8	Métodos de medição para verificar o desempenho

A norma EN 16282:2017 inicia estabelecendo princípios gerais e requisitos de desempenho, que constituem a base para o dimensionamento, a instalação e a operação dos sistemas de ventilação. Esses critérios mínimos têm como objetivo garantir a captação eficiente e a remoção de poluentes na origem, ao mesmo tempo que asseguram a manutenção da qualidade do ar interior e a conformidade com padrões de eficiência energética.

Na sequência, a norma detalha dispositivos e soluções tecnológicas, como exaustores, sistemas de ventilação de teto, ventilação mecânica e indução de ar. Cada uma dessas soluções responde a desafios específicos impostos pela variedade de layouts, equipamentos e processos presentes em cozinhas profissionais. Gao et al. (2013) demonstram que a proximidade entre a fonte de emissão de poluentes e o ponto de exaustão é o fator mais relevante para limitar a dispersão de contaminantes, evidenciando a importância de projetos orientados para a captura na fonte. Benchikh Le Hocine et al. (2020) destacam que sistemas inovadores, como a ventilação de teto associada à indução de ar, foram capazes de reduzir em mais de 30% as concentrações de partículas suspensas e melhorar a distribuição térmica em cozinhas compactas e com restrições estruturais, um avanço relevante quando a ventilação convencional não atende plenamente às exigências operacionais.

Outro ponto fundamental da norma reside na obrigatoriedade de dispositivos de filtragem e separação, essenciais para a retenção de partículas finas e compostos químicos gerados nas operações culinárias. Han et al. (2019) evidenciaram que a adoção combinada de filtros HEPA e de carvão ativado resulta na remoção de até 99,97% das partículas e numa redução expressiva dos COVs, contribuindo decisivamente para a proteção da saúde dos trabalhadores e para o cumprimento das normas ambientais em vigor.

No que se refere à segurança e à prevenção de incêndios, a norma impõe requisitos rigorosos para minimizar os riscos inerentes à presença de altas temperaturas, gordura e substâncias inflamáveis. De acordo com o próprio texto normativo (CEN, 2016) e as recomendações de Kosonen & Mustakallio (2003), a integração de sistemas automáticos de detecção de incêndio, barreiras corta-fogo e os dispositivos de contenção são obrigatórios, promovendo a rápida resposta a incidentes e evitando danos tanto a pessoas como às instalações.

Por fim, dedica-se uma seção aos métodos de medição e verificação de desempenho dos sistemas de ventilação, reconhecendo que a monitorização contínua é fundamental para garantir a eficácia ao longo do tempo. Liang et al. (2024) destacam que a adoção de protocolos de medição periódica, tais como testes de eficiência de extração, avaliação do balanço de massa de poluentes e monitorização sistemática da qualidade do ar, permite a identificação rápida de desvios e possibilita ajustes dinâmicos nos sistemas. Esse processo contínuo assegura não apenas a conformidade com os parâmetros normativos, mas também a promoção de uma cultura de melhoria permanente e de otimização operacional.

Portanto, ao consolidar orientações técnicas detalhadas para cada etapa do processo, a EN 16282 oferece uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas de ventilação mais seguros, eficientes e adaptados à crescente complexidade dos ambientes de cozinha profissional, promovendo não apenas o cumprimento das exigências legais, mas sobretudo a mitigação de riscos e a elevação dos padrões de saúde ocupacional e desempenho operacional.

2.2.1.1. Princípios gerais e critérios para ventilação

O controlo eficiente da dispersão de poluentes em cozinhas profissionais está intrinsecamente ligado ao entendimento dos fenómenos que regem a formação e o comportamento das plumas térmicas. Típicas nesses ambientes, originam-se do aquecimento intenso do ar sobre superfícies de confeção, dando início a correntes ascendentes que arrastam vapor de água, partículas de gordura e gases diversos. A estrutura, a trajetória e a intensidade dessas plumas dependem de variáveis como a carga térmica aplicada, as dimensões da fonte emissora, o tipo de alimento manipulado e o regime de ventilação do espaço. N. P. Gao et al. (2008) observaram que a dinâmica das plumas é profundamente influenciada pelo regime térmico e pelo fluxo de ar do local, o que determina o padrão de dispersão dos poluentes, fatores determinantes para o sucesso da captura pelo sistema de exaustão.

O desenvolvimento da pluma ocorre inicialmente como um núcleo de ar quente que se desprende da superfície aquecida, expandindo-se lateralmente devido ao contraste de densidade com o ar ambiente e sendo intensificado por turbulências e gradientes térmicos locais. H. J. Chen et al. (2013) demonstraram, em laboratório e em campo, que a forma e o alcance dessas plumas variam com o perfil do equipamento e a presença de obstáculos, enquanto Kosonen et al. (2006) mostraram que perturbações, como a circulação de pessoas ou variações no fluxo de ar de reposição, podem desestabilizar o transporte vertical dos poluentes.

No contexto da difusão de poluentes, a literatura demonstra que o transporte eficaz de contaminantes depende da interação entre o movimento convectivo, resultante das plumas térmicas, e os mecanismos de dispersão promovidos pela ventilação ambiente. Estudos experimentais e numéricos de Benchikh Le Hocine et al. (2020) e Ding et al. (2023) mostram que a eficiência de remoção de poluentes é maximizada quando a exaustão está corretamente dimensionada. Entretanto, a presença de fluxos de ar indesejados pode desviar partículas e gases para além do alcance do sistema de exaustão, ampliando a sua dispersão pelo ambiente.

A. Li et al. (2014) reforçam essa análise ao evidenciar que fluxos laterais acima de 0,3 m/s podem reduzir a eficiência de captura em até 25%, sobretudo em condições de turbulência atmosférica e na presença de múltiplas fontes de poluição. Esses resultados são corroborados por N. P. Gao et al. (2008), que simularam a dispersão de gases e partículas e constataram que a falta de sincronia entre o sistema de exaustão e o regime de ventilação ambiente é determinante para o aumento da difusão de poluentes.

A compreensão desses mecanismos físicos e a sua validação experimental demonstram que o sucesso na gestão da qualidade do ar em cozinhas profissionais não depende apenas do entendimento das plumas térmicas, mas sobretudo da capacidade de traduzir esse conhecimento científico em parâmetros construtivos e operacionais objetivos. Nesse contexto, a EN 16282 sistematiza rigorosamente critérios para o dimensionamento, a instalação e a manutenção dos sistemas de exaustão, estabelecendo uma ponte efetiva entre a ciência dos poluentes e as melhores práticas de engenharia.

É importante salientar que, em Portugal, não existe até ao momento uma legislação nacional específica que regule em detalhe a ventilação de cozinhas profissionais nos moldes da legislação francesa. O arcabouço normativo português baseia-se maioritariamente na transposição das normas europeias, como a EN 16282, e em legislação sanitária geral, que define requisitos de desempenho, mas não apresenta orientações prescritivas para aspetos construtivos, operacionais e de manutenção tão minuciosas quanto as francesas. Nesse cenário, as legislações francesas tornam-se referências técnicas essenciais para o contexto português, ao expandirem o escopo das exigências, ao classificar cozinhas profissionais como locais de poluição específica e ao estabelecer critérios diferenciados para ventilação, captação e renovação do ar.

Por consequência, esse enquadramento justifica a exigência de que entradas de ar novo e saídas de ar extraído estejam localizadas a pelo menos 8 metros de potenciais fontes de poluição ou de qualquer ponto de renovação, conforme explicitado na regulamentação sanitária (Règlement Sanitaire Départemental, 1979). Essa configuração busca evitar a recirculação de contaminantes e garantir a segurança sanitária dos ambientes alimentares. Além disso, limites quantitativos para exposição a poluentes são claramente definidos em locais de poluição específica: as concentrações médias de poeira total e poeira alveolar não devem ultrapassar, respetivamente, 10 mg/m³ e 5 mg/m³ de ar, numa jornada de oito horas (Code du Travail, 2008). Esses padrões elevados de saúde ocupacional reforçam a importância do correto dimensionamento dos sistemas, que devem considerar não apenas a exaustão e a filtragem, mas também a renovação adequada do ar. A legislação francesa estabelece, inclusive, débitos mínimos de ar novo proporcionais ao número de refeições servidas, conforme sintetizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Débitos de ar novo conforme o número de refeições (EN 16282)

Número de refeições	Caudal mínimo de ar novo
Menos de 150	25 m ³ /h por refeição
De 151 a 500	20 m ³ /h por refeição, com um mínimo absoluto de 3.750 m ³ /h
De 501 a 1.500	15 m ³ /h por refeição, com um mínimo absoluto de 10.000 m ³ /h
Mais de 1.500	10 m ³ /h por refeição, com um mínimo absoluto de 22.500 m ³ /h

O princípio da cobertura integral é levado a um grau ainda mais detalhado na legislação francesa, reconhecida internacionalmente pela sua maturidade e rigor técnico. Ao exigir margens mínimas de 300 mm em todos os lados, e de até 600 mm frontalmente para fornos e fritadeiras, o regulamento francês garante a captura dos poluentes mesmo em condições críticas, como a abertura frequente de portas ou tampas. Como ilustra a Figura 5, esses afastamentos são projetados para que, considerando um ângulo de ascensão típico da pluma térmica de até 15°, todas as trajetórias possíveis de dispersão sejam efetivamente captadas pelo campo de atuação da hotte.

Ademais, a altura de instalação da unidade exaustora, variando entre 1,80 m e 2,20 m do piso, conforme a EN 16282-2 e a regulamentação francesa, não é arbitrária: reflete a necessidade de minimizar o percurso livre da pluma, reduzindo a dispersão lateral e a influência de correntes cruzadas — fatores cuja negligência pode comprometer drasticamente o desempenho do sistema (D. Han et al., 2022; H. Zhang et al., 2017).

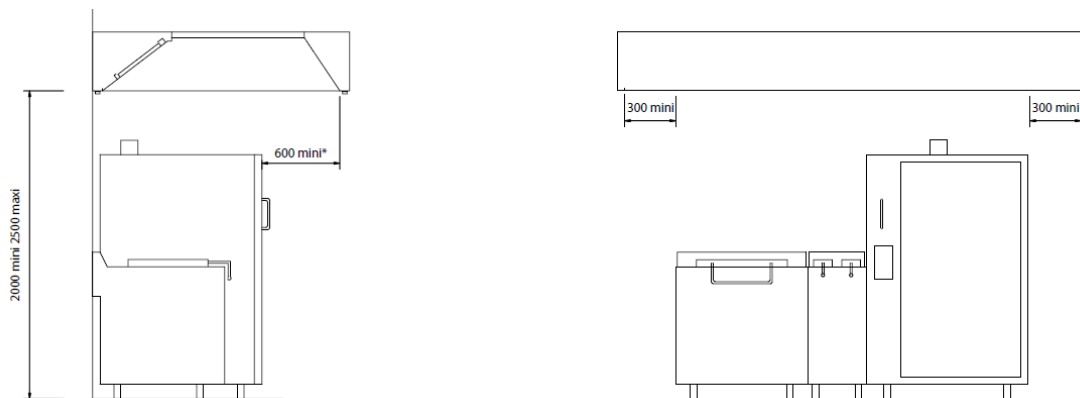


Figura 5 - Afastamento frontal (a) e lateral (b), considerando o ângulo de ascensão da pluma (France Air, 2025)

A eficiência do sistema depende ainda da geometria do exaustor, especialmente da incorporação de defletores ou painéis laterais inclinados entre 45° e 60°, que canalizam o fluxo de poluentes para o centro da sucção, mitigam fluxos laterais, tornam o campo de captura mais uniforme e reduzem zonas de recirculação (Lunden et al., 2015). Também é fundamental a escolha criteriosa dos materiais construtivos: superfícies lisas, contínuas e altamente resistentes à corrosão e ao calor são indispensáveis não só para a longevidade dos

equipamentos, mas também para a manutenção das condições higiénicas. A legislação francesa aprofunda ainda mais esses requisitos ao exigir juntas soldadas, filtros removíveis sem ferramentas e registos diários das operações de limpeza e inspeção, assegurando não apenas eficiência operacional, mas conformidade sanitária permanente.

Além da renovação de ar, a legislação detalha critérios para ventilação natural e mecânica, especificando as condições de uso de cada uma e destacando a obrigatoriedade de filtragem eficiente do ar em sistemas mecânicos, com filtros que atinjam rendimento mínimo de 90% para ar novo ou 95% para ar reciclado, além do controlo contínuo do estado dos filtros. Também no quesito segurança operacional, a legislação exige dispositivos de paragem de emergência acessíveis e identificados, meios de extinção automáticos adequados ao risco (como incêndios por óleo em fritadeiras), critérios de isolamento, resistência ao fogo de paredes e portas, bem como manutenção e registo sistemático das intervenções realizadas.

Dessa forma, a aplicação integrada dos critérios da EN 16282 e do rigor normativo francês não apenas traduz o conhecimento técnico em requisitos objetivos, mas também assegura que a ventilação em cozinhas profissionais responda plenamente aos desafios contemporâneos de saúde, segurança e desempenho operacional, estabelecendo, para o contexto português, uma referência segura e tecnicamente sólida, num cenário em que o legislador nacional ainda não avança com especificidade equivalente.

2.2.1.2. Métodos de dimensionamento

O dimensionamento de sistemas de ventilação em cozinhas profissionais é uma tarefa que exige precisão e flexibilidade. Dois grandes métodos destacam-se nesse processo o dimensionamento preliminar, com base em parâmetros gerais do ambiente e do tipo de uso, e o detalhado, que se ancora em informações específicas sobre os equipamentos, as cargas térmicas e o *layout* (CEN, 2016).

Os métodos preliminares, baseados em taxas de renovação horária do ar e em recomendações simplificadas para áreas específicas, oferecem uma base sólida para projetos em fases iniciais, quando nem sempre se dispõe de todos os dados técnicos. Tais abordagens são práticas e amplamente utilizadas no início dos projetos, mas não substituem a necessidade de detalhamento, especialmente para garantir a eficiência energética e operacional (O. Han et al., 2019).

À medida que o projeto avança e informações detalhadas se tornam disponíveis, o método de cálculo detalhado permite incorporar a análise das cargas térmicas sensíveis, o fluxo induzido por convecção e o comportamento dinâmico das plumas térmicas sobre os equipamentos (D. Han et al., 2022; Kosonen et al., 2006a). A aplicação deste método assegura que o sistema seja personalizado ao perfil da instalação, minimizando riscos de subdimensionamento ou sobredimensionamento, que podem levar a desperdício de energia ou a ambientes inseguros e desconfortáveis.

Estudos comparativos mostram que o dimensionamento detalhado, apesar da sua maior complexidade, tende a promover ganhos significativos em eficiência energética e no

desempenho global do sistema (D. Han et al., 2022; Kosonen et al., 2006a). É nesse contexto que a literatura enfatiza a importância da validação do projeto, dos testes experimentais e da monitorização em operação real, assegurando que o sistema projetado cumpra os requisitos de conforto térmico, qualidade do ar e eficiência energética (Benchikh Le Hocine et al., 2020; Zhao & Zhao, 2018). Ademais, o alinhamento com a legislação vigente garante que o projeto atenda aos requisitos mínimos de segurança, desempenho e saúde ocupacional (ASHRAE, 2016).

2.2.1.2.1. Dimensionamento preliminar

O dimensionamento preliminar de sistemas de ventilação em cozinhas industriais representa uma etapa estratégica do projeto, sobretudo por permitir antecipar cenários de desempenho e assegurar que exigências mínimas de salubridade e de funcionalidade sejam consideradas desde as fases iniciais de concepção (Benchikh Le Hocine et al., 2020; Kosonen et al., 2006b). A EN 16282 propõe métodos simplificados para estimar as taxas de caudal de ar necessárias, particularmente úteis quando informações detalhadas sobre os equipamentos e operações ainda não estão totalmente disponíveis. Esse método funciona como diretriz essencial para que o projetista estabeleça uma base segura para o desenvolvimento do sistema, viabilizando orçamentos, compatibilização com a arquitetura e o cumprimento dos requisitos normativos preliminares.

O cálculo baseado na taxa de renovação horária do ar destaca-se pela sua praticidade, considerando as dimensões do espaço e o tipo de atividade desenvolvida. Assim, para cozinhas de uso geral, a norma recomenda um fator de 90 m³/h por metro quadrado, enquanto áreas de elevada intensidade, como grelha, rotisserie e lavagem de loiça, podem exigir até 120 m³/h por metro quadrado. Esses valores de referência refletem experiências práticas que procuram aliar eficiência energética e conforto térmico, mesmo que ainda em nível genérico (Benchikh Le Hocine et al., 2020; D. Han et al., 2022). Contudo, cabe destacar que essa abordagem, embora eficiente para cenários típicos de operação, tende a sobrestimar ou a subestimar as necessidades reais em cozinhas com layouts atípicos, grande variação de equipamentos ou usos intermitentes, devendo ser ajustada conforme as particularidades do ambiente (N. P. Gao et al., 2008).

Como alternativa, a norma recomenda o método baseado na velocidade de captura do ar, que exige maior detalhamento do projeto, especialmente no que se refere aos equipamentos instalados e às suas potências. Nesse contexto, o volume extraído é dimensionado a partir da velocidade do fluxo de ar entre o bordo inferior da hotte e o topo dos equipamentos, variando entre 0,15 m/s para cargas leves (fornos a vapor) e 0,3 m/s para cargas pesadas (churrasqueiras). No dimensionamento, considera-se que o volume total extraído $q_{v-t,ext}$ resulta do produto da velocidade de captura (v), do perímetro aberto (U), da altura entre a hotte e o equipamento de extração (h_d) e do fator de conversão horário (3600), conforme a Equação 2,

$$q_{v-t,ext} = v \times 3600 \times U \times h_d . \quad (2)$$

Essa abordagem procura garantir não apenas a eficiência de captura dos poluentes, mas também a adequação da renovação do ar, prevenindo o desconforto térmico e a formação de zonas mortas de exaustão, como indicado em validações numéricas e experimentais (D. Han et al., 2022; Zhao et al., 2017).

Além disso, a EN 16282 apresenta valores indicativos para ambientes anexos às cozinhas, tais como áreas de preparação, armazenamento e lavagem, conforme resumido na Tabela 3. Esses valores refletem tanto a necessidade de manutenção da qualidade do ar como o cumprimento de requisitos de segurança e conforto em áreas de suporte, lembrando sempre a importância de ajustar tais parâmetros à legislação nacional vigente (República Portuguesa, 2021).

Tabela 3 - Valores indicativos para instalações auxiliares (EN 16282)

Superfície	Fluxo de ar volumétrico (m ³ /(m ² h))
Preparação de carne	25
Preparação de peixe	25
Preparação de aves	25
Preparação de legumes	25
Armazenamento de produtos secos	6
Armazenamento de pão	6
Armazenamento de produtos não alimentares	6
Sala ocupada pela equipa	10 ^a
Vestiário dos funcionários	^a
Armazenamento de embalagens vazias	6
Ponto de entrega de comida quente	60
Área de lavagem de loiça ^b	80

^a Observe a possível existência de regulamentos nacionais relativos a locais de trabalho

^b Os valores citados referem-se apenas à sala de lavar loiça; ele é necessário que a máquina de lavar loiça seja tratada separadamente de acordo com a Tabela A.3.

Embora os métodos preliminares ofereçam uma base sólida para a fase inicial de projeto, é fundamental salientar que a sua aplicação deve ser seguida por análises detalhadas, à medida que as informações sobre os equipamentos, processos e ocupação se tornam mais precisas.

2.2.1.2.2. Dimensionamento detalhado

O método detalhado para o caudal de ar em sistemas de ventilação em cozinhas industriais, descrito na EN 16282-1, apresenta uma abordagem rigorosa e abrangente que considera as condições térmicas, o comportamento dos fluxos de ar e as interações entre os equipamentos

e o ambiente. Essa metodologia é fundamental para garantir que o sistema seja dimensionado com precisão, adaptando-se às características específicas dos equipamentos e ao *layout* do espaço, promovendo assim um ambiente seguro e eficiente.

Uma das bases do método é o cálculo do caudal de ar induzido termicamente, que ocorre devido à pluma térmica formada acima dos equipamentos em razão das diferenças de temperatura e de densidade. Esse caudal é diretamente influenciado pela carga térmica sensível transmitida por convecção, calculada pela Equação (3),

$$\dot{Q}_{S,K} = P \times \dot{Q}_S \times 0,5 , \quad (3)$$

em que $\dot{Q}_{S,K}$ representa a carga térmica sensível transmitida por convecção, \dot{Q}_S é a emissão de calor sensível dos equipamentos, e P é a potência nominal. O coeficiente de 0,5 é um valor padrão que reflete a proporção da carga térmica atribuída à convecção, podendo ser ajustado com base em informações específicas fornecidas pelo fabricante. A partir dessa carga térmica, determina-se o fluxo de ar induzido termicamente (q_{v-th}), que corresponde ao volume de ar que sobe devido ao efeito da pluma térmica sobre os equipamentos. A relação dada pela Equação (4),

$$q_{v-th} = k \left(\sum_{j=1}^m \dot{Q}_{S,K} \times \varphi \right)^{1/3} \times (h_d + 1,7h_{hydr})^{5/3} \times r , \quad (4)$$

onde $k = 18 \text{ m}^{4/3} \text{ W}^{-1/3} \text{ h}^{-1}$ é a constante empírica da norma; φ o fator de simultaneidade; r o fator de redução para o arranjo específico e h_{hydr} o diâmetro hidráulico do bloco de equipamentos, definido pela Equação (5),

$$h_{hydr} = 4 \times \frac{A}{P} , \quad (5)$$

onde A é a área e P o perímetro para uma geometria retangular. O cálculo correto desse parâmetro é crucial, pois influencia significativamente o comportamento da pluma e o dimensionamento do volume extraído (CEN, 2016). Conforme ilustrado na Figura 6, o diagrama evidencia os principais componentes envolvidos no processo. Nesse contexto, a norma avança para o tratamento detalhado dos fluxos de ar de retorno, que são fundamentais para o equilíbrio e a eficácia global do sistema. Quando o ar é extraído por meio de hottes, o fluxo de retorno é diretamente influenciado pela interação da pluma térmica com o campo de extração, aspecto que exige um dimensionamento rigoroso para garantir a máxima eficiência.

- 1 Ar de indução
- 2 Fluxo da pluma térmica
- 3 Fluxo de ar de retorno
- 4 Exaustores de cozinha
- 5 Equipamento da cozinha
- b Largura
- L Comprimento
- h_a Altura do equipamento
- h_d Altura acima da fonte térmica

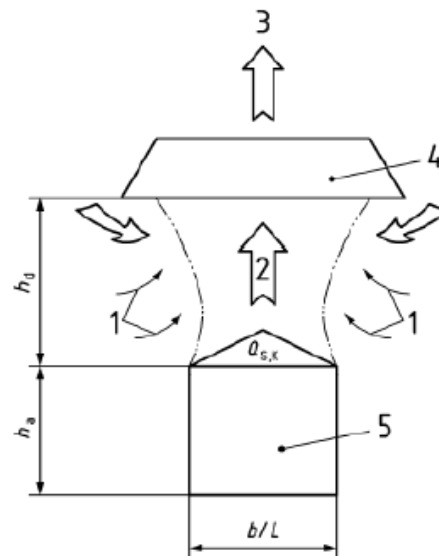


Figura 6 - Representação da extração de fluxo de ar induzida termicamente (Adaptado de EN 16282)

Esse caudal é calculado a partir da borda inferior da hotte, ajustado para considerar as perturbações causadas pela difusão do ar no ambiente. Tais perturbações, geradas por variações na velocidade do ar e por turbulências locais, podem desviar a pluma, reduzindo a eficiência da captura de poluentes. Para corrigir esse efeito, utiliza-se um coeficiente de ajuste, representado pela variável α , obtendo-se assim o caudal efetivamente captado pelo equipamento extrator:

$$q_{v-cap} = q_{v-th} \times \alpha \quad (6)$$

Em instalações onde há fornecimento direto de ar (sistemas de compensação), o fluxo total extraído incorpora o ar fornecido adicionalmente, segundo Equação (7),

$$q_{v-cap} = q_{v-th} \times \alpha + q_{v-dir} \quad (7)$$

onde q_{v-dir} é fluxo adicional de ar fornecido diretamente à hotte. É fundamental que o fluxo de ar fornecido diretamente seja controlado em temperatura para evitar condensação excessiva e que não ultrapasse 15% a 20% do fluxo total extraído (CEN, 2016).

Quando os equipamentos de confecção estão localizados fora da área de cobertura direta das hottes, o caudal de ar gerado deve ser deslocado até uma altura h_f igual a 2,5 m acima do piso,

onde será extraído pelo teto da cozinha. Esse caudal adicional, identificado como ($q_{v-th,ne}$), é incorporado ao cálculo do caudal total extraído, conforme a Equação (8),

$$q_{v-ext} = \sum_{i=1}^n q_{v-cap} + q_{v-th,ne} \times \alpha . \quad (8)$$

Se o caudal $q_{v-th,ne}$ representar menos de 10% do total, pode ser somado diretamente ao caudal de extração da hotte; caso contrário, requer uma análise separada para não desequilibrar o sistema.

Para sistemas de extração integrados, como tetos ventilados que englobam múltiplos blocos de equipamentos, o caudal total de extração é calculado de acordo com a Equação (9),

$$q_{v-ext} = \alpha \times \left(\sum_{j=1}^n q_{v-th} \right) , \quad (9)$$

esse detalhamento equaciona, de forma sistémica, as diferentes fontes térmicas e operacionais, garantindo a exaustão correta em todos os cenários previstos na norma (CEN, 2016).

2.2.2. Avaliação da qualidade do ar interior: Portaria n.º 138-G/2021

A Portaria n.º 138-G/2021 representa um avanço no panorama normativo português ao estabelecer parâmetros específicos para a qualidade do ar interior, em especial no que respeita à proteção dos ocupantes de ambientes industriais e coletivos. Contudo, uma análise comparativa revela tanto pontos de convergência com legislações internacionais como lacunas que desafiam a efetividade das medidas no contexto das cozinhas profissionais.

Um dos avanços trazidos por esta portaria, está na definição de limites para compostos orgânicos voláteis (COVs) e monóxido de carbono (CO), reconhecendo o impacto significativo desses poluentes em ambientes de elevada produção de contaminantes, como cozinhas industriais. No caso dos COVs, o valor-limite de $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ adotado em Portugal situa-se em posição intermédia no cenário internacional: é mais restritivo do que algumas legislações ocupacionais, mas menos rigoroso do que recomendações aplicáveis a ambientes sensíveis. Por exemplo, a norma ASHRAE 62.1 recomenda valores de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para espaços com grupos vulneráveis, como escolas e hospitais, podendo chegar a $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em ambientes menos críticos (ASHRAE, 2016). Em contrapartida, a EPA (*Environmental Protection Agency*) reconhece intervalos ainda mais amplos, de 300 a $3.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mas enfatiza limites mais baixos para locais com ocupação sensível (EPA, 2018). Diante disso, o patamar estabelecido pela legislação

portuguesa procura conciliar diferentes realidades, mas pode revelar-se insuficiente em ambientes com emissões intensas e permanentes, onde a exposição é contínua e a carga poluente substancialmente maior.

No caso do monóxido de carbono, o limite de 10 mg/m³ (8,7 ppm) da portaria está alinhado com as recomendações internacionais para ambientes internos de uso geral (máximo de 9 a 10 mg/m³), assegurando proteção adequada em situações típicas de exposição. Contudo, o parâmetro é significativamente mais restritivo do que os limites ocupacionais estabelecidos pela OSHA para ambientes industriais nos Estados Unidos, que permitem até 50 ppm em média ponderada de 8 horas (OSHA, 2023). Esta disparidade evidencia a diferença entre uma abordagem centrada na saúde pública geral e outra voltada para o contexto estritamente ocupacional. Para cozinhas industriais, onde a exposição pode ser intermitente mas intensa, o limite português aproxima-se das práticas mais protetivas; porém, a ausência de orientações para situações de pico ou de emergência pode representar um risco adicional não contemplado pela norma.

Quando se trata de partículas finas (PM_{2.5} e UFPs), a portaria reconhece a sua importância, mas à semelhança de outras legislações europeias, não define um limite quantitativo para exposição, diferentemente do cenário americano. A EPA, por exemplo, estabelece 35 µg/m³ como valor máximo para PM_{2.5} em exposições médias de 24 horas, critério importante para ambientes sujeitos à combustão e à produção de aerossóis (EPA, 2021). Esta omissão de um valor-limite objetivo dificulta a monitorização eficaz e a implementação de soluções técnicas baseadas em dados concretos, sobretudo considerando que estudos recentes evidenciam efeitos adversos à saúde em níveis inferiores aos tradicionalmente aceites (Schraufnagel et al., 2019; WHO, 2021).

Os óxidos de azoto, incluindo o dióxido de azoto (NO₂), também carecem de regulamentação quantitativa na portaria portuguesa, sendo apenas mencionada a necessidade de minimizar a exposição. Em contraste, a EPA estipula um limite de 100 ppb (aproximadamente 188 µg/m³) para NO₂ em exposições horárias (EPA, 2021), referência também adotada por algumas legislações estaduais americanas e recomendada pela Organização Mundial da Saúde para ambientes internos (WHO, 2021). A ausência de um parâmetro objetivo pode conduzir à subnotificação de exposições perigosas, especialmente em ambientes onde o uso de queimadores a gás é frequente e a ventilação pode não ser plenamente eficiente.

Comparando com o referencial francês, verifica-se que, enquanto a Portaria n.º 138-G/2021 foca em limites para compostos orgânicos voláteis e monóxido de carbono, o *Code du Travail* e os *Règlements Sanitaires Départementaux* (RSD) da França são mais abrangentes quanto à poluição particulada, estipulando, por exemplo, limites máximos para poeira total (10 mg/m³) e poeira alveolar (5 mg/m³) numa jornada de oito horas em locais de poluição específica, como cozinhas industriais (Code du Travail, 2008; Règlement Sanitaire Départemental, 1979). Ainda que tais limites sejam adaptados ao contexto ocupacional, a sua existência oferece um referencial objetivo para controlo e fiscalização, ausente na legislação portuguesa no que respeita a partículas inaláveis e respiráveis.

Adicionalmente, no que tange à obrigatoriedade de monitorização e auditoria, a portaria portuguesa avança ao exigir avaliações regulares da qualidade do ar e manutenção adequada dos sistemas de ventilação, convergindo com as exigências de auditoria periódica presentes em normas como a ASHRAE 180 (ASHRAE, 2018) e na legislação francesa. No entanto, persiste uma lacuna quanto à exigência de monitorização em tempo real ou à adoção de tecnologias avançadas de deteção e mitigação, cada vez mais comuns em regulações norte-americanas e recomendadas em contextos de elevada criticidade operacional (EPA, 2021; WHO, 2021).

Por fim, a harmonização normativa entre Portugal, França e outros países que já apresentam critérios mais detalhados poderia fortalecer significativamente as práticas nacionais, proporcionando maior segurança jurídica e operacional para projetistas, operadores e entidades fiscalizadoras. O alinhamento de limites quantitativos, bem como a incorporação de métricas de desempenho e de metodologias de avaliação reconhecidas internacionalmente, tende a elevar o patamar de proteção da saúde ocupacional e pública, transformando a legislação de um instrumento prescritivo numa ferramenta efetiva de garantia da qualidade do ar.

2.2.3. Normas e regulações complementares

O desenvolvimento de sistemas de ventilação para cozinhas industriais requer mais do que o simples cumprimento da EN 16282. Na prática, o projetista deve considerar um conjunto alargado de normas e regulamentos, que se entrecruzam para garantir não apenas a eficiência técnica do sistema, mas também a qualidade do ar interior, a segurança dos ocupantes e o desempenho energético do edifício como um todo.

Entre os documentos mais relevantes, destaca-se a NP EN 13779:2007, que estabelece requisitos mínimos para a ventilação e o condicionamento de ar em edifícios não residenciais. Esta norma, de aplicação transversal em espaços de trabalho, propõe uma classificação da qualidade do ar interior (IDA 1 a IDA 4) baseada principalmente nos limites de concentração de dióxido de carbono (CO₂) no ambiente, além de abordar parâmetros como as taxas de renovação de ar e critérios de conforto térmico e acústico (IPQ, 2007). Conforme apresentado na Tabela 4, cada classe IDA corresponde a um limite máximo de excesso de CO₂ em relação ao ar exterior, permitindo a adaptação das soluções de ventilação à criticidade do espaço e ao risco ocupacional envolvido.

Tabela 4 - Classes de qualidade do ar interior (IPQ, 2007)

Qualidade do ar	Excesso de CO ₂ em relação ao ar exterior (ppm)	Descrição da qualidade do ar
IDA 1	≤ 400	Muito alta
IDA 2	≤ 600	Alta
IDA 3	≤ 1.000	Média
IDA 4	> 1.000	Baixa

A evolução das exigências ambientais e de eficiência energética levou à publicação da NP EN 16798-1:2019, que amplia e aprofunda o enquadramento técnico do projeto e da operação de sistemas de ventilação. Esta norma representa um avanço ao trazer critérios mais abrangentes para a qualidade do ar interior, ajustando as taxas de ventilação em função da ocupação, da atividade desenvolvida e das fontes internas de poluição (IPQ, 2019). Ao enfatizar categorias de qualidade do ar e estratégias adaptativas, como o uso de sensores para a monitorização contínua de CO₂ e COVs, favorece soluções dinâmicas, alinhadas à sustentabilidade e à necessidade de otimizar o consumo energético, sem perder de vista o bem-estar dos ocupantes. No contexto das cozinhas industriais, onde a emissão de contaminantes e a variabilidade operacional são elevadas, este enfoque adaptativo revela-se especialmente relevante para o dimensionamento e a gestão dos sistemas (Awbi, 2015; Kosonen et al., 2006a; Song et al., 2022).

No plano legislativo nacional, o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 surge como resposta à transposição das diretivas europeias sobre o desempenho energético dos edifícios, reforçando a integração entre sistemas técnicos, ventilação e políticas de sustentabilidade (República Portuguesa, 2020). O diploma introduz obrigações relativas ao desempenho mínimo dos sistemas de ventilação, à certificação dos equipamentos e à realização de auditorias e de manutenção programada. Para cozinhas industriais, destaca-se a importância de harmonizar a eficiência energética com a necessidade de renovação constante do ar e de controlo rigoroso dos poluentes, o que implica escolhas tecnológicas conscientes e monitorização sistemática dos sistemas (Bartolozzi et al., 2024; Fasiuddin & Budaiwi, 2011; Iwaro & Mwasha, 2010).

Em síntese, a multiplicidade de normas e regulamentos aplicáveis à ventilação em cozinhas industriais reflete a complexidade desses ambientes e a necessidade de soluções técnicas que integrem saúde, eficiência, conforto e sustentabilidade. Ao articular recomendações de diferentes origens normativas, é possível construir projetos mais robustos e alinhados ao estado da arte da engenharia, contribuindo para a segurança ocupacional, a conformidade regulatória e a otimização ambiental das operações (Persily & de Jonge, 2017; Rim et al., 2012; C. Zhang et al., 2024).

2.3. Poluentes e estratégias de controlo

Nas últimas décadas, a mitigação dos riscos ambientais e ocupacionais tornou-se um desafio central para a engenharia de sistemas prediais, a saúde pública e as políticas de sustentabilidade urbana. À medida que a literatura revela os riscos elevados associados à presença de partículas, gases tóxicos e compostos orgânicos em cozinhas profissionais, cresce a exigência por soluções inovadoras capazes de responder à complexidade crescente desses ambientes. Assim, não basta reconhecer que estes espaços funcionam como verdadeiros emissores de poluentes: é preciso avançar para uma compreensão quantitativa e dinâmica dos mecanismos de geração, dispersão e controlo desses contaminantes, superando abordagens prescritivas baseadas apenas na renovação de ar e exigindo o desenvolvimento de indicadores de desempenho mais específicos e robustos (Benchikh Le Hocine et al., 2020; Ding et al., 2023).

Tal cenário evidencia não apenas a necessidade de tecnologias avançadas de ventilação e filtragem, mas também a importância de métodos de avaliação capazes de refletir a eficácia real das estratégias adotadas. O desafio, portanto, ultrapassa o simples cumprimento de requisitos normativos, exigindo a integração de métricas que permitam capturar desde a eficiência de captação e contenção até à dinâmica de diluição, filtração e exposição ocupacional ao longo do tempo (Clark et al., 2018; WHO, 2021).

A complexidade dos processos de confecção, marcada por fluxos de poluentes multifásicos, mudanças abruptas na produção e grande variabilidade operacional, impõe a adoção de ferramentas de monitorização contínua, análise de dados e simulação computacional para fundamentar decisões de projeto, operação e manutenção dos sistemas de ventilação. Portanto, a análise crítica das tecnologias de mitigação e dos indicadores de desempenho requer uma perspetiva multidisciplinar e dinâmica, capaz de articular o rigor experimental, a modelação computacional e a gestão operacional inteligente.

2.3.1. Emissões em processos de confecção

A poluição atmosférica em ambientes interiores consolidou-se como um dos focos prioritários de investigação para as ciências ambientais, a engenharia sanitária e a saúde ocupacional. Em cozinhas industriais, esta relevância deve-se não apenas à presença constante dos processos de confecção, mas também ao reconhecimento crescente de que tais ambientes são responsáveis pela geração e libertação de uma variedade significativa de poluentes atmosféricos. Frequentemente em concentrações elevadas, estes poluentes representam riscos expressivos não só para os trabalhadores diretamente expostos, mas também para utilizadores secundários e para o meio exterior, devido à possibilidade de dispersão e acumulação desses contaminantes.

A literatura revela que as cozinhas industriais podem ser consideradas verdadeiras zonas de concentração de poluentes, muitas vezes superando os níveis registados em ambientes urbanos exteriores e em outros contextos laborais. Entre os principais poluentes identificados destacam-se o material particulado (partículas finas e ultrafinas, PM_{2.5} e PM₁₀), os compostos orgânicos voláteis (COVs), os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), os aldeídos (formaldeído, acetaldeído), bem como gases tóxicos como o monóxido de carbono (CO), o dióxido de azoto (NO₂), o ozono (O₃) e, em menor escala, o dióxido de enxofre (SO₂). A diversidade e o potencial de risco destas substâncias são agravados pela formação de misturas complexas, nas quais a presença simultânea de múltiplos contaminantes potencia os efeitos toxicológicos, dada a possibilidade de interações químicas e da formação de subprodutos ainda mais nocivos (O. Han et al., 2019; Schraufnagel et al., 2019).

Essa complexidade química reflete-se de forma particular nas características do material particulado, que tem recebido especial atenção em estudos epidemiológicos devido à sua elevada capacidade de penetração nas vias respiratórias inferiores e até de translocação para a corrente sanguínea. Para além do risco mecânico de inflamação dos tecidos pulmonares, as partículas finas funcionam como vetores de contaminantes tóxicos adsorvidos à sua superfície, tais como metais pesados, PAHs e COVs (Ababio et al., 2024; Alves et al., 2021; EPA, 2021). A

exposição crónica a estas partículas é reconhecida como um dos principais fatores de risco para o desenvolvimento de doenças respiratórias crónicas, agravamento da asma, doença pulmonar obstrutiva crónica (DPOC), doenças cardiovasculares e até cancro do pulmão (Schraufnagel et al., 2019; WHO, 2021).

A par das partículas, os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) constituem outro grande desafio para a qualidade do ar em cozinhas industriais, tanto pela sua diversidade estrutural como pelos efeitos adversos na saúde. A emissão destes compostos ocorre sobretudo durante a pirólise incompleta de óleos, combustíveis e ingredientes, com destaque para substâncias como o benzeno, o tolueno, o etilbenzeno, os xilenos (BTEX) e o formaldeído (Atamaleki et al., 2024; EPA, 2018). Muitos COVs são reconhecidos como carcinogénicos, mutagénicos ou neurotóxicos, conferindo a estas exposições um carácter particularmente preocupante. Estudos realizados no Irão detetaram concentrações de BTEX superiores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Atamaleki et al., 2024), enquanto operações de grelhados podem atingir valores acima de $3500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de COVs (Cheng et al., 2016), ambos muito superiores aos limites de exposição recomendados.

Entre as classes de poluentes mais relevantes tanto pelo risco toxicológico como pela persistência ambiental, destacam-se os aldeídos, em especial o formaldeído e o acetaldeído. O formaldeído, classificado como carcinogénico do Grupo 1 pela IARC (IARC, 2013) e regulamentado por entidades como a OSHA (2023) e a ASHRAE (2022), é um subproduto recorrente de processos de alta temperatura, em particular da combustão incompleta de materiais orgânicos e óleos vegetais poli-insaturados (Alves et al., 2021; Lu et al., 2021). Estudos realizados em cozinhas portuguesas reportam concentrações de formaldeído entre 50 e $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Alves et al., 2021; Vicente et al., 2021), valores que excedem as recomendações da Organização Mundial da Saúde e que implicam riscos de irritação ocular, sintomas respiratórios, agravamento de patologias pré-existentes e, em exposições prolongadas, aumento da incidência de neoplasias do trato respiratório superior.

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) são gerados principalmente durante a combustão incompleta de combustíveis fósseis, lenha ou carvão, bem como na pirólise de gorduras animais e óleos vegetais. Entre estes, o benzopireno constitui um exemplo emblemático de substância altamente persistente, bioacumulável e reconhecidamente carcinogénica. Pesquisas como a de Alves et al. (2021) identificaram concentrações de benzopireno entre 1 e $5 \text{ng}/\text{m}^3$ em cozinhas industriais, que, embora baixas em termos absolutos, representam risco significativo devido ao elevado potencial carcinogénico destes compostos, mesmo em concentrações reduzidas.

Entre os gases inorgânicos mais relevantes em ambientes de confeção, destacam-se o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de azoto (NO_2), ambos reconhecidos pela sua elevada toxicidade e impacto na saúde ocupacional. O CO, libertado sobretudo na combustão incompleta de combustíveis fósseis, caracteriza-se por ser incolor, inodoro e de elevada afinidade pela hemoglobina, podendo provocar hipóxia tecidual mesmo em baixas concentrações, com manifestações que variam entre cefaleia e fadiga até quadros de intoxicação aguda potencialmente fatais (EPA, 2021; OSHA, 2023). O NO_2 , comum em processos de combustão e no uso de equipamentos a gás, está associado ao agravamento de patologias respiratórias, aumento de infeções pulmonares e efeitos sistémicos, sobretudo em populações

vulneráveis. A sua predominância em ambientes mal ventilados reforça a necessidade de monitorização contínua e de sistemas de ventilação eficazes.

A variabilidade das emissões em cozinhas industriais resulta de uma interação multifatorial entre fatores tecnológicos, operacionais, arquitetónicos e comportamentais. O método de confeção, o tipo de combustível, as características dos equipamentos e até os hábitos dos trabalhadores condicionam de forma significativa os níveis e perfis de poluentes emitidos (Alves et al., 2021, 2022; Figueiredo et al., 2024; Y.-C. Li et al., 2015; Pikmann et al., 2023; To & Yeung, 2011). Neste contexto, o desempenho dos sistemas de ventilação e extração assume papel central no controlo das concentrações. Embora estudos indiquem que sistemas bem projetados e mantidos podem reduzir até 70% da carga poluente (Dobbin et al., 2018; Lunden et al., 2015), a realidade mostra que falhas de manutenção, obstruções, inadequações de dimensionamento e utilização incorreta comprometem frequentemente a sua eficácia (Yu et al., 2024).

Adicionalmente, fatores como a intensidade e simultaneidade das operações, a movimentação dos trabalhadores e os horários de pico contribuem para picos transitórios de poluição, muitas vezes subestimados pelos métodos tradicionais de amostragem (Ababio et al., 2024; Vicente et al., 2021). A persistência ambiental destes poluentes é agravada pela insuficiência da ventilação e pela baixa taxa de degradação de compostos como os COVs, prolongando a exposição (Clark et al., 2018). A literatura também tende a negligenciar os efeitos sinérgicos entre diferentes poluentes, limitando a compreensão integral dos riscos e a eficácia das estratégias de mitigação (Schraufnagel et al., 2019).

Face a esta complexidade, torna-se clara a necessidade de abordagens avançadas e integradas para a avaliação e o controlo dos riscos em cozinhas industriais. Enquanto os métodos experimentais clássicos permanecem essenciais para a caracterização empírica, o avanço da modelação computacional — em particular a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) — permite simular cenários realistas, testar soluções de ventilação e fundamentar estratégias personalizadas de mitigação (Benchikh Le Hocine et al., 2020; Ding et al., 2023). A integração entre abordagens experimentais e computacionais, aliada ao reforço das políticas públicas e da fiscalização, constitui o caminho mais promissor para a criação de ambientes de trabalho mais seguros e saudáveis.

2.3.2. Tecnologias e indicadores de eficiência na mitigação de poluentes

A crescente complexidade dos ambientes de confeção industrial e o avanço do conhecimento sobre os impactos dos poluentes atmosféricos têm impulsionado o desenvolvimento de métodos quantitativos cada vez mais refinados para a avaliação da eficiência dos sistemas de ventilação e extração. Neste contexto, a definição e aplicação de indicadores de desempenho tornam-se essenciais não apenas para o cumprimento das normas e recomendações internacionais, mas também para a garantia da saúde ocupacional, da sustentabilidade ambiental e da eficiência energética nas cozinhas profissionais (CEN, 2016; WHO, 2021).

O ponto de partida para qualquer análise reside na caracterização da capacidade do sistema em renovar o ar do ambiente, mitigando a concentração dos poluentes emitidos. Embora a taxa de renovação de ar tenha sido abordada em capítulos anteriores e permaneça como indicador

clássico, a literatura indica que a sua aplicação isolada pode ser insuficiente, dada a natureza multifásica dos contaminantes, a variabilidade dos processos de confecção e a complexidade das fontes de emissão (Alves et al., 2021; Schraufnagel et al., 2019). Por essa razão, o campo evoluiu para incorporar métodos mais específicos de avaliação da eficiência dos sistemas de ventilação e extração, com base em métricas derivadas de medições *in situ*, modelação computacional e análise integrada de indicadores operacionais e de resultado.

Entre os indicadores de desempenho mais utilizados na avaliação de sistemas de ventilação destaca-se a eficiência de captação, amplamente reconhecida na literatura científica e em protocolos de ensaio específicos, como o ASTM E3087-18. Este parâmetro expressa a fração do poluente efetivamente removida pelo sistema de extração em relação ao total emitido pela fonte, sendo definido pela Equação (10),

$$\eta_c = \frac{M_{capt}}{M_{tot}} \times 100 , \quad (10)$$

onde M_{capt} representa a massa do poluente capturada no período de medição, e M_{tot} à massa total do poluente emitida pela fonte no mesmo intervalo. A obtenção experimental destes valores geralmente exige o uso de gases traçadores (como o hexafluoreto de enxofre, SF₆) ou métodos de amostragem direta de partículas e compostos voláteis, permitindo a avaliação objetiva do desempenho sob diferentes condições operacionais (CEN, 2016; Lunden et al., 2015).

Ding et al. (2023) e Dobbin et al. (2018) apontam que o η_c pode variar consideravelmente em função do projeto, do balanço de pressões no ambiente e das condições de operação. Assim, hottes convencionais exibem eficiência de captação entre 30% e 60% em testes de campo, enquanto coifas de contenção avançada, dotadas de defletores ou cortinas de ar, frequentemente superam 80% de eficiência quando corretamente projetadas e mantidas. No entanto, valores obtidos em laboratório tendem a sobrestimar o desempenho real devido à ausência de perturbações como correntes de ar cruzadas, movimentação de trabalhadores e variações térmicas. A análise crítica destes dados evidencia a necessidade de ensaios padronizados e de monitorização contínua para garantir a representatividade dos resultados em condições reais de uso (Clark et al., 2018; Yu et al., 2024).

Complementar à eficiência de captação, a eficiência de contenção emerge como indicador relevante para tecnologias de coifas com design avançado, especialmente aquelas equipadas com cortinas de ar, defletores ou sistemas perimetrais. Este parâmetro procura medir quão eficazmente o sistema previne o escape lateral de poluentes para a zona de respiração dos trabalhadores, avaliando a integridade da barreira aerodinâmica estabelecida pelo equipamento (CEN, 2016; Lunden et al., 2015):

$$\eta_{cont} = \left(1 - \frac{C_{edge}}{C_{in}}\right) \times 100 , \quad (11)$$

em que C_{in} é a concentração de poluente medida no interior da coifa, e C_{edge} a concentração detetada nas bordas ou na zona de escape da coifa. Valores elevados de η_{cont} indicam maior capacidade de isolamento do sistema face a fluxos turbulentos ou obstáculos operacionais, condição crítica em cozinhas com elevado fluxo de pessoas e múltiplas fontes de poluição (ASTM International, 2018; Clark et al., 2018).

A estes parâmetros acrescenta-se a fração de escape, indicador diretamente complementar à eficiência de captação. Este índice quantifica a parcela de poluentes não capturada pelo sistema e que, portanto, escapa para o ambiente, sendo calculado pela Equação (12),

$$\phi_{esc} = 1 - \eta_c . \quad (12)$$

Essa métrica é frequentemente utilizada em estudos experimentais e numéricos sob a designação *spillage*, representando uma avaliação prática das perdas de contenção do sistema em condições operacionais reais (Kosonen & Mustakallio, 2003).

Além dos indicadores relacionados diretamente com a captura e contenção, o controlo da concentração de poluentes no ar ambiente também depende do desempenho dos sistemas de filtração. A eficiência de filtração é calculada pela relação entre as concentrações de poluente antes e depois do elemento filtrante, representada por (Benchikh Le Hocine et al., 2020; EPA, 2021) como:

$$\eta_{co} = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100 , \quad (13)$$

onde C_{inlet} e C_{outlet} referem-se às concentrações de poluente na entrada e na saída do filtro, respetivamente. Os resultados de eficiência variam em função do tipo de filtro utilizado: filtros mecânicos (grosseiros ou finos), filtros eletrostáticos, carvão ativado ou sistemas de oxidação fotocatalítica (TiO₂). Estudos indicam que filtros eletrostáticos podem alcançar até 95% de remoção de partículas ultrafinas, enquanto filtros de carvão ativado removem eficientemente até 80% dos VOCs em condições ideais de manutenção (Atamaleki et al., 2024; Benchikh Le Hocine et al., 2020; EPA, 2018). Contudo, a saturação dos filtros, o *bypass* de contaminantes e a manutenção deficiente podem reduzir drasticamente a eficiência ao longo do tempo, destacando a importância da monitorização contínua das quedas de pressão e dos ciclos de limpeza (Clark et al., 2018; Yu et al., 2024).

Ainda no contexto da avaliação ambiental, é relevante considerar a eficiência de diluição, fundamental em cozinhas de grande porte, com *layouts* abertos ou múltiplas zonas de confeitura. Este indicador expressa a capacidade do sistema de ventilação em reduzir a concentração de poluentes desde o ponto de emissão até à zona de respiração dos ocupantes, sendo definida pela Equação (14) (Clark et al., 2018; WHO, 2021),

$$\eta_{dil} = \left[1 - \frac{C_{room}}{C_{room}} \right] \times 100 , \quad (14)$$

em que C_{room} é a concentração média do poluente no ambiente e C_{room} a concentração na fonte emissora. A avaliação crítica desta métrica mostra que, embora útil para diagnósticos globais, este indicador pode mascarar exposições pontuais ou picos agudos de poluição, especialmente quando são utilizadas médias temporais longas (Schraufnagel et al., 2019; Vicente et al., 2021).

No plano ocupacional, os avanços metodológicos têm incentivado a adoção de índices integrados de exposição, que consideram tanto as concentrações médias como as variações instantâneas ao longo do tempo, oferecendo uma visão mais fiel dos riscos enfrentados pelos trabalhadores (Schraufnagel et al., 2019; WHO, 2021). O IEI é definido pela Equação (15),

$$IEI = \int_0^t C(t) dt , \quad (15)$$

onde $C(t)$ é a concentração instantânea do poluente e t o período de exposição considerado. A operacionalização deste índice exige o uso de sensores contínuos de monitorização, permitindo captar não apenas exposições crónicas, mas também picos agudos associados a falhas operacionais, variações de carga ou mau funcionamento dos sistemas de ventilação.

Do ponto de vista energético, a eficiência dos sistemas de ventilação deve ser avaliada sob a perspetiva da sustentabilidade e da racionalização dos recursos. A literatura, especialmente CEN (2016) e Dobbin et al. (2018), propõe a eficiência energética do sistema de ventilação como a relação entre a massa de poluentes removida e o consumo de energia, expressa pela Equação (16):

$$\eta_{en} = \frac{M_{rem}}{E_{vent}} , \quad (16)$$

em que M_{rem} é a massa total de poluentes efetivamente removida e E_{vent} o consumo energético associado ao funcionamento do sistema. Tal relação é estratégica para a

implementação de ventilação sob demanda, recuperação de calor e utilização de motores de alta eficiência, permitindo o balanceamento entre eficácia de mitigação e redução de custos operacionais e emissões indiretas de gases com efeito de estufa.

A adoção destes indicadores, no entanto, está condicionada a uma série de desafios científicos e operacionais. Um dos principais pontos críticos reside na padronização das metodologias de medição, uma vez que variações em equipamentos, protocolos de recolha e calibração dos sensores podem comprometer a comparabilidade entre estudos (Clark et al., 2018; Lunden et al., 2015). Além disso, a maioria das investigações centra-se na análise de poluentes isolados, negligenciando a sinergia química entre os diferentes contaminantes, bem como os efeitos do layout, do fluxo de ar e da dinâmica dos ocupantes sobre a dispersão dos poluentes (O. Han et al., 2019; Schraufnagel et al., 2019).

Outra limitação recorrente é a escassez de estudos longitudinais que avaliem o desempenho dos sistemas ao longo do tempo, principalmente sob condições reais de utilização, onde falhas de manutenção, saturação de filtros e variações nas cargas de poluição podem impactar significativamente a eficiência operacional (Yu et al., 2024). A literatura recomenda a integração de métodos experimentais, monitorização contínua e modelação computacional para permitir simulações realistas, identificação de hotspots de poluição e desenvolvimento de indicadores preditivos de desempenho (Benchikh Le Hocine et al., 2020; Ding et al., 2023).

Cabe salientar que, apesar da sofisticação crescente dos indicadores e do suporte oferecido pela modelação digital, a efetividade dos sistemas de ventilação depende, em última análise, da gestão integrada e contínua dos processos de manutenção, da capacitação dos operadores e do alinhamento com as normas e exigências regulatórias (Figueiredo et al., 2024; Vicente et al., 2021). A convergência entre tecnologias de monitorização inteligente, integração de dados ambientais em tempo real (IoT) e análises preditivas baseadas em inteligência artificial promete revolucionar o campo da gestão da qualidade do ar em cozinhas industriais. *Dashboards* de gestão ambiental, alimentados por sensores e algoritmos, permitem intervenções imediatas perante desvios críticos, promovendo ambientes mais seguros, saudáveis e eficientes (Ding et al., 2023).

O futuro da avaliação de sistemas de ventilação passa, portanto, pela articulação entre rigor metodológico, inovação tecnológica e gestão operacional integrada, de modo a assegurar padrões elevados de proteção da saúde e de sustentabilidade ambiental no contexto das cozinhas industriais contemporâneas.

2.4. Aspectos económicos e ambientais

O papel estratégico dos sistemas HVAC em cozinhas industriais transcende a simples função de condicionamento térmico e exaustão. Estas instalações operam sob condições extremas de carga térmica e geração de poluentes, o que confere à ventilação mecânica um protagonismo técnico e económico. Ao mesmo tempo, o crescimento das exigências de desempenho ambiental e de transparência institucional tem reposicionado estes sistemas como eixos críticos na estrutura de governação organizacional. A interface entre desempenho térmico, consumo

energético e responsabilidade socioambiental tornou-se, portanto, um campo de análise obrigatório.

A interdependência entre eficiência operacional e sustentabilidade é particularmente evidente nas cozinhas profissionais, onde a intensidade dos processos de confeitaria impõe exigências únicas à infraestrutura predial. A magnitude das cargas térmicas geradas, a composição variável dos poluentes emitidos e a distribuição intermitente das fontes de calor colocam os sistemas HVAC sob pressão constante. Quando mal dimensionados, tornam-se fontes de desperdício energético, insalubridade e custos ocultos; quando sobredimensionados, geram sobrecustos operacionais e impactos ambientais evitáveis. Essa dualidade técnica converte o dimensionamento e a operação dos sistemas HVAC numa variável decisiva para a performance global do edifício.

As evidências empíricas reunidas na literatura especializada demonstram que o consumo energético associado à ventilação e climatização de cozinhas comerciais frequentemente ultrapassa proporções aceitáveis, sendo desproporcional à produtividade efetiva do ambiente. Esta distorção é agravada por layouts mal planejados, utilização inadequada dos equipamentos e práticas operacionais descoordenadas, que comprometem o desempenho dos sistemas mesmo quando tecnologicamente avançados. Neste contexto, o papel do projeto HVAC não pode mais ser dissociado de estratégias integradas de eficiência energética, automação e análise de ciclo de vida.

Por sua vez, o alinhamento destes sistemas aos princípios ESG requer mais do que a escolha de equipamentos eficientes. Exige rigor técnico no dimensionamento, compromisso institucional com a governança dos ativos energéticos e integração de tecnologias de monitorização que permitam ajustes em tempo real às condições operacionais. A ventilação industrial, antes tratada como um subsistema periférico, passa a ocupar o centro das decisões estratégicas, atuando como vetor de sustentabilidade, saúde ocupacional e resiliência organizacional.

2.4.1. Consumo energético dos sistemas HVAC em cozinhas industriais

A operação intensiva dos sistemas HVAC em cozinhas industriais é resultado direto das exigências térmicas impostas por este ambiente operacional singular. A confeitaria, atividade central nestas instalações, gera uma carga térmica intermitente, de magnitude elevada e distribuição espacial irregular. Grande parte da energia consumida pelos equipamentos de confeitaria não é convertida em calor útil para os alimentos, mas dissipada no ambiente como calor sensível, elevando rapidamente a temperatura local e comprometendo tanto a qualidade do ar como a eficiência energética da instalação (Torkmahalleh et al., 2017). A resposta a este cenário exige soluções de ventilação que operem com elevada eficácia de remoção e flexibilidade, capazes de se ajustar às variações de procura térmica e à natureza dinâmica das emissões.

Para além do calor, o processo liberta poluentes em concentrações e composições que variam consoante o tipo de combustível, o método de confeitaria e a intensidade de utilização. Em estudo controlado, Torkmahalleh et al. (2017) demonstraram que fogões a gás produzem concentrações significativamente superiores de partículas ultrafinas e submicrométricas

quando comparados com os elétricos, sobretudo durante técnicas como fritura e salteados. A presença destes poluentes impõe maior esforço aos sistemas HVAC, que devem operar com maior caudal e eficiência de captura. A falha neste processo não apenas compromete a salubridade do ar, como também favorece a deposição de contaminantes nos dutos, aumentando as perdas de carga e, conseqüentemente, o consumo energético (Du et al., 2017).

A relevância energética das cozinhas foi evidenciada de forma contundente no estudo de Mudie et al. (2014), realizado em catorze *gastro-pubs* britânicos. Como pode ser observado na Figura 7, cerca de 63% do consumo elétrico total destes estabelecimentos era atribuído à cozinha, mesmo em edifícios de uso misto.

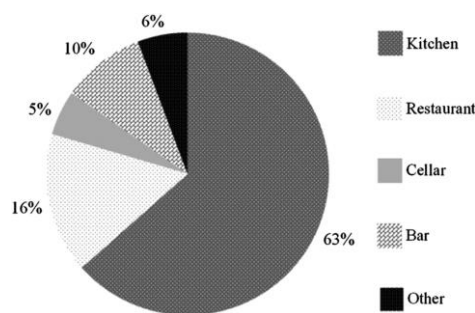


Figura 7 - Consumo energético por área física (Mudie et al., 2014)

Apesar de a pesquisa não isolar o consumo específico dos sistemas HVAC, a predominância dos processos térmicos e da refrigeração, responsáveis por aproximadamente 28% do consumo total, evidencia a sua contribuição direta para a carga térmica do ambiente, como ilustrado na Figura 8.

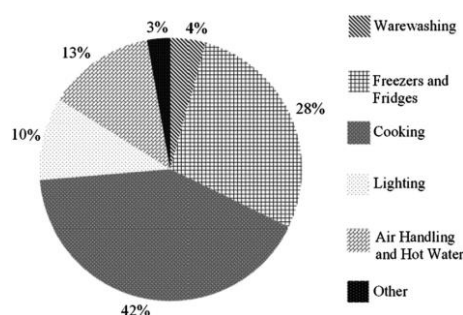


Figura 8 - Consumo energético por função (Mudie et al., 2014)

Paralelamente, a configuração física da cozinha desempenha um papel decisivo no desempenho energético. A má disposição dos equipamentos pode gerar zonas mortas de ventilação e recirculação de vapores, exigindo maior esforço dos exaustores. C. Zhang et al. (2024) destacam que a integração entre layout e dinâmica térmica é crucial para evitar perdas energéticas. Em cozinhas mal configuradas, a simples localização inadequada de um grelhador

pode elevar significativamente a temperatura ambiente e, por consequência, o consumo dos sistemas de climatização.

No estudo de Mudie et al. (2014), observou-se uma redução de 152% no número de refeições entre o fim de semana e a segunda-feira, mas uma queda de apenas 20% no consumo elétrico, discrepância claramente evidenciada na Figura 9.

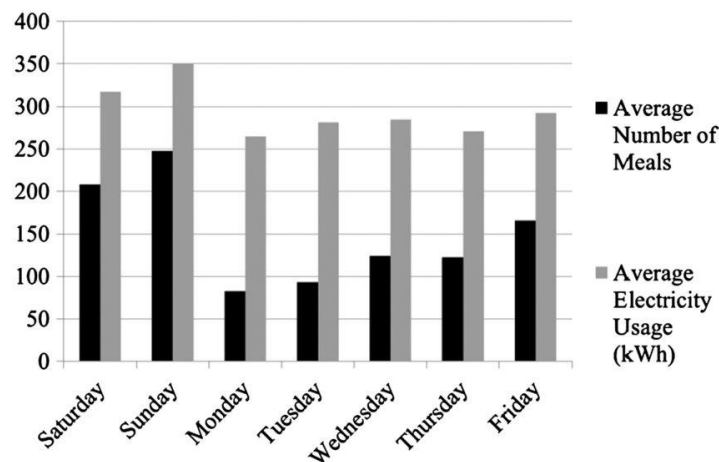


Figura 9 - Consumo diário vs. refeições servidas (Mudie et al., 2014)

Esta discrepância revela uma operação contínua e ineficiente dos sistemas HVAC, que permanecem ativos independentemente da intensidade produtiva. O perfil de consumo elétrico ao longo do dia, mostrado na Figura 10, evidencia a constância do consumo também nos períodos noturnos e entre turnos.

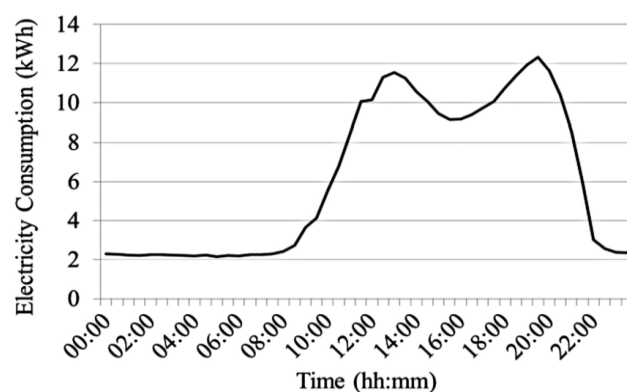


Figura 10 - Perfil de consumo elétrico em 24 horas (Mudie et al., 2014)

Além disso, a instalação de equipamentos térmicos junto a sistemas de refrigeração compromete o desempenho de ambos. Mudie et al. (2014) demonstraram que refrigeradores posicionados próximos de grelhadores apresentaram aumento de até 30% no consumo, como pode ser observado na Figura 11.

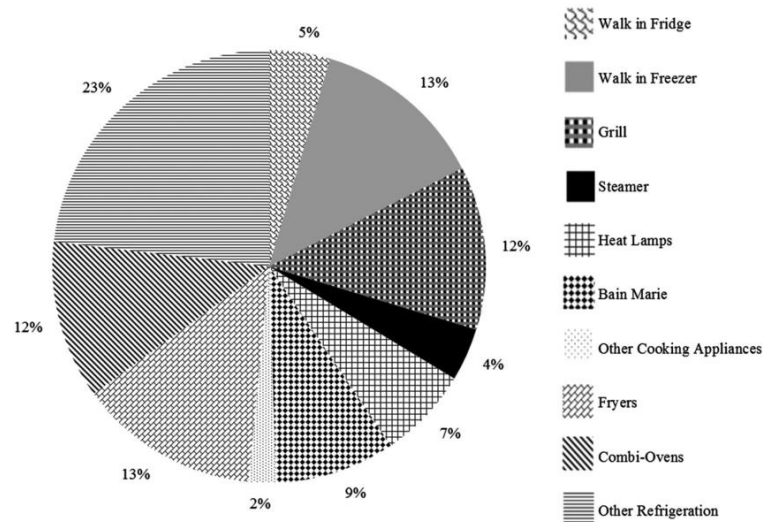


Figura 11 - Consumo por equipamento (Mudie et al., 2014)

A variação de consumo entre equipamentos idênticos, operando em contextos distintos, reforça o peso do comportamento humano. Em dois estabelecimentos analisados, grelhadores com as mesmas especificações apresentaram uma diferença de 71% no consumo energético, atribuída exclusivamente à forma de utilização pelos operadores (ver Figura 12).

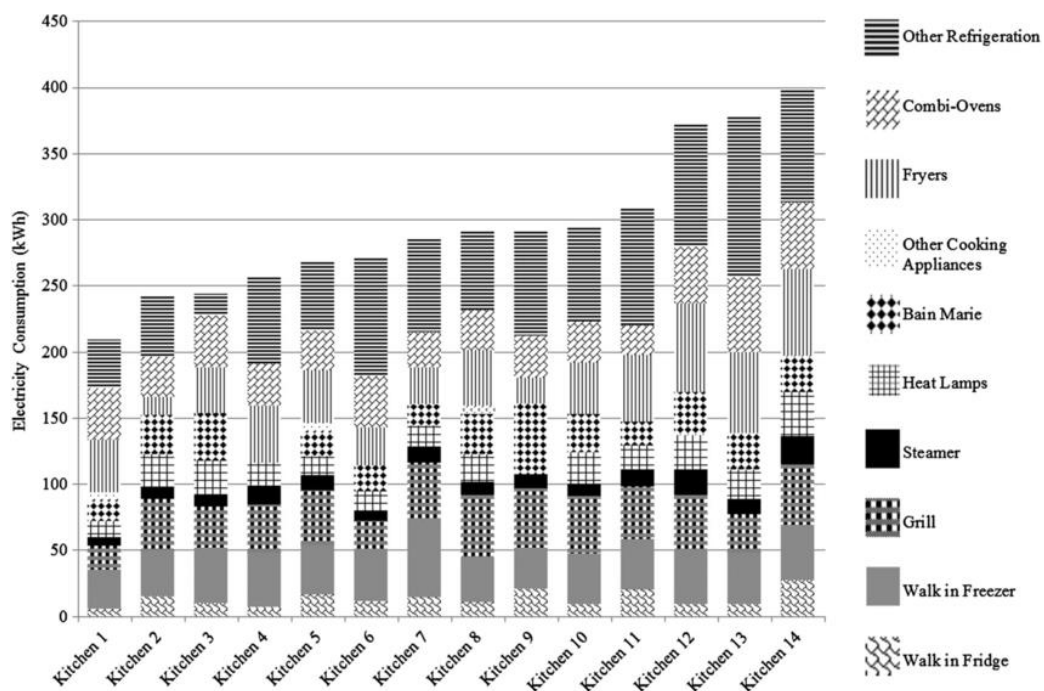


Figura 12 - Consumo comparado por grelhador (Mudie et al., 2014)

Apesar desta complexidade, muitos projetos ainda adotam abordagens prescritivas, baseadas em taxas fixas de renovação de ar, desconsiderando a simultaneidade de uso, os padrões de

emissão e o comportamento dos utilizadores. Tal prática frequentemente conduz a sobredimensionamentos, que aumentam o consumo desnecessariamente, ou a subdimensionamentos, que comprometem o desempenho térmico e a qualidade do ar (C. Zhang et al., 2024).

Como alternativa, Zhang et al. propõem a ventilação controlada por procura (DCKV), uma estratégia baseada em sensores que monitorizam variáveis como temperatura, humidade e concentração de partículas. Através da modulação dinâmica dos caudais de extração, o sistema ajusta a sua operação à necessidade real, permitindo economias de até 28% no consumo energético da ventilação. Para alcançar esses resultados, contudo, é necessário que a calibração do sistema, a manutenção dos sensores e o comportamento operacional dos utilizadores estejam alinhados com os objetivos de eficiência.

O impacto do comportamento operacional é igualmente abordado por Du et al. (2017), que salientam como decisões aparentemente inócuas, como manter exaustores ligados em períodos ociosos, aumentam a carga térmica e comprometem a eficiência do sistema. Torna-se assim evidente que o desempenho energético não se resume à tecnologia, mas resulta da interação entre projeto, operação e cultura organizacional.

Do ponto de vista tecnológico, novas soluções têm vindo a ser estudadas para mitigar o impacto energético. Uma delas é a recuperação de calor do ar extraído. S. Zhang et al. (2024) apontam que até 55% da energia térmica pode ser reaproveitada, reduzindo significativamente o custo de aquecimento do ar de reposição. No entanto, a eficiência destes sistemas depende da integridade dos permutadores, que, como demonstrado por S. W. Chen et al. (2025), podem perder desempenho ao longo do tempo devido à saturação por gordura, tornando indispensável a manutenção preventiva.

Sob a perspetiva financeira, os sistemas HVAC representam uma parcela expressiva dos custos operacionais. Num dos *gastro-pubs* estudados por Mudie et al. (2014), a despesa anual com eletricidade superou £37.000, sendo entre 30% e 50% deste montante associado aos sistemas de climatização. Perante tais números, torna-se claro que a eficiência energética não pode ser tratada como uma opção, mas como um eixo estratégico.

Por fim, a eficiência energética dos sistemas HVAC está diretamente associada aos compromissos ambientais das organizações. A Diretiva Europeia 2012/27/UE estabelece metas obrigatórias para a redução do consumo de energia em edifícios comerciais, incentivando a modernização tecnológica, a recuperação energética e a automação dos sistemas (Diretiva 2012/27/UE, 2012). Neste cenário, os sistemas HVAC, quando bem dimensionados e operados, deixam de ser meros consumidores e passam a ser ferramentas essenciais de sustentabilidade no setor da restauração.

2.4.2. Sistemas HVAC como vetores ESG

Dado o carácter intensivo dos processos térmicos e a emissão contínua de poluentes, a literatura científica e as recomendações de organismos internacionais convergem para a ideia de que falhas no projeto de ventilação e climatização afetam não apenas o desempenho

operacional, mas também a saúde coletiva, a sustentabilidade ambiental e a imagem institucional das organizações (EPA, 2021; WHO, 2021). Du et al. (2017) e Amouei Torkmahalleh et al. (2017) demonstram que sistemas subdimensionados ou mal projetados podem elevar a exposição a poluentes a níveis críticos, comprometendo metas de segurança e sustentabilidade e resultando em passivos ambientais relevantes. Schraufnagel et al. (2019) enfatizam que o controle adequado da qualidade do ar interior não é apenas um requisito normativo, mas um fator decisivo para a saúde pública, a produtividade e a credibilidade das empresas perante as exigências ESG. Fasiuddin & Budaiwi (2011) reforçam a necessidade de avaliar continuamente a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas HVAC como critério de governança e de gestão de riscos institucionais. A complexidade destas instalações exige, assim, uma abordagem integrada, na qual o desempenho técnico e a responsabilidade institucional sejam considerados de forma simultânea.

Neste contexto, o desafio do dimensionamento adequado dos sistemas HVAC encontra-se na delicada conciliação entre múltiplas variáveis operacionais. Por um lado, é necessário garantir a eficiente captação de calor, vapor de água, material particulado e compostos orgânicos voláteis, cuja presença atinge níveis críticos durante o preparo de alimentos (Du et al., 2017; Wang et al., 2017); por outro, impõe-se a manutenção da eficiência energética e do controle de custos ao longo do ciclo de vida do sistema. Esse equilíbrio, frequentemente negligenciado, torna-se ainda mais crucial quando se considera que desvios de projeto, tanto por sobredimensionamento como por subdimensionamento, podem acarretar consequências económicas e ambientais significativas.

Quando os sistemas são subdimensionados, usualmente por decisões baseadas apenas no menor custo inicial, a eficiência de captura dos poluentes e a renovação do ar ficam comprometidas. Essa deficiência operacional contribui para o aumento das concentrações internas de partículas e VOCs, ultrapassando os limites de segurança ocupacional recomendados (Torkmahalleh et al., 2017). Du et al. (2017) observaram que cozinhas comerciais com sistemas de exaustão mal dimensionados apresentaram níveis de PM_{2.5} e VOCs até cinco vezes superiores aos registados em áreas urbanas externas, configurando um cenário crítico para a saúde dos trabalhadores e para a salubridade do ambiente.

A insuficiência na extração de ar quente e de humidade, frequentemente acompanhada pela ausência de um sistema de reposição devidamente balanceado, agrava a recirculação de contaminantes e o sobreaquecimento do ambiente. Esta condição compromete o equilíbrio de pressões do recinto, favorece o influxo de ar contaminado de outras zonas do edifício e contribui para o desconforto térmico e a fadiga ocupacional (Wang et al., 2017). Tal quadro impõe riscos operacionais e representa um entrave à manutenção de ambientes de trabalho produtivos e seguros.

O oposto também se revela problemático. Estratégias baseadas no sobredimensionamento, frequentemente adotadas como tentativa de garantir robustez ao sistema, resultam em investimentos iniciais inflacionados, maior ocupação de espaço físico e consumo energético desproporcional às necessidades reais (Iwaro & Mwashu, 2010). Equipamentos a operar em regime intermitente ou abaixo da sua carga ideal perdem eficiência, sofrem desgaste

premature e requerem manutenções mais frequentes, revertendo a suposta vantagem inicial num passivo económico e ambiental.

Assim, a operação ineficiente destes sistemas interfere diretamente no desempenho ambiental das organizações. Num contexto de crescente exigência por parte de investidores e entidades reguladoras quanto às metas de descarbonização e de uso racional dos recursos, a presença de sistemas HVAC sobredimensionados compromete a compatibilidade com as diretrizes ESG. O desperdício de energia, a emissão evitável de gases com efeito de estufa e o uso exacerbado de materiais tornam-se elementos contraditórios aos princípios da responsabilidade ambiental.

Os impactos, contudo, não se restringem ao plano ambiental. A qualidade do ambiente de trabalho está intrinsecamente ligada ao desempenho do sistema HVAC. Ambientes com ventilação insuficiente elevam a exposição a poluentes, aumentam a incidência de doenças respiratórias e reduzem a produtividade dos trabalhadores (Du et al., 2017; Torkmahalleh et al., 2017). Da mesma forma, sistemas sobredimensionados podem gerar desconforto térmico por correntes de ar, ruído excessivo e flutuações indesejadas de temperatura, tornando o ambiente igualmente inadequado.

A governança institucional também é afetada. A ausência de critérios técnicos rigorosos e de processos estruturados para o dimensionamento e monitorização dos sistemas HVAC compromete a capacidade de gestão de riscos da organização. Soluções improvisadas ou baseadas em práticas empíricas frequentemente resultam em falhas operacionais, não conformidades com normas técnicas e incremento de custos ocultos, como manutenções corretivas, perda de produtividade e sanções regulatórias (Iwaro & Mwashu, 2010).

Neste panorama, a metodologia de análise de custo do ciclo de vida LCC (*Life Cycle Costing*) desponta como a principal ferramenta para guiar decisões técnicas coerentes e sustentáveis. O LCC permite considerar, de forma abrangente, todos os custos associados à aquisição, operação, manutenção e descarte dos sistemas HVAC ao longo da sua vida útil. Em vez de priorizar exclusivamente o investimento inicial, esta abordagem evidencia os custos acumulados decorrentes de decisões inadequadas de dimensionamento, tornando visíveis os prejuízos associados tanto à sobrecarga como à deficiência de capacidade (Iwaro & Mwashu, 2010).

Para operacionalizar esta abordagem, o uso de ferramentas de simulação computacional e de modelação ambiental precisa é indispensável. Sistemas projetados com base em dados reais de uso, perfil de operação e cargas térmicas específicas tendem a apresentar desempenho superior em termos de eficiência energética, durabilidade e custo total de propriedade. Wang et al. (2017) demonstram que projetos HVAC fundamentados em caracterização precisa do ambiente e validados por simulações apresentam menores taxas de falha e melhor adequação às variações operacionais típicas do setor alimentar.

Paralelamente, o avanço das tecnologias embarcadas permite a adoção de sistemas de monitorização em tempo real para os principais parâmetros operacionais, como temperatura, qualidade do ar, perda de carga e eficiência da ventilação. S. Zhang et al. (2025) destacam que a utilização de sensores inteligentes e automação possibilita ajustes dinâmicos da operação, promovendo economia de energia, prolongamento da vida útil dos equipamentos e aumento

da segurança operacional. Tais práticas estão alinhadas com a expectativa contemporânea de transparência e responsabilidade institucional no uso de recursos críticos.

A substituição de equipamentos obsoletos deve ser avaliada à luz do LCC, considerando não apenas o custo de aquisição, mas também os impactos associados à sua baixa eficiência energética, ausência de controles modernos e incompatibilidade com padrões atuais de desempenho ambiental. Estudos como o de Torkmahalleh et al. (2017) reforçam que o calor e os poluentes gerados nos processos culinários são substanciais e que a sua adequada gestão depende da capacidade de resposta tecnológica dos sistemas instalados.

Com isso, torna-se evidente que o dimensionamento dos sistemas HVAC em cozinhas industriais não é uma decisão meramente técnica, mas uma escolha estratégica que repercute em todas as dimensões das práticas ESG. A integração de critérios técnicos robustos, simulações computacionais, dados operacionais e análise de ciclo de vida permite o desenvolvimento de sistemas otimizados, mais seguros, sustentáveis e economicamente viáveis. Ao alinhar o desempenho térmico e ambiental dos sistemas de ventilação às exigências contemporâneas de governança e responsabilidade social, as organizações do setor alimentar não apenas reduzem os seus custos operacionais e impactos ambientais, mas também fortalecem a sua imagem institucional, asseguram conformidade regulamentar e posicionam-se de forma competitiva no mercado.

Portanto, em vez de encarar o dilema entre sobredimensionar ou subdimensionar como um problema técnico isolado, é necessário compreendê-lo como parte integrante de uma estratégia organizacional mais ampla. Apenas através de uma abordagem sistêmica, que incorpore modelação de precisão, monitorização contínua e análise económica abrangente, será possível projetar, operar e manter sistemas HVAC verdadeiramente alinhados com os princípios ESG e com a excelência operacional no ambiente das cozinhas industriais.

2.5. Modelação computacional aplicada à ventilação

A compreensão e o controlo do escoamento de fluidos, da transferência de calor e do transporte de contaminantes em ambientes industriais têm sido, historicamente, alguns dos grandes desafios da engenharia. Com o aumento das exigências em setores como a climatização, o processamento térmico e a segurança ambiental, tornou-se imprescindível dispor de métodos capazes de prever, com precisão crescente, o comportamento de sistemas complexos muito antes da sua construção física. É neste contexto que a *Computational Fluid Dynamics* (CFD), ou Dinâmica de Fluidos Computacional, assume um papel central, ao permitir a análise detalhada de processos anteriormente restritos ao campo experimental.

Atualmente, o acesso a ferramentas de simulação numérica está ao alcance de organizações de diferentes dimensões, com uma diversidade notável de plataformas especializadas disponíveis no mercado. Desde soluções *open source*, como o *OpenFOAM*, até suítes comerciais amplamente difundidas, como *ANSYS Fluent*, *STAR-CCM+*, *Simcenter*, *COMSOL Multiphysics*, *FLOW-3D*, entre outras, a escolha do *software* constitui uma etapa estratégica do processo de modelação. No entanto, a integração do CFD na rotina de projeto enfrenta barreiras relevantes.

Entre os principais desafios encontram-se o custo computacional, a curva de aprendizagem associada à modelação avançada, a ausência de normalização normativa e a resistência institucional em investir em tecnologias não obrigatórias (Benchikh Le Hocine et al., 2020; Mudie et al., 2014; Song et al., 2022; Wang et al., 2017). Song et al. (2022) enfatizam que, apesar do potencial da modelação computacional para aumentar a precisão e a previsibilidade dos sistemas de ventilação, a sua adoção massiva continua limitada por fatores económicos, culturais e regulatórios, perpetuando a predominância de práticas empíricas no setor.

O ambiente atual da engenharia é, portanto, marcado por uma convergência inédita entre ciência, tecnologia e inovação, em que as simulações CFD desempenham o duplo papel de laboratório virtual e de ferramenta estratégica para a tomada de decisão. No centro deste movimento está a necessidade de rigor numérico, representatividade física e integração operacional — aspetos que orientam o desenvolvimento dos métodos, a seleção criteriosa dos parâmetros e, sobretudo, a capacidade de transformar resultados computacionais em ganhos tangíveis de desempenho, segurança e sustentabilidade.

2.5.1. Princípios e limitações dos métodos numéricos

O CFD consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das metodologias mais sofisticadas e imprescindíveis para a compreensão e predição dos fenómenos de escoamento de fluidos, transferência de calor e transporte de contaminantes em ambientes de elevada complexidade. Em domínios industriais onde múltiplos processos ocorrem simultaneamente, o CFD permite identificar interações que seriam praticamente inacessíveis por métodos experimentais isolados, viabilizando não só análises precisas, mas também a otimização do projeto e da operação dos sistemas HVAC (Du et al., 2017; Mudie et al., 2014; Torkmahalleh et al., 2017).

O fundamento essencial de uma simulação numérica reside na conversão de um problema físico real, de natureza contínua, numa representação computacional discreta. Para tal, procede-se à discretização do domínio, processo no qual o espaço físico é subdividido em milhares ou milhões de pequenos volumes — os volumes finitos — sobre os quais as equações que regem o comportamento dos fluidos são reescritas em forma algébrica e resolvidas de forma iterativa. O grau de refinamento da malha exerce influência direta sobre a fidelidade da solução: áreas com fortes gradientes de temperatura, velocidade ou concentração exigem malhas mais densas, enquanto regiões de baixa variação podem ser representadas com discretização mais grosseira, otimizando o custo computacional (Ferziger et al., 2020; Versteeg & Malalasekera, 2007).

Neste processo, a escolha do método numérico de interpolação dos termos convectivos — que descrevem o transporte de energia e de espécies — desempenha um papel determinante na qualidade da solução. Os esquemas *upwind* de primeira ordem são frequentemente utilizados pela sua robustez, pois privilegiam a estabilidade numérica ao adotar valores da célula de origem do fluxo; contudo, esta abordagem introduz difusão numérica artificial, suavizando variações abruptas e, por vezes, eliminando detalhes relevantes do fenómeno físico. Por outro lado, os esquemas centrados de segunda ordem aumentam o grau de precisão através da interpolação entre pontos adjacentes, mas podem, em contrapartida, induzir oscilações

erráticas em fluxos predominantemente convectivos. Como alternativa, o método QUICK (*Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics*) surge como uma solução de compromisso, recorrendo a uma interpolação quadrática que inclui não apenas a célula imediatamente anterior ao fluxo, mas também a segunda célula a montante. O resultado é uma maior precisão e menor difusão em campos complexos, sendo particularmente recomendado em regiões próximas das fontes de calor e das zonas de extração em cozinhas industriais (Leonard, 1979; Wang et al., 2017). A literatura destaca ainda a utilização de esquemas híbridos, que alternam automaticamente entre métodos de baixa e alta ordem consoante a região e o regime do escoamento (Ferziger et al., 2020).

O desafio não se limita, no entanto, ao tratamento dos termos convectivos. A correta acoplagem entre os campos de pressão e velocidade é condição indispensável para a conservação da massa e para evitar distorções nos resultados, especialmente em ambientes com elevada complexidade geométrica e múltiplos pontos de entrada e saída de ar (Du et al., 2017). Para isso, recorrem-se a algoritmos amplamente utilizados: o método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), robusto e preferido em simulações estacionárias; o PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), que acelera a convergência e melhora a estabilidade em problemas transitórios; e o PIMPLE, algoritmo híbrido que combina as vantagens dos dois anteriores, permitindo simulações com maiores passos temporais sem sacrificar a precisão — sendo particularmente útil no estudo de processos dinâmicos em cozinhas industriais, onde as cargas térmicas e a emissão de poluentes variam de modo intermitente.

Assim, garantir a confiabilidade de uma simulação numérica vai muito além da seleção da malha ou dos esquemas de solução. Um dos pilares metodológicos para assegurar a validade do CFD está na avaliação quantitativa do erro de discretização. Entre as ferramentas disponíveis, a extrapolação de Richardson destaca-se por permitir estimar qual seria o valor de uma variável de interesse no limite de uma malha infinitamente refinada. O método parte do pressuposto de que a diferença entre as soluções obtidas em duas malhas sucessivas, de razões conhecidas, pode ser utilizada para extrapolar o valor mais próximo do ideal teórico, de acordo com a ordem formal do método numérico:

$$\phi_{ext} = \phi_1 + \frac{\phi_1 - \phi_2}{r^p - 1}, \quad (17)$$

Onde ϕ_1 e ϕ_2 representam as soluções obtidas para as malhas mais fina e mais grosseira, respetivamente, r é a razão entre os tamanhos das malhas e p corresponde à ordem de precisão do método de discretização. Assim, a extrapolação de Richardson fornece uma estimativa do valor real da variável simulada, partindo de resultados práticos e da própria estrutura do erro numérico (Celik et al., 2008; Roache, 2009). Esta abordagem permite, de forma padronizada e quantitativa, relatar o erro de discretização e conferir maior rigor científico às análises numéricas.

Por sua vez, a convergência temporal deve ser assegurada com igual rigor. Em simulações transitórias, o número de *Courant-Friedrichs-Lewy* (Co), definido como:

$$C_o = \frac{u \times \Delta t}{\Delta x}, \quad (18)$$

onde u é a velocidade local, Δt o passo temporal (time step) e Δx o comprimento característico da célula, devendo este valor ser mantido dentro de limites seguros para evitar instabilidades ou a introdução de erros físicos artificiais. Embora métodos avançados permitam trabalhar com $Co > 1$ através de múltiplos corretores internos e externos, é sempre recomendável a validação criteriosa dos resultados para garantir que as soluções obtidas representem de forma fidedigna a física real do sistema.

Outro aspeto cuja relevância tem crescido notavelmente na literatura recente é a modelação da turbulência. Em ambientes industriais de ventilação e extração, as escalas turbulentas sobrepõem-se em múltiplos níveis. Embora a Simulação Numérica Direta (DNS) represente o método mais rigoroso para a resolução das equações de *Navier–Stokes* sem necessidade de modelação, o seu custo computacional é proibitivo para aplicações práticas. Por este motivo, prevalece o uso dos modelos RANS (*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*), como os modelos $k - \varepsilon$, $k - \omega$ e $k - \omega SST$, que realizam o fecho estatístico das equações de quantidade de movimento e energia, conciliando custo computacional e fidelidade. Para aplicações que exigem maior precisão, especialmente na caracterização de zonas de recirculação ou de separação de escoamento, os modelos LES (*Large Eddy Simulation*) e DES (*Detached Eddy Simulation*) são preferidos, ainda que à custa de malhas extraordinariamente refinadas (Menter, 1994; Wilcox, 2010).

A modelação da emissão e dispersão de poluentes constitui, por sua vez, um dos campos mais desafiantes e menos padronizados da CFD aplicada a ambientes de cocção. Como detalhado por Torkmahalleh et al. (2017), Du et al. (2017) e Wang et al. (2017), a taxa de geração de partículas finas, compostos orgânicos voláteis (VOCs) e vapor de água depende de variáveis como o tipo de alimento, o método de cocção, a temperatura superficial e o uso de óleos, variando substancialmente ao longo do expediente e entre estabelecimentos. No entanto, a maior parte das simulações ainda recorre a fontes fixas ou médias temporais, simplificando em excesso a dinâmica real dos processos de emissão e comprometendo a avaliação das estratégias de ventilação controlada por procura (DCKV).

A equação de transporte de espécies genérica, fundamental para a modelação da dispersão, pode ser escrita, em termos gerais, é definida pela Equação (19),

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u\phi) = \nabla \cdot (D\nabla\phi) + S_\phi, \quad (19)$$

em que ϕ representa a concentração da espécie, D o coeficiente de difusão e S_ϕ o termo fonte, que pode ser parametrizado a partir de medições reais ou de funções empíricas. A precisão da simulação está, portanto, intimamente ligada à qualidade dos dados de entrada e à capacidade do modelo de incorporar a variabilidade operacional observada em campo (Du et al., 2017).

Acrescenta-se a estes desafios a modelação conjugada da transferência de calor, radiação e evaporação. Modelos clássicos de radiação, como o P1, o DOM (*Discrete Ordinates Method*) ou o *View Factor*, exigem informações precisas de emissividade e absorção para cada superfície e equipamento, parâmetros que raramente estão disponíveis ou padronizados em cozinhas industriais. Quando negligenciados ou mal estimados, estes fatores podem introduzir erros significativos na previsão do gradiente térmico e, por consequência, no dimensionamento dos exaustores e nas estratégias de compensação de ar.

O rigor metodológico não estaria completo sem a validação experimental das simulações. A literatura revela, contudo, que poucos estudos apresentam validação robusta, isto é, comparação sistemática dos resultados numéricos com medições de campo abrangentes, como temperaturas, velocidades e concentrações ao longo de todo o domínio simulado (Celik et al., 2008). Esta ausência de validação compromete a confiança nos resultados para uso regulatório ou em processos de tomada de decisão crítica, sobretudo em projetos de *retrofit* ou de adequação normativa.

Adicionalmente, existem limitações operacionais e institucionais que ainda restringem a adoção massiva da CFD no contexto das cozinhas profissionais. O custo computacional associado a simulações de alta fidelidade e a exigência de conhecimento especializado para a modelação e interpretação dos resultados compõem um quadro de desafios ainda não plenamente superados. Além disso, a normalização vigente para ventilação em cozinhas, embora reconheça a importância do dimensionamento técnico, ainda não incorpora a CFD como ferramenta mandatória ou sistematizada para validação ou otimização de projetos, mantendo a metodologia no campo da consultoria avançada e não no dos procedimentos normativos obrigatórios (Mudie et al., 2014; S. Zhang et al., 2025).

Apesar destas limitações, é inegável o potencial transformador da CFD quando empregue de forma estratégica e integrada. Os avanços recentes na integração entre simulações numéricas, sensores IoT (*Internet of Things*) e gémeos digitais abrem a possibilidade de construir modelos dinâmicos, capazes de ajustar parâmetros e prever falhas ou ineficiências em tempo real. Em projetos de sistemas HVAC para cozinhas industriais, esta abordagem viabiliza não apenas a otimização energética, mas também a antecipação de cenários críticos, a avaliação de estratégias de ventilação sob procura e a fundamentação técnica para investimentos em *retrofit* ou automação, alinhando-se com as exigências contemporâneas de sustentabilidade e governança (S. Zhang et al., 2024).

2.5.2. Desafios e oportunidades na integração da CFD

A incorporação da CFD na fase de projeto de sistemas de ventilação configura, atualmente, uma das fronteiras mais promissoras da engenharia aplicada. Ao mesmo tempo, trata-se de um campo onde se entrelaçam limitações técnicas, institucionais e operacionais que desafiam a sua

adoção plena. Embora a literatura seja unânime em reconhecer que esta ferramenta proporciona um nível de detalhe e previsibilidade sem precedentes, a sua implementação efetiva nas rotinas de projeto enfrenta obstáculos que ultrapassam tanto a competência técnica dos modeladores como a sofisticação dos métodos numéricos utilizados. Estes desafios abrangem desde questões tecnológicas até barreiras regulatórias e dinâmicas organizacionais, exigindo, portanto, uma abordagem verdadeiramente integrada para a evolução do setor (Wang et al., 2017; S. Zhang et al., 2024).

Entre os pontos críticos para essa integração destaca-se a dificuldade de incorporar dados operacionais reais e dinâmicos no processo de simulação. O planejamento de sistemas de ventilação exige atenção constante às variações de carga térmica, ao uso intermitente e diversificado dos equipamentos e à multiplicidade de processos em operação. Muitas vezes, as tentativas de parametrizar o ambiente baseando-se apenas em médias estatísticas ou valores tabelados resultam numa representação insuficiente da realidade operacional. Estudos como os de Torkmahalleh et al. (2017) e Du et al. (2017) demonstram que, na prática, grande parte das simulações ainda recorre a cenários médios, o que pode limitar substancialmente a precisão dos modelos. Esse desalinhamento entre a simulação computacional e o dinamismo operacional real não apenas reduz o potencial preditivo da CFD, como também compromete o seu valor como ferramenta estratégica para decisões de projeto.

Além disso, observa-se que, mesmo quando as simulações atingem um elevado grau de detalhe, os seus resultados permanecem, em grande medida, restritos a relatórios técnicos, orientações genéricas ou recomendações pontuais. Raramente a informação gerada é incorporada de forma orgânica em protocolos operacionais, sistemas de monitorização em tempo real ou rotinas automatizadas de ajuste da ventilação (Wang et al., 2017; S. Zhang et al., 2024). Esta limitação resulta não apenas da complexidade inerente à integração entre os universos virtual e real, mas também da fragmentação das cadeias de comunicação e decisão entre engenheiros de projeto, operadores, gestores e outros intervenientes no processo.

Contudo, o cenário tecnológico atual aponta para uma mudança de paradigma. A convergência entre CFD e tecnologias digitais abre caminho para um novo modelo de integração. Conforme demonstrado por S. Zhang et al. (2024), já é tecnicamente possível alimentar os modelos computacionais com dados em tempo real provenientes do ambiente físico, permitindo atualizar continuamente as simulações, ajustar automaticamente os fluxos de ventilação e implementar sistemas de alerta e resposta rápida a eventos críticos. Isto transforma a CFD de mero recurso consultivo num componente ativo da estratégia de eficiência energética, segurança operacional e tomada de decisão baseada em evidências, em vez de suposições.

Este movimento de transformação institucional e regulatória, longe de constituir um simples ajuste de rotinas, representa uma oportunidade fundamental para consolidar a CFD como pilar estruturante do planejamento sustentável, da excelência operacional e da inovação contínua no projeto de sistemas de ventilação. Ao enfrentar as limitações ainda existentes com soluções integradas e colaborativas, a engenharia posiciona-se para colher benefícios que superam largamente os desafios inerentes à adoção desta tecnologia.

Revisão Bibliográfica

3. Métodos e Aplicação

O presente capítulo descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento desta investigação, estruturada de modo a integrar três eixos complementares: experimental, normativo e numérico. Numa primeira fase, recorreu-se à infraestrutura laboratorial e aos ensaios experimentais concebidos para reproduzir, em ambiente controlado, as condições características de uma cozinha profissional em operação intensiva. A recolha sistemática de dados de temperatura e de caudais de ar forneceu a base empírica necessária para avaliar o comportamento da pluma térmica e estabelecer parâmetros de referência capazes de sustentar a etapa de validação.

Seguidamente, esses resultados foram confrontados com o enquadramento regulamentar previsto na EN 16282, permitindo traduzir as prescrições normativas em cenários comparáveis aos experimentais. Esta etapa normativa não apenas forneceu valores de referência para o dimensionamento dos caudais de extração, como também possibilitou analisar a margem de otimização face às condições reais de emissão de poluentes observadas no laboratório, revelando eventuais discrepâncias entre o prescrito e o efetivamente necessário.

Por fim, a simulação computacional, desenvolvida no *Simcenter FLOEFD*, consolidou-se como a ponte entre os dois primeiros eixos, reproduzindo tanto a geometria experimental como as condições normativas em simulações numéricas capazes de explorar variações adicionais de configuração. Esta abordagem CFD permitiu avaliar a contenção da pluma térmica e a eficiência da extração em diferentes cenários, assegurando consistência através de ensaios de convergência e de sensibilidade, enquanto o pós-processamento forneceu indicadores quantitativos que reforçam a robustez das comparações estabelecidas.

3.1. Infraestrutura experimental

O presente estudo foi realizado numa cozinha-laboratório da sede francesa do grupo *Airvance*, empresa de referência no setor europeu da ventilação e qualidade do ar, com unidades de produção, centros de I&D e presença em mais de uma dezena de países. O laboratório dispõe de infraestrutura dedicada à avaliação de equipamentos em condições representativas de operação em cozinhas industriais, seguindo as diretrizes normativas aplicáveis.

Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizada uma hotte de alta eficiência Mooréa® Pulse HPC Parietal, com dimensões de 1500 × 1300 × 400 mm, construída em aço inoxidável AISI 304 18/10 e equipada com três filtros FR CHOC (France Air, 2025), conforme ilustrado na Figura 13.



Figura 13 - Hotte Mooréa® Pulse HPC (France Air, 2025)

O grande diferencial deste sistema está no caudal de ar insuflado autossuficiente motorizado, que integra extração central, insuflação por cortinas de ar (injetores frontais a 40° e laterais verticais) e compensação térmica. Como mostra a Figura 14, este princípio de funcionamento permite o cantonamento eficiente dos poluentes e possibilita a redução de até 30% no caudal de extração em comparação com hottes convencionais.

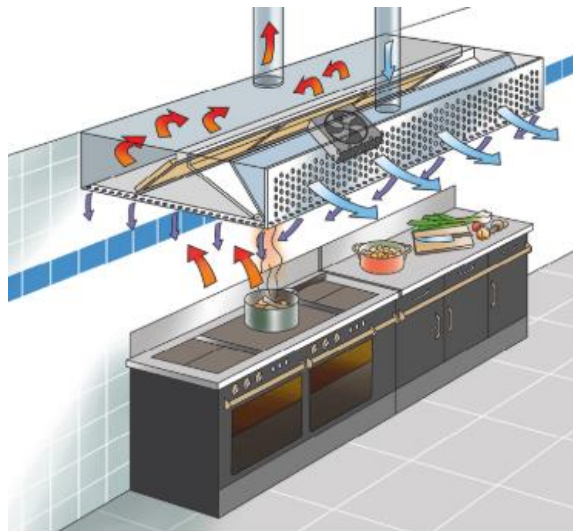


Figura 14 - Esquema do funcionamento integrado de extração e insuflação (France Air, 2025)

O difusor microperfurado no painel frontal assegura a insuflação, a baixa velocidade (entre 0,25 e 0,5 m/s), de ar tratado a +18 °C. O perfil validado em laboratório (Figura 15) mantém velocidades inferiores a 0,2 m/s na zona de trabalho, garantindo conforto térmico e eficiência energética.

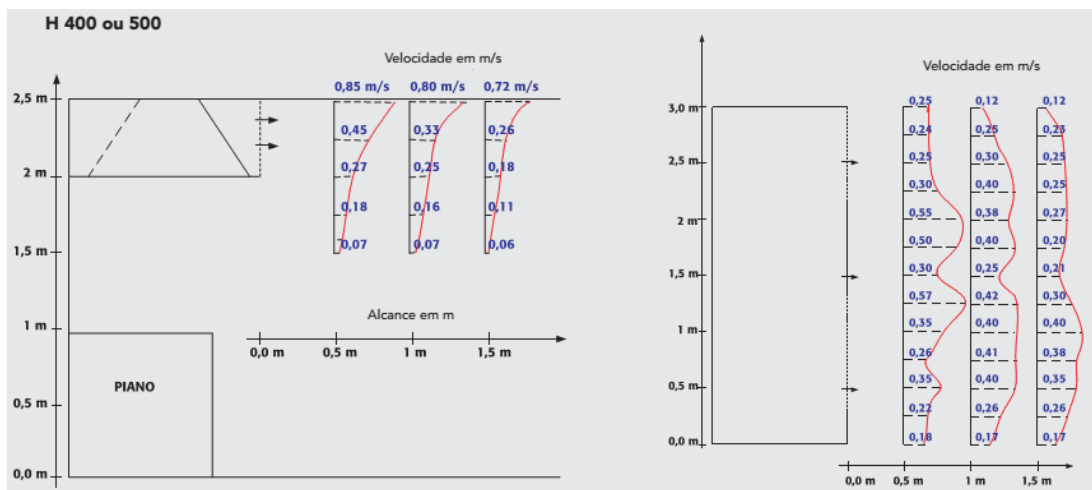


Figura 15 - Perfis de velocidade do ar insuflado pelo sistema de compensação (France Air, 2025)

A geração de calor e vapor no ensaio foi assegurada por um grelhador horizontal GHPI 2/600, desenvolvido pela GRESILVA, fabricante internacionalmente reconhecida pela qualidade e robustez dos seus equipamentos de confeção profissional (GRESILVA, 2025). Com dimensões de 750 mm de comprimento, 768 mm de profundidade e 850 mm de altura, área útil de grelhagem de 586 × 618 mm e potência térmica nominal de 24,2 kW, o equipamento opera a gás natural e com alimentação elétrica a 230 V.



Figura 16 - Grelhador horizontal GHPI 2/600 (GRESILVA, 2025)

No *layout* experimental, a hotte Mooréa® Pulse HPC foi instalada a 2 metros de altura em relação ao piso, posicionada no canto do laboratório, encostada simultaneamente às paredes de fundo e lateral direita, conforme ilustrado na Figura 17. O grelhador GHPI 2/600 foi centralizado imediatamente sob a hotte, assegurando máxima eficiência na captura de

Métodos e Aplicação

poluentes e na contenção dos vapores gerados durante o ensaio. A configuração adotada reproduz condições típicas de cozinhas industriais, em que a proximidade entre hotte e equipamento de confeitaria favorece o desempenho dos sistemas de exaustão. Para simular de modo realista as emissões térmicas e de humidade características de processos culinários intensivos, a produção de vapor foi promovida pela aplicação contínua de água sobre a superfície aquecida do grelhador, visível na imagem pela mangueira posicionada no equipamento.



Figura 17 - Arranjo experimental. (Autor, 2019)

O ensaio experimental foi realizado a 22 de agosto de 2019, com duração total de 25 minutos, mantendo-se constantes os caudais de extração, compensação e cortinas, bem como a potência térmica do grelhador. Os dados foram registados em intervalos regulares de dois segundos, assegurando resolução temporal adequada para a análise dinâmica do sistema. A instrumentação utilizada consistiu em sensores estrategicamente distribuídos para a

monitorização da temperatura, pressão, caudal e humidade relativa. Na Tabela 5 são indicadas as coordenadas tridimensionais (x, y, z) que definem a malha de instrumentação:

Tabela 5 - Distribuição espacial dos sensores de monitoramento. (Autor, 2025)

	Sensor	Unidade	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
v1.0	Temp. frente esquerda	°C	1300	2030	1470
v1.1	Temp. frente centro	°C	1300	2030	785
v1.2	Temp. flasque frontal	°C	1200	2030	1570
v1.3	Temp. flasque centro	°C	650	2030	1570
v1.4	Temp. flasque traseira	°C	100	2030	1570
v1.5	Temp. flasque frontal a 7cm	°C	1189	2070	785
v1.6	Temp. flasque traseira a 7cm	°C	164	2070	785
v1.7	Temp. complementar	°C	-	-	-
v2.1	Temp. antes do filtro	°C	164	2070	785
v2.2	Humidade antes do filtro	%RH	164	2070	785
v2.3	Temp. insuflamento	°C	-	-	-
v2.4	Humidade de insuflamento	%RH	-	-	-
v2.5	Temp. ambiente	°C	-	-	-
v2.6	Humidade ambiente	%RH	-	-	-
v2.7	ΔP filtro	Pa	164	2070	785
v3.0	Caudal de extração	m ³ /h	-	-	-
v3.2	Caudal de insuflamento	m ³ /h	-	-	-
v3.3	Temp. após filtro	°C	-	-	-
v3.4	Humidade após o filtro	%RH	-	-	-
v3.7	Caudal de indução	m ³ /h	-	-	-

Embora não tenham sido fornecidos detalhes essenciais relativos aos sensores utilizados, como modelos, métodos de calibração, tempos de resposta e faixas operacionais, a credibilidade institucional do grupo *Airvance* sustenta a consideração dos dados registados como fiáveis e suficientemente precisos para os objetivos de validação experimental e suporte à modelação computacional subsequente. Importa salientar que, nos casos em que as coordenadas não são apresentadas, os instrumentos estavam instalados no interior dos equipamentos ou posicionados noutras áreas do laboratório.

3.2. Procedimento experimental

O ensaio experimental foi concebido para reproduzir, em ambiente controlado, as condições típicas de operação de uma cozinha industrial equipada com um sistema avançado de ventilação. Seguindo uma sequência cronológica rigorosa, procurou-se garantir a estabilidade dos caudais de extração (1130 m³/h), de compensação (1017 m³/h) e das cortinas (0,33 m³/h) desde o início do experimento, assegurando regime permanente antes da introdução das cargas térmicas e de vapor.

Métodos e Aplicação

Após a estabilização do escoamento de ar, o grelhador foi acionado à potência constante de 24,2 kW, simulando uma operação intensiva. Decorridos cerca de sete minutos, iniciou-se a alimentação contínua de água sobre a superfície aquecida, intensificando a geração de vapor, que permaneceu ativa até ao vigésimo primeiro minuto. O ensaio teve uma duração total de 45 minutos, com o desligamento simultâneo da válvula de água e do grelhador na fase final. Durante todo esse período, as variáveis ambientais (temperatura, humidade relativa, pressão diferencial e caudais) foram monitorizadas de forma contínua, com registos efetuados a cada dois segundos em pontos estratégicos do ambiente e dos equipamentos. O comportamento dinâmico dessas grandezas ao longo do ensaio pode ser observado na Figura 18, que apresenta os dados brutos captados pelos sensores e permite analisar, de forma visual, as respostas do sistema às diferentes fases do procedimento experimental.

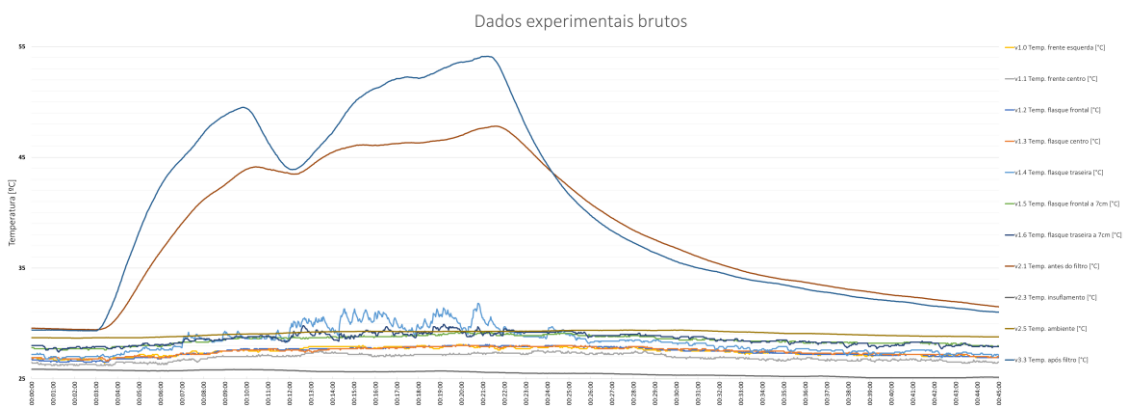


Figura 18 - Dados brutos dos sensores ao longo do experimento. (Autor, 2025)

No contexto experimental, a quantificação do vapor de água removido pelo sistema de exaustão constituiu um desafio central, uma vez que a instrumentação disponível não permitia a medição direta dessa variável. Para contornar essa limitação e obter uma avaliação precisa do desempenho do sistema na remoção de humidade, foi adotada uma abordagem psicrométrica a partir dos dados registados de temperatura e humidade relativa do ar, permitindo a determinação indireta do caudal de vapor presente e extraído pelo sistema (ASHRAE, 2018; Moran, 2020).

O processo analítico baseou-se, em primeiro lugar, no cálculo da pressão de vapor de saturação, parâmetro termodinâmico que representa a máxima pressão de vapor que pode coexistir com a fase líquida a uma dada temperatura. Para cada ponto monitorizado, a pressão de saturação (P_{sat}) foi determinada com base na relação empírica consagrada na literatura conforme Equação (20),

$$P_{sat} = 610,78 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T}{237,3 + T}\right)}, \quad (20)$$

em que T corresponde à temperatura local, expressa em graus Celsius (Moran, 2020).

De seguida, calculou-se a pressão parcial de vapor, que expressa a fração efetiva de vapor de água no ar, através do produto entre a humidade relativa (percentual) e a pressão de saturação:

$$P_v = \frac{\phi}{100} \times P_{sat} . \quad (21)$$

Posteriormente, para quantificar o conteúdo de vapor de água por unidade de massa de ar seco, informação indispensável à análise psicrométrica, foi calculada a razão de mistura, que relaciona a pressão parcial de vapor com a pressão atmosférica local:

$$\omega = 0,622 \times \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} . \quad (22)$$

O domínio destas propriedades psicrométricas permitiu determinar o caudal mássico de ar extraído, estimado a partir do caudal volumétrico de extração \dot{Q}_{ext} e da densidade do ar, convencionalmente adotada como $1,225 \text{ kg/m}^3$ para condições ambientes normais (ASHRAE, 2021), conforme Equação (23),

$$\dot{m}_{ar} = \dot{Q}_{ext} \times \rho . \quad (23)$$

Finalmente, a taxa de remoção de vapor de água foi obtida pela diferença entre as razões de mistura antes e após o filtro, multiplicada pelo caudal mássico de ar:

$$\dot{m}_{vapor} = \dot{m}_{ar} \times (\omega_{antes} - \omega_{após}) \quad (24)$$

A Figura 19 apresenta a curva temporal do caudal de vapor de água ao longo do experimento, evidenciando os períodos de estabilização, o efeito imediato da aplicação de água sobre o grelhador e as variações associadas às diferentes fases operacionais do ensaio.

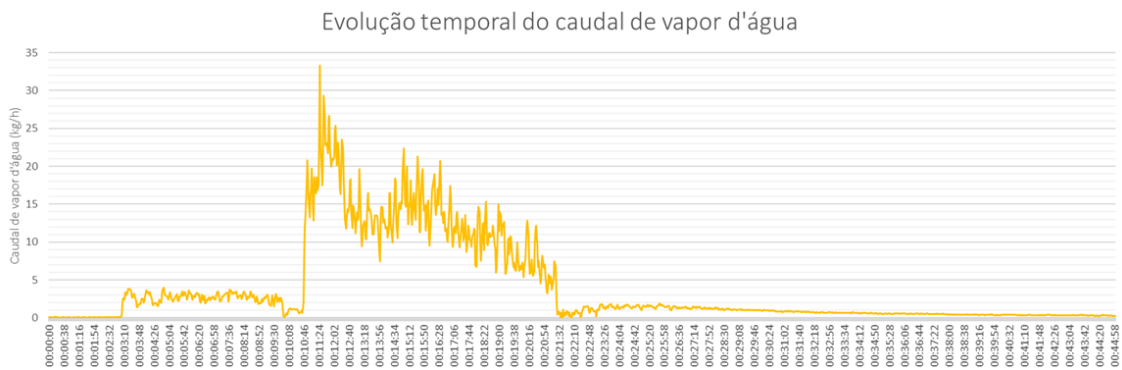


Figura 19 - Evolução temporal do caudal de vapor de água. (Autor, 2025)

3.3. Dimensionamento normativo

O dimensionamento do sistema de extração foi conduzido de acordo com as diretrizes da EN 16282, de modo a definir um cenário de referência normativo para as simulações. As dimensões da hotte foram estabelecidas a partir das medidas do grelhador e dos critérios geométricos previstos na norma, que estipula um ângulo de inclinação de 15° em relação à vertical para a projeção das bordas de captação. Aplicando a relação trigonométrica entre a altura livre e o cateto oposto gerado por essa inclinação, determinou-se a projeção lateral necessária para garantir a cobertura integral da área ativa. Esse procedimento resultou numa configuração final de 1366 × 1076 × 400 mm. A Figura 20 ilustra o cenário adotado, evidenciando o arranjo adossado à parede de fundo e à parede lateral esquerda, com o grelhador centralizado sob a zona de captação.

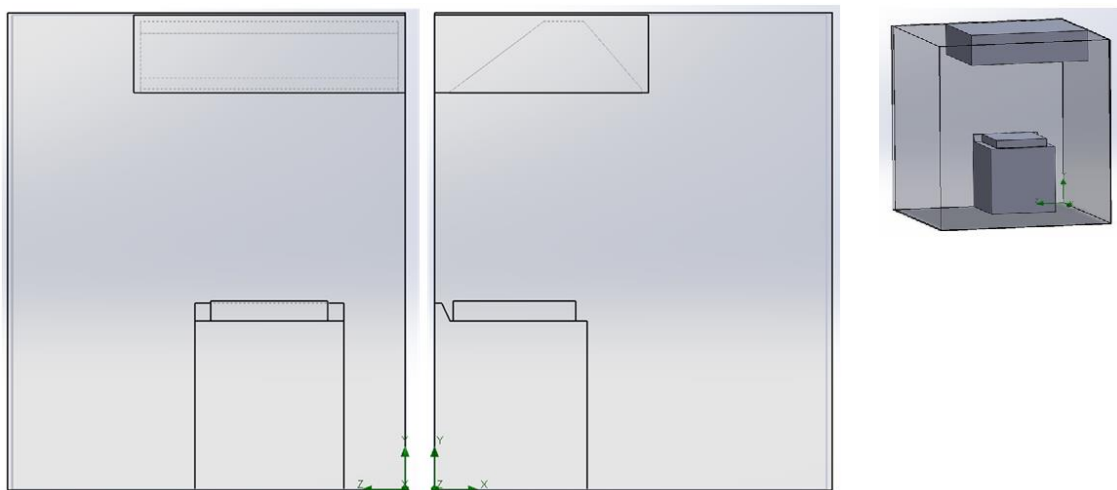


Figura 20 - Layout do domínio. Autor (FLOEFD 2412, 2025)

A definição da geometria permitiu calcular os caudais de extração segundo dois métodos normativos. No dimensionamento preliminar, aplicou-se a Equação (2), baseada na velocidade de captura do ar, considerando a altura entre a borda inferior da hotte e o topo do grelhador,

bem como o perímetro aberto. Com a adoção de uma velocidade de 0,3 m/s (recomendada para cargas pesadas), obteve-se um caudal de 3033 m³/h.

No dimensionamento detalhado, aplicou-se a metodologia descrita na EN 16282-1, que integra a carga térmica sensível transmitida por convecção (Equação 3) ao cálculo do fluxo induzido termicamente (Equação 4), ajustado pelo fator de captura (Equação 6). Considerando uma carga térmica de 24,2 kW e os parâmetros geométricos específicos do conjunto, o caudal total resultante foi de 2844 m³/h.

A comparação entre as duas abordagens evidencia que o método preliminar tende a fornecer estimativas mais conservadoras, enquanto o método detalhado incorpora variáveis térmicas e geométricas específicas, resultando em valores mais ajustados à realidade operacional. Por alinhamento com a norma e visando representar fielmente o desempenho esperado, adotou-se como cenário de referência o valor obtido pelo método detalhado, que servirá de base para as análises comparativas desta investigação.

3.4. Modelação computacional

A modelação computacional constitui uma etapa central desta investigação, pois permite reproduzir numericamente os fenómenos físicos observados no laboratório, assegurando que hipóteses e condições de contorno possam ser testadas em ambiente controlado. No contexto da ventilação, a utilização da CFD revela-se particularmente relevante devido à complexidade dos escoamentos internos, caracterizados pela flutuabilidade, recirculações e pela interação entre plumas térmicas e sistemas de captação.

Este capítulo destina-se a apresentar a estrutura adotada para a simulação, evidenciando de que forma a formulação numérica foi concebida para reproduzir as condições experimentais e sustentar a comparação entre diferentes cenários. Ao longo da exposição, a ênfase recai sobre a coerência entre modelo físico e modelo numérico, garantindo que a simulação não se limite a uma aproximação matemática, mas se afirme como um recurso metodológico plenamente integrado na investigação experimental.

3.4.1. Arquitetura e fundamentos numéricos

O desenvolvimento numérico desta investigação teve início com a implementação do modelo no *OpenFOAM v2406*, software de código aberto amplamente utilizado em simulações de escoamentos internos. Esta escolha inicial foi fundamentada na flexibilidade oferecida para a formulação das equações de conservação e na possibilidade de introduzir variáveis adicionais, como a fração mássica de vapor de água (Y_{H_2O}) de forma explícita e controlada. A geometria experimental foi reproduzida em formato STL, sendo o domínio computacional construído por meio da combinação entre *blockMesh* (malha base) e *snappyHexMesh* (refinamento localizado). Esta configuração possibilitou a discretização do domínio com controlo sobre o refinamento em regiões críticas, em especial nas cortinas de insuflação.

A formulação física baseou-se numa estratégia sequencial de resolução, delineada para combinar a estabilidade numérica de modelos simplificados com a capacidade de representação detalhada de abordagens mais completas. O *buoyantBoussinesqPimpleFoam* foi utilizado inicialmente, uma vez que a sua formulação *Boussinesq* lineariza a dependência da densidade em torno de uma temperatura de referência, reduzindo a complexidade do problema. Esta simplificação aumentou a robustez numérica e reduziu o custo computacional, tornando-o apropriado para a obtenção do campo de velocidades e para a caracterização da pluma de convecção térmica gerada pela fonte de calor no grelhador. Desta forma, procurou-se estabilizar o escoamento com maior eficiência computacional, ainda que sob a limitação de considerar apenas pequenas variações de densidade.

Na fase seguinte, foi utilizado o *buoyantPimpleFoam*, formulado para resolver de forma compressível e acoplada as variações de densidade associadas aos gradientes térmicos e, adicionalmente, incorporar o transporte passivo do poluente. A adoção desta abordagem em duas etapas foi necessária porque a biblioteca padrão do *OpenFOAM* não oferece um algoritmo único capaz de tratar, simultaneamente, a formulação *Boussinesq* para o campo de velocidades e o transporte de espécies em regime compressível. A alternativa de modificar o código-fonte para desenvolver um solver híbrido foi considerada, mas tal opção exigiria um ciclo adicional de desenvolvimento, validação e verificação que ultrapassaria o horizonte temporal desta dissertação. Em ambas as fases, foi empregue o modelo de turbulência *k- ω SST*, amplamente reconhecido pela sua capacidade de representar recirculações, separações de camada limite e escoamentos internos dominados por flutuabilidade.

Apesar da consistência metodológica, a implementação revelou-se inviável em função de restrições numéricas associadas à discretização do domínio. O reduzido tamanho dos elementos nas regiões críticas induziu instabilidades que faziam o número de *Courant* disparar, exigindo passos de tempo extremamente pequenos para manter a estabilidade do cálculo. Foram testadas metodologias de ajuste automático do *time step*; contudo, a consequência foi o aumento exponencial do tempo de processamento, tornando inviável a execução das simulações. Estimativas indicaram que a análise transiente de 1200 segundos físicos exigiria, em média, vários dias de cálculo para cada cenário, impossibilitando a realização de estudos comparativos dentro do prazo disponível.

A abordagem estacionária chegou a ser considerada como alternativa para contornar as dificuldades computacionais. No entanto, esta opção foi descartada porque o problema em estudo envolve fenómenos intrinsecamente transientes, como a formação e a propagação da pluma térmica, bem como a libertação pulsada de vapor de água no grelhador. A simplificação para regime permanente eliminaria a capacidade de capturar estes efeitos não estacionários, comprometendo a fidelidade física da análise e inviabilizando a comparação direta com os resultados experimentais, obtidos em condições dinâmicas.

Perante estas limitações, tornou-se necessário adotar uma alternativa que assegurasse consistência física, reprodutibilidade e viabilidade operacional. Neste contexto, a etapa numérica desta investigação foi conduzida no *Simcenter FLOEFD 2412*, plataforma desenvolvida pela Siemens Digital Industries Software e concebida para operar de forma totalmente integrada no ambiente *SolidWorks*. A escolha desta ferramenta foi motivada, primordialmente,

pela sua compatibilidade com os fluxos de trabalho já consolidados no grupo *Airvance*, permitindo a continuidade operacional e o aproveitamento de metodologias previamente estruturadas pela equipa de engenharia. Esta compatibilidade reduz barreiras de integração e evita a necessidade de conversões entre diferentes programas, garantindo que a transição entre projeto e simulação decorra de forma contínua e eficiente.

A ferramenta adota uma abordagem de integração direta no ambiente CAD, na qual o domínio computacional é derivado de forma consistente do modelo sólido tridimensional desenvolvido no próprio software de projeto. Esta integração elimina etapas intermédias de exportação e conversão, reduzindo riscos de perda ou distorção geométrica e assegurando que eventuais modificações no desenho possam ser incorporadas ao modelo numérico sem retrabalho de reconstrução. Embora a identificação das superfícies que delimitam o domínio seja automática, a atribuição das condições de contorno físicas é da responsabilidade do utilizador. Esta metodologia não só agiliza a preparação da simulação, como também garante que a geometria utilizada no cálculo seja fiel ao projeto original, permitindo ao solver resolver, de forma acoplada, as equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia, com suporte a efeitos de flutuabilidade e transporte de espécies químicas (Mentor, 2024).

A configuração da simulação tem início pela definição dos parâmetros globais, que estabelecem o enquadramento físico e numérico do problema. Nesta etapa, especifica-se o regime de escoamento (laminar ou turbulento), a condição de compressibilidade, a ativação da gravidade e a inclusão dos modelos físicos relevantes, como radiação térmica e transporte de espécies. Em seguida, são atribuídas as propriedades termofísicas do fluido de trabalho, que podem ser constantes ou funções da temperatura, garantindo a representação adequada da sua variação em função das condições operacionais. Definem-se igualmente os parâmetros de convergência para cada variável resolvida, de modo a assegurar a consistência matemática e física da solução. A inicialização do campo numérico, seja a partir de valores uniformes ou de resultados previamente estabilizados, exerce influência direta sobre a estabilidade e o tempo total de cálculo, especialmente em simulações transientes com gradientes iniciais elevados. Por fim, estabelece-se a estratégia de avanço temporal, que pode operar com passo fixo ou adaptativo, conciliando simultaneamente os requisitos de estabilidade numérica e a resolução adequada das escalas características dos fenómenos modelados, garantindo a captura de eventos de rápida evolução, como pulsos térmicos ou emissões instantâneas de poluentes.

A discretização espacial no *Simcenter FLOEFD* baseia-se numa malha cartesiana regular, composta por células hexaédricas ortogonais aos eixos coordenados, sobre a qual é aplicado o método de fronteira imersa com tratamento de células cortadas (*cut-cell*). Neste método, as superfícies sólidas provenientes diretamente do modelo CAD intersectam a malha base, originando volumes parciais cujas propriedades e fluxos são ajustados por interpolação de segunda ordem, preservando o balanço local de massa, quantidade de movimento e energia. A aplicação das condições de contorno ocorre exatamente na posição física da interface sólido-fluido, mesmo quando esta não coincide com as faces da malha, assegurando coerência física na solução. A Figura 21 apresenta um exemplo da malha computacional próxima à interface sólido-fluido, evidenciando como a técnica *cut-cell* permite representar com precisão a geometria sem distorções significativas na malha.

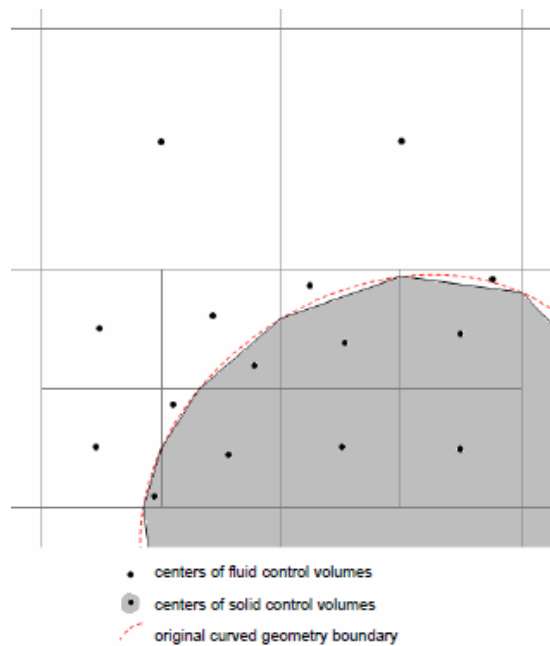


Figura 21 - Malha computacional próxima à interface sólido-fluido (Mentor, 2024)

A estrutura resultante combina células regulares, totalmente preenchidas por um único meio (fluido ou sólido), células cortadas, nas quais a interface atravessa o volume gerando subvolumes parciais, e células refinadas, obtidas por subdivisão localizada para capturar detalhes geométricos ou gradientes elevados de variáveis. Estes tipos são ilustrados na Figura 22, que evidencia a preservação da ortogonalidade e a transição suave entre diferentes resoluções.

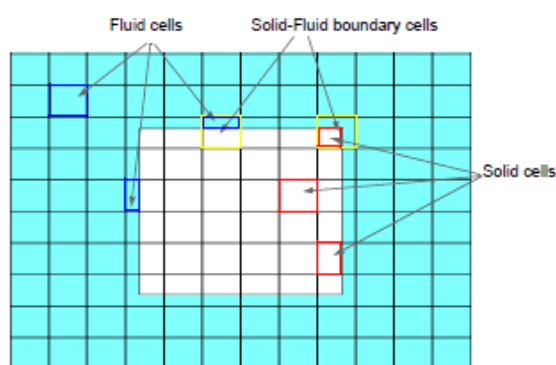


Figura 22 - Tipos de malha computacional (Mentor, 2024)

O refinamento é totalmente definido na etapa de pré-processamento e pode ser global, aplicando subdivisão uniforme a toda a malha, ou localizado, restrito a regiões críticas como canais estreitos, bordas de superfícies ou áreas de elevado gradiente de velocidade, temperatura ou fração mássica de espécies. Os parâmetros L_{cur} (refinamento longitudinal) e

C_{cur} (refinamento angular) controlam a resolução em direções específicas, conforme exemplificado na sequência da figura 23:

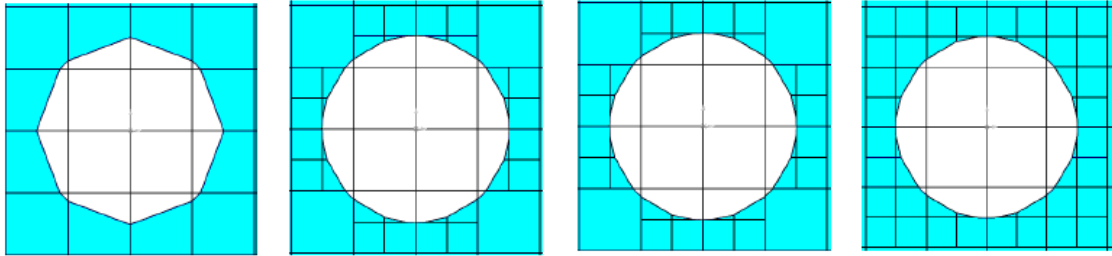


Figura 23 - Níveis de refinamento: (a) básica; (b) axial nível 1; (c) axial nível 2; (d) angular (Mentor, 2024)

Esse sistema hierárquico equilibra precisão e custo computacional, concentrando resolução onde esta mais impacta a solução, mantendo previsibilidade no tempo de cálculo. Embora a ferramenta não utilize refinamento adaptativo dinâmico durante a simulação, a configuração estática previamente definida é suficiente para representar com alta fidelidade domínios de complexidade moderada, como os encontrados em estudos de ventilação e transferência de calor conjugada em cozinhas industriais.

Uma vez concluída a geração da malha, o FLOEFD aplica os esquemas de discretização espacial e temporal que convertem as equações diferenciais parciais do escoamento e da transferência de calor em sistemas algébricos resolúveis numericamente. A formulação espacial segue o método dos volumes de controlo, integrando as equações de conservação sobre cada célula e convertendo derivadas espaciais em fluxos nas faces. Para os termos difusivos, emprega-se um esquema central de segunda ordem, que preserva a simetria da solução e minimiza a difusão numérica. Já os termos convectivos são tratados com um esquema híbrido centrado-*upwind* de segunda ordem, capaz de equilibrar estabilidade e fidelidade física, evitando oscilações não físicas em regiões de gradiente acentuado. Em problemas transientes, o avanço no tempo é realizado por um esquema implícito de primeira ordem, cujo carácter incondicionalmente estável permite utilizar passos de tempo mais amplos sem comprometer a convergência. Na forma discretizada genérica da equação de transporte advectivo-difusiva para uma variável escalar ϕ , é expressa pela Equação (25),

$$a_P \phi_P = \sum_n a_n \phi_n + b' , \quad (25)$$

em que ϕ_P é o valor médio da variável genérica transportada ϕ , e o coeficiente a_P resulta da soma das contribuições difusivas, convectivas e temporais associadas à célula P ; a_n representa as interações com as células vizinhas; e b' engloba os termos-fonte. Esta estrutura garante que a transição da geometria contínua para o domínio discreto preserve a coerência física e forneça

a base numérica para a implementação das equações de conservação apresentadas na sequência.

A solução é obtida através de um método numérico baseado na formulação integral das equações de conservação, resolvidas de forma acoplada para a massa, a quantidade de movimento, a energia e, opcionalmente, o transporte de espécies. Esta abordagem permite representar, com coerência física, escoamentos internos ou externos, em regime estacionário ou transiente, abrangendo desde condições incompressíveis até escoamentos compressíveis com efeitos térmicos relevantes.

Na sua forma conservativa, a equação da continuidade expressa o princípio da conservação da massa dentro de um volume de controlo, como definido na Equação (26),

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m, \quad (26)$$

em que ρ é a densidade do fluido e \vec{u} o vetor velocidade e S_m representa termos fonte de massa, como injeção ou remoção de espécies.

A equação da quantidade de movimento representa a aplicação da segunda lei de Newton a um volume de controlo, incorporando os efeitos das forças de pressão, das tensões viscosas e de forças externas, sendo expressa pela Equação (27),

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} + \vec{S}_u, \quad (27)$$

onde p é a pressão, τ é o tensor de tensões viscosas, \vec{g} é a aceleração gravitacional e \vec{S}_u representa as contribuições de forças adicionais distintas da gravitacional.

A equação da energia é escrita de forma a considerar tanto a contribuição da energia interna como os mecanismos de transporte térmico, podendo ser formulada pela Equação (28),

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h, \quad (28)$$

em que h é a entalpia específica, k é a condutividade térmica e S_h inclui fontes adicionais de energia, como geração térmica volumétrica ou absorção.

A modelação térmica incorpora de forma integrada condução, convecção e radiação. A condução térmica segue a Lei de Fourier, que estabelece a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura, conforme Equação (29),

$$\vec{q} = -k\nabla T , \quad (29)$$

em que \vec{q} é o vetor densidade de fluxo de calor [W/m^2], k é a condutividade térmica e T é o campo de temperatura.

A convecção é modelada por meio da formulação advectivo-difusiva para a energia, que também é aplicável a variáveis escalares como concentrações de espécies:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi , \quad (30)$$

onde ϕ representa a variável transportada, Γ_ϕ é o coeficiente de difusão e S_ϕ representa termos fonte relacionados ao transporte da grandeza considerada.

A radiação térmica pode ser simulada por dois métodos principais: o *Discrete Ordinates Method* (DOM), que resolve a equação de transporte radiativo para um conjunto discreto de direções, e o método de radiosidade para superfícies difusas, que calcula o balanço radiativo entre superfícies acopladas termicamente.

O *software* adota exclusivamente o modelo *RNG $k - \varepsilon$ (Renormalization Group)* para o fechamento das equações de *Navier–Stokes* na abordagem RANS, sendo particularmente eficaz na modelagem de escoamentos internos com recirculações, separações de camada limite e estratificação térmica. Em comparação ao modelo $k - \varepsilon$ padrão, a formulação RNG inclui termos adicionais que refinam a previsão de jatos livres e plumas térmicas, ampliando a robustez numérica (Yakhot & Orszag, 1986). Essa escolha não decorre apenas de critérios físicos, mas também da arquitetura da ferramenta, que limita o usuário a essa formulação para simulações RANS, direcionando o foco para casos em que o comportamento turbulento é dominado por zonas de recirculação atrás de obstáculos, gradientes térmicos acentuados e ascensão de plumas (Mentor, 2024).

O modelo é descrito pelo sistema de equações de transporte para a energia cinética turbulenta k e para a taxa de dissipação ε :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho\varepsilon , \quad (31)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} , \quad (32)$$

onde P_k é o termo de produção de energia cinética turbulenta, μ_t a viscosidade turbulenta e σ_k e σ_ε coeficientes empíricos.

A avaliação de convergência é realizada a partir de resíduos normalizados. Inicialmente, o cálculo do resíduo é baseado na norma L_2 das diferenças entre os valores obtidos em iterações consecutivas. Para cada passo de tempo, esses resíduos são normalizados pelo valor inicial da primeira iteração, permitindo comparações consistentes entre variáveis de diferentes ordens de grandeza. Considera-se que a convergência foi atingida quando todos os resíduos das equações resolvidas permanecem abaixo de um limiar pré-definido, tipicamente entre 10^{-4} e 10^{-6} , e quando as variáveis monitoradas apresentam variação inferior a 0,1% ao longo de um número mínimo de iterações consecutivas. Esse critério combinado garante que a solução numérica esteja não apenas matematicamente estabilizada, mas também fisicamente coerente antes de avançar no tempo ou encerrar o cálculo (Mentor, 2024).

O pós-processamento é totalmente integrado ao ambiente CAD, permitindo a visualização direta dos campos tridimensionais de velocidade, pressão, temperatura e concentração de espécies sobre a própria geometria do projeto. A ferramenta oferece ainda extração de perfis, cortes arbitrários, análises volumétricas e exportação de dados para avaliação quantitativa. Essa integração proporciona rapidez na interpretação e na comunicação dos resultados, eliminando a necessidade de conversões de formato ou *softwares* intermediários. No entanto, a abordagem cartesiana associada ao método de fronteira imersa, embora robusta e eficiente para domínios de complexidade moderada, apresenta restrições no refinamento localizado e na personalização avançada de modelos físicos. Em comparação, códigos abertos como o *OpenFOAM* permitem maior controle sobre malha e modelagem, além de integração com pós-processadores especializados como *ParaView* ou *Tecplot*, que oferecem recursos adicionais de análise exploratória e visualização científica.

3.4.2. Estudo de convergência e sensibilidade

O estudo de convergência e sensibilidade constitui uma etapa essencial para assegurar que os resultados numéricos obtidos nas simulações sejam representativos do fenômeno físico, minimizando a influência de fatores puramente numéricos, como o tamanho da malha ou o passo temporal. Conforme descrito no manual técnico do *Simcenter FLOEFD* (Mentor, 2024), a convergência da solução ocorre quando, após a realização de um conjunto sistemático de refinamentos da malha ou reduções do passo temporal, as diferenças relativas no parâmetro de interesse entre dois níveis consecutivos de discretização permanecem consistentemente abaixo do limiar estabelecido, indicando que o erro de discretização deixou de exercer influência significativa sobre a solução numérica. Assim, foram conduzidos dois ensaios sequenciais: convergência espacial, avaliando diferentes resoluções de malha, e convergência temporal, investigando o impacto do passo de tempo sobre a estabilidade e precisão da solução.

O parâmetro de interesse escolhido foi a fração mássica média de vapor de água (Y_{H_2O}) num plano horizontal situado a 2 m de altura, coincidente com a entrada da hotte (Figura 24). Esta escolha baseou-se na relevância direta para o objetivo da investigação e por integrar efeitos de

convecção e difusão numa única variável. A avaliação da convergência considerou o erro relativo calculado pela Equação (33),

$$E_{rel}(\%) = \frac{|\phi_n - \phi_{n-1}|}{\phi_{n-1}} \times 100, \quad (33)$$

onde ϕ_n e ϕ_{n-1} correspondem, respectivamente, aos resultados obtidos para a malha ou passo temporal atual e para o imediatamente mais grosseiro. O critério de convergência foi estabelecido em 5%, valor amplamente adotado como referência para convergência prática em estudos numéricos de engenharia Roache (2009) e Celik et al. (2008).

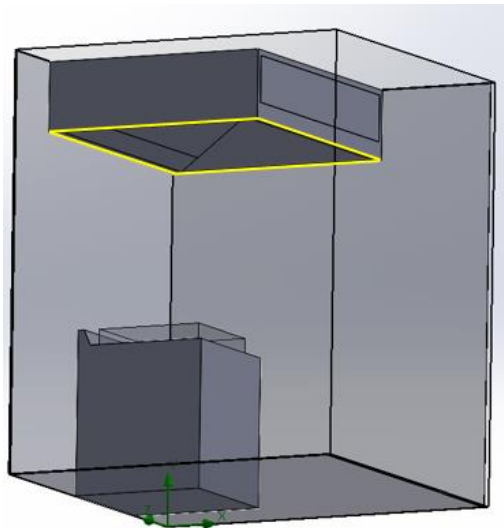


Figura 24 - Plano horizontal a 2 m de altura. Autor (FLOEFD 2412, 2025)

Para isolar o efeito da discretização, todos os restantes parâmetros da simulação foram mantidos constantes. O domínio foi configurado como escoamento interno, com gravidade ativada, ar e vapor de água como gases ideais, modelo de turbulência *RNG k - ε*, paredes isotérmicas e fontes de calor e massa conforme o dimensionamento experimental. As velocidades de compensação, extração e cortinas foram definidas como constantes, tal como as propriedades termofísicas e o campo inicial. Esta padronização assegurou que as diferenças nos resultados fossem exclusivamente atribuídas à resolução espacial ou temporal.

A convergência espacial foi avaliada variando-se o elemento base da malha cartesiana entre 80 e 20 mm, mantendo refinamento local de ordem 1 no fluido e 2 nas interfaces fluido-sólido. A tabela 6 apresenta os valores médios de Y_{H_2O} e os respetivos erros relativos. Observa-se que, para malhas mais grosseiras, as variações são elevadas devido à sub-representação das zonas de maior gradiente, enquanto a partir de 30 mm as diferenças caem para 1,12%, bem abaixo do limite de 5%. A redução adicional para 20 mm não gerou melhoria consistente, apresentando

erro de 6,55% em relação à anterior, comportamento atribuído à ativação de diferentes técnicas numéricas internas do FLOEFD, como destacado no respectivo manual técnico.

Tabela 6 - Erro na convergência da malha espacial. (Autor, 2025)

Elemento base (mm)	Nº de elementos	Y_{H_2O} médio	Erro relativo (%)
80	139.816	0,00198	-
50	390.477	0,00189	4,76
40	654.754	0,00181	4,42
30	1.249.719	0,00179	1,12
20	3.023.713	0,00168	6,55

A figura 25 apresenta a curva de convergência, evidenciando a aproximação da solução assintótica a partir da malha de 30 mm.

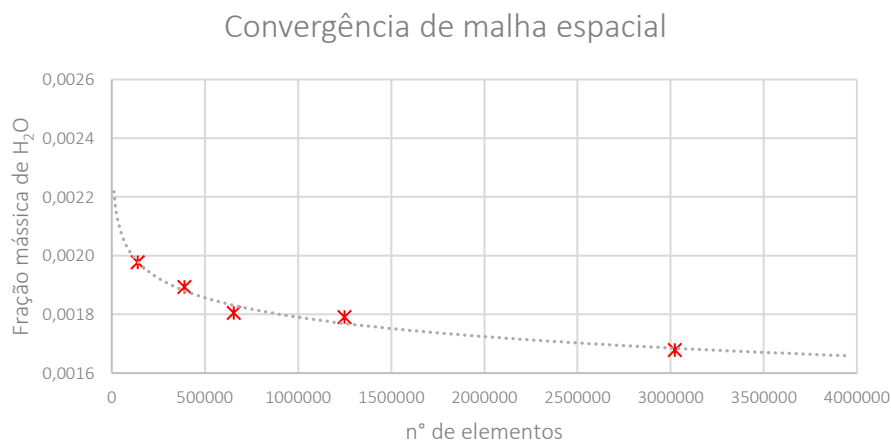


Figura 25 - Curva de convergência numérica em função do refinamento de malha. (Autor, 2025)

O teste temporal foi conduzido fixando-se a malha de 30 mm e variando o passo de tempo entre 1,00 s e 0,10 s. A tabela 7 mostra que, entre 0,25 s e 0,10 s, a diferença foi de apenas 3,93%, indicando que passos menores não oferecem ganho significativo frente ao custo computacional. Já passos maiores (0,50 s e 1,00 s) apresentaram erros mais expressivos, demonstrando perda de precisão na resolução das escalas de tempo relevantes.

Tabela 7 - Erro na convergência da malha temporal. (Autor, 2025)

<i>Time step (s)</i>	Y_{H_2O} médio	Erro relativo (%)
1,00	0,00179	-
0,50	0,00193	7,82
0,25	0,00229	18,65
0,10	0,00238	3,93

A figura 26 ilustra a estabilização dos resultados a partir de 0,25 s.

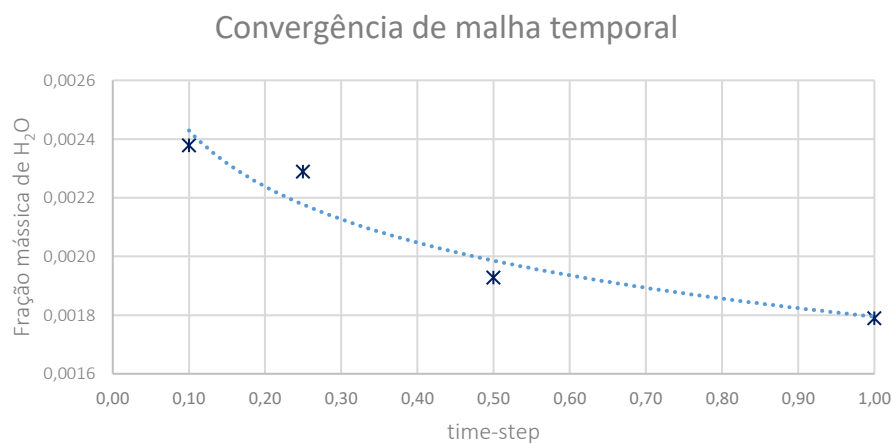


Figura 26 - Curva de estabilização temporal. (Autor, 2025)

Com base nos resultados obtidos, definiu-se, para todos os cenários desta investigação, a utilização da malha com elemento base de 30 mm, associada a refinamentos locais de grau 1 nas regiões fluidas e de grau 2 nas interfaces fluido-sólido, abrangendo áreas críticas como extração, compensação, cortinas e emissão de vapor. O passo temporal adotado foi de 0,25 s, configuração que cumpriu o critério de convergência de 5% estabelecido para a análise espacial e manteve a estabilidade e consistência nos testes de variação temporal. Além disso, essa combinação proporcionou um custo computacional substancialmente inferior em comparação com resoluções mais refinadas, preservando, contudo, a precisão necessária para a representação dos fenômenos em estudo.

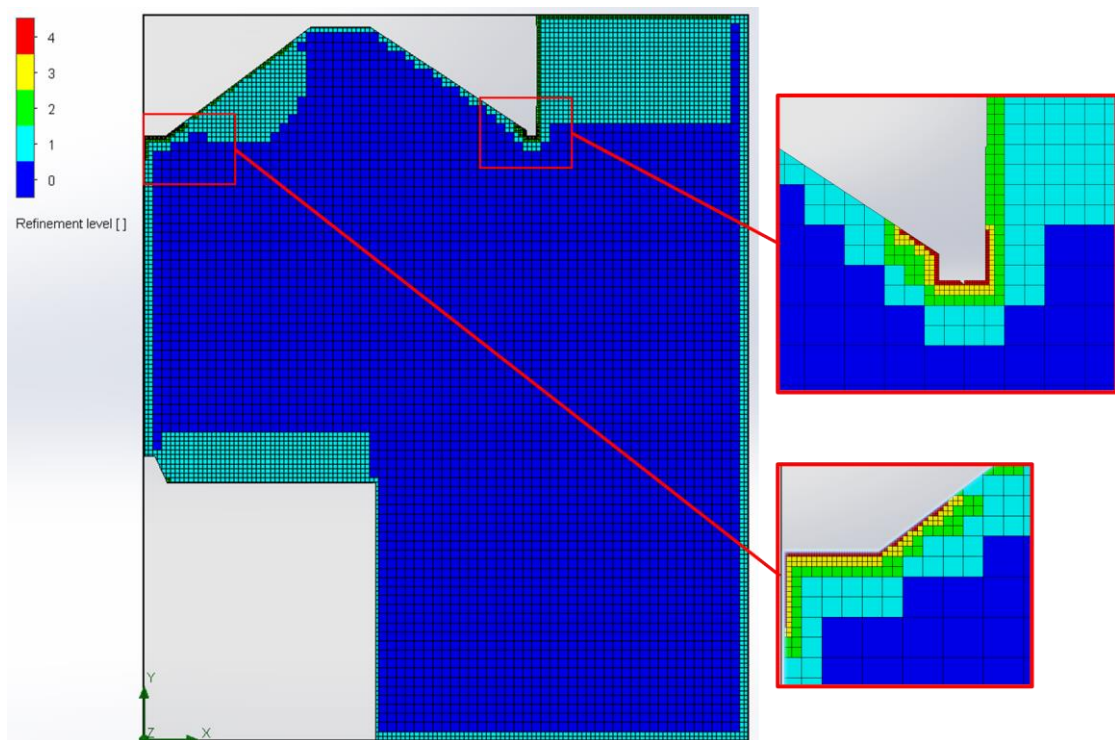


Figura 27 - Malha geométrica. Autor (FLOEFD 2412, 2025)

3.4.3. Definição das condições de contorno e inicialização

A etapa de configuração das simulações no *Simcenter FLOEFD 2412* teve como princípio reproduzir, com o maior grau de fidelidade possível, as condições estabelecidas experimentalmente, assegurando que as análises numéricas pudessem dialogar diretamente com os resultados medidos em laboratório. O domínio computacional foi simplificado para um volume de $2,0 \times 2,4 \times 2,0$ m, correspondente à região imediata do arranjo experimental, que incluía a hotte e o grelhador posicionados junto às paredes lateral e de fundo. Embora o espaço físico real da cozinha-laboratório fosse significativamente maior, a opção por restringir o domínio visou concentrar os recursos de cálculo na área efetivamente afetada pelo fenômeno de interesse, reduzindo o custo computacional. Essa decisão não foi precedida de testes de influência do domínio, sendo reconhecida como uma simplificação metodológica, mas encontra respaldo em práticas de engenharia quando o objetivo é analisar a região de maior interação entre plumas térmicas e zona de captação, sem comprometer a representatividade física dos processos de convecção e captura.

A definição das condições de fronteira foi implementada diretamente sobre as superfícies da geometria, permitindo representar de forma simplificada, mas fisicamente consistente, o funcionamento do sistema. Como os elementos internos da hotte (filtros, ventiladores e condutas) não foram modelados, adotou-se uma representação idealizada, focada nos fluxos globais. A extração e a compensação foram configuradas como *inlets* e *outlets* de caudal volumétrico constante, com perfil uniforme de velocidade; as cortinas de ar foram modeladas como jatos planos aplicados nas aberturas frontais e laterais da hotte; e a emissão de vapor foi representada por uma superfície localizada imediatamente acima do grelhador, atuando como

fonte de massa variável em função da curva experimental. A carga térmica associada ao processo de cocção foi introduzida como fonte volumétrica coincidente com a zona de emissão de vapor, de modo a favorecer a estabilidade numérica da pluma térmica. Não foram considerados efeitos de condensação/evaporação nem radiação térmica, por se tratarem de fenómenos secundários no balanço global de calor e massa deste tipo de estudo. As superfícies correspondentes aos planos YZ (2,0,0) e XY (0,0,2) foram tratadas como *environment pressure*, assegurando comunicação com o exterior à temperatura de 29,08 °C, enquanto as demais fronteiras foram consideradas paredes adiabáticas. A figura 28 sintetiza esta configuração.

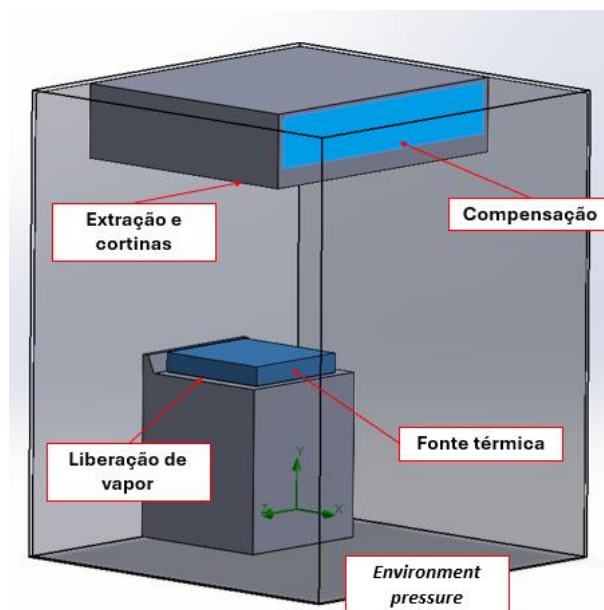


Figura 28 - Condições de fronteira aplicadas no domínio numérico. Autor (FLOEFD 2412, 2025)

Os fluidos de trabalho utilizados foram ar e vapor de água, ambos com propriedades termofísicas dependentes da temperatura, extraídas do *Siemens Material Database*. A Tabela 8 reúne as propriedades dos fluidos empregados no modelo. Inicialmente, o domínio foi preenchido exclusivamente por ar seco ($Y_{air} = 1$; $Y_{H2O} = 0$), reproduzindo as condições atmosféricas médias observadas no laboratório, sendo o vapor introduzido unicamente pela superfície de entrada associada ao grelhador.

Tabela 8 - Propriedades termofísicas dos fluidos simulados. (Autor, 2025)

Fluido	Propriedade	Valor	
Ar	Cp/Cv	1,399	-
	Massa molar	0,02896	Kg.mol ⁻¹
	Constante específica, R	287,10	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Vapor H ₂ O	Cp/Cv	1,329	-
	Massa molar	0,018015	Kg.mol ⁻¹
	Constante específica, R	461,52	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹

As curvas temporais aplicadas às simulações foram definidas de modo a representar, com a maior fidelidade possível, as condições de emissão de calor e de poluentes observadas no laboratório e previstas em norma. A curva de potência térmica foi simplificada em três segmentos lineares, correspondendo a uma fase inicial de aquecimento com crescimento progressivo, a um patamar de estabilização em carga máxima e a uma etapa final de arrefecimento com decréscimo gradual. Para a geração de vapor, adotaram-se duas formulações distintas: na emissão experimental, a curva foi derivada diretamente das medições em laboratório, apresentando variações temporais que refletem a dinâmica real do processo de cocção e a resposta à introdução de água no grelhador; já na emissão normativa, o vapor foi representado por um caudal constante, calculado de acordo com os critérios da EN 16282-1, assumindo assim um carácter idealizado e estacionário. Esta diferenciação metodológica, ilustrada na Figura 29, foi essencial para permitir a comparação entre cenários transientes, de base experimental, e cenários normativos, de natureza simplificada, assegurando maior robustez à análise dos resultados.

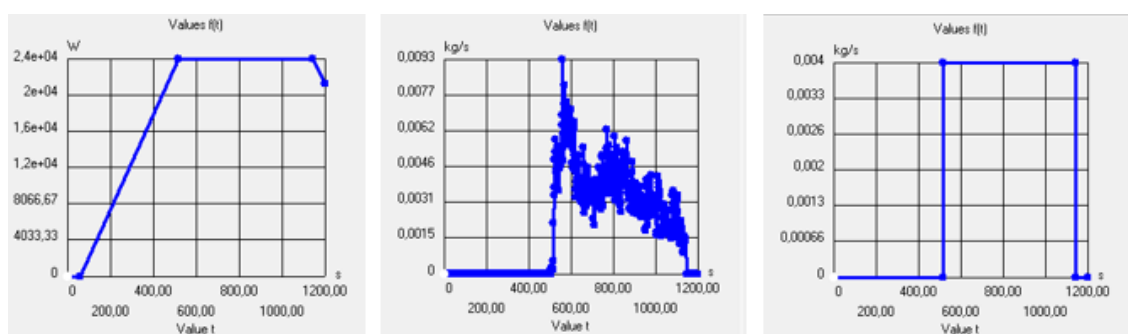


Figura 29 - Curva de potência térmica (a), vapor experimental (b) e vapor normativo (c).

Autor (FLOEFD 2412, 2025)

As condições iniciais globais foram estabelecidas a partir das médias experimentais: pressão atmosférica de 101.325 Pa, temperatura ambiente de 29,08 °C, velocidades nulas em todas as direções e intensidade de turbulência de 2%. A insuflação de ar pelas cortinas e pela compensação foi configurada a 25,71 °C, em consonância com os valores observados no ensaio,

enquanto as aberturas tratadas como ambiente asseguraram coerência entre o estado inicial das simulações e o ambiente experimental. O tempo total de simulação foi fixado em 1200 s, cobrindo integralmente as fases de aquecimento e o patamar de geração de vapor observados experimentalmente, uma vez que, no ensaio físico, a libertação de vapor é interrompida apenas no desligamento da fonte térmica. Para garantir consistência numérica, a malha e o passo temporais empregados neste estudo já haviam sido previamente avaliados no processo de convergência e sensibilidade, assegurando a independência dos resultados face à discretização.

Com esta configuração de base, foram estruturados 16 ensaios numéricos, concebidos para abranger diferentes dimensões metodológicas. A escolha desta matriz buscou integrar, de forma sequencial e coerente, quatro etapas complementares: validação do modelo CFD face ao experimento, análise da influência dos elementos construtivos da hotte e aplicação de uma matriz comparativa integrando cenários normativos e experimentais, concebida para avaliar de forma sistemática o risco de fuga da pluma. A síntese desta bateria de ensaios, com a descrição de cada configuração, o método de extração adotado, a condição de emissão e o objetivo principal, é apresentada na tabela 9, a qual permite visualizar de forma integrada o encadeamento lógico da investigação.

Tabela 9 - Síntese da bateria de ensaios numéricos. (Autor, 2025)

Ensaio	Geometria	Extração	Emissão de vapor
1	Experimental	Experimental	Experimental
2	Experimental	Experimental (sem compensação)	Experimental
3	Experimental	Experimental (sem cortina)	Experimental
4	Experimental	Experimental (apenas extração)	Experimental
5	Normativo	Normativo - método das velocidades	Normativo
6	Normativo	Normativo - método detalhado	Normativo
7	Normativo	Normativo - método das velocidades	Experimental
8	Normativo	Normativo - método detalhado	Experimental
9	Experimental	Normativo - método das velocidades	Normativo
10	Experimental	Normativo - método detalhado	Normativo
11	Experimental	Normativo - método das velocidades	Experimental
12	Experimental	Normativo - método detalhado	Experimental
13	Normativo	Experimental	Normativo
14	Normativo	Experimental	Experimental
15	Experimental	Experimental	Normativo
16	Experimental	Experimental	Experimental

O ensaio 1 correspondeu à replicação direta do experimento, com hotte equipada com cortina e compensação, operando nos mesmos caudais medidos (1130 m³/h de extração, 1017 m³/h de compensação e 0,2 m/s de insuflação nas cortinas). Os pontos de monitorização coincidiram com as posições instrumentadas no experimento (figura 30a), assegurando comparabilidade

direta. A partir desse ponto, foram concebidos os ensaios 2, 3 e 4, destinados a quantificar a influência dos elementos auxiliares de ventilação. No ensaio 2, manteve-se a cortina ativa, mas sem compensação; no ensaio 3, ativou-se apenas a compensação, sem cortinas; e no ensaio 4, eliminaram-se ambos, mantendo apenas a extração. O objetivo foi identificar em que medida a cortina de ar e a compensação contribuem individualmente para a eficiência de captura da pluma térmica e para a redução do risco de fuga de poluentes.

Na sequência, os casos 5 a 16 foram estruturados numa matriz comparativa concebida para avaliar a contenção da hotte sob diferentes configurações de operação, variando-se de forma sistemática a geometria, os critérios de dimensionamento da extração e a caracterização da emissão de vapor. Para esta etapa, o modelo foi propositadamente simplificado, operando apenas com extração, sem cortinas ou compensação, de modo a isolar exclusivamente o efeito dos caudais de ventilação sobre a contenção da pluma. A análise baseou-se nos pontos de monitorização distribuídos ao longo das bordas (figura 30b), assegurando comparabilidade direta entre todos os cenários.

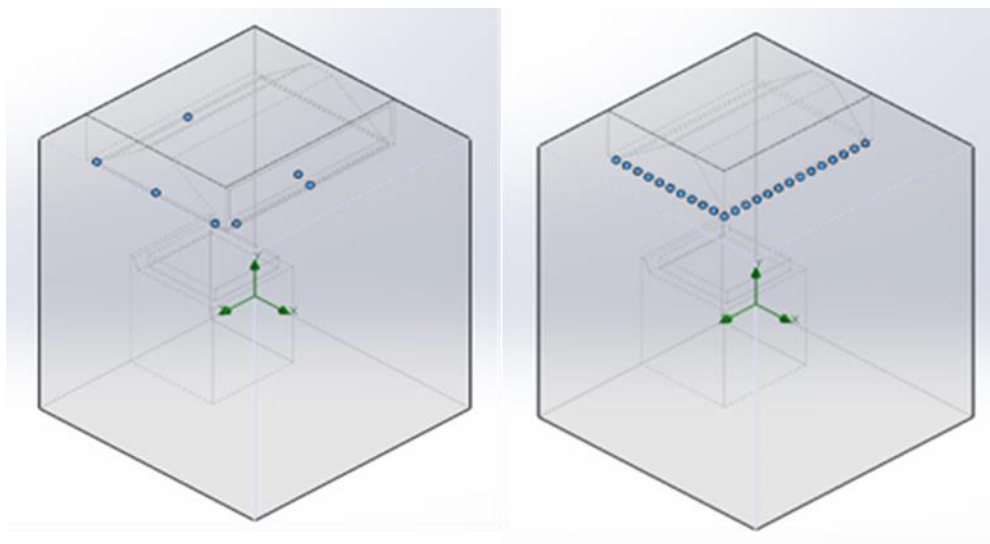


Figura 30 - Pontos de monitoramento: instrumentação (a) bordas da hotte (b).

Autor (FLOEFD 2412, 2025)

O primeiro grupo de simulações (casos 5 e 6) definiu a referência normativa, combinando a geometria idealizada da EN 16282-2 com extrações calculadas pelos dois métodos de dimensionamento previstos na norma, ambos em associação a uma emissão igualmente normativa. Na etapa seguinte (7 e 8), manteve-se a geometria normativa, mas substituiu-se a emissão constante da norma pela curva experimental de geração de vapor, de modo a verificar se os caudais prescritos pela EN 16282 são eficazes perante uma fonte real, variável no tempo e mais representativa do processo de cocção.

Nos cenários seguintes (9 a 12), o foco deslocou-se para a geometria experimental, permitindo observar como os critérios normativos se comportam quando aplicados à configuração física real da hotte. Nos dois primeiros casos desta série (9 e 10), a emissão permaneceu normativa,

associada às extrações por velocidade e detalhada, enquanto nos casos posteriores (11 e 12) tanto a geometria como a emissão foram experimentais, ainda sob extrações dimensionadas pela norma. Por fim, o último bloco (13 a 16) foi concebido para fechar a matriz de combinações possíveis, avaliando de forma cruzada as diferentes emissões sob extrações reais. Nesse conjunto, a extração foi mantida no valor experimental de referência ($1130 \text{ m}^3/\text{h}$), enquanto a emissão alternou entre as formulações normativa e experimental, aplicadas tanto à geometria normativa como à experimental. Desta forma, tornou-se possível isolar o impacto da caracterização da fonte poluidora sobre a eficiência de contenção, além de confrontar em que medida a formulação normativa é capaz de reproduzir a complexidade observada no experimento.

As simulações foram executadas numa estação de trabalho equipada com *AMD Ryzen 9 5900X* (12 núcleos físicos, 24 processadores lógicos, 3,7–4,8 GHz), 64 GB de memória *RAM DDR4* (3600 MT/s, DIMM), 6 TB de armazenamento interno e placa gráfica *AMD Radeon RX 6600 XT* (8 GB GDDR6), operando sob *Windows 11 Pro*, 64 bits. O processamento foi realizado exclusivamente em CPU, uma vez que o *Simcenter FLOEFD 2412* não utiliza aceleração gráfica para cálculos numéricos. Para o pós-processamento, os dados provenientes dos pontos de monitorização foram exportados diretamente do software e organizados em folhas de cálculo do *Microsoft Excel*, formando uma base de dados com registos a cada 2 segundos. A partir dessa base consolidada foram realizadas as análises cujo detalhamento metodológico será apresentado no capítulo seguinte.

3.5. Abordagem para análise dos resultados

A validação de modelos numéricos, especialmente quando aplicados a ambientes internos como cozinhas profissionais, exige uma abordagem metodológica robusta, pautada em critérios objetivos e em referências reconhecidas pela comunidade científica. O simples exame qualitativo de padrões de escoamento, ainda que útil para identificar coerência visual, não é suficiente para sustentar conclusões em nível académico ou normativo. É necessário quantificar as diferenças entre simulação e experimento por meio de indicadores estatísticos consolidados, que permitam avaliar com rigor a precisão, a fiabilidade e a tendência dos resultados. Oberkampf & Roy (2010) sublinham que a credibilidade de um modelo não reside apenas na sua formulação matemática ou na sofisticação dos seus algoritmos, mas sim na capacidade de demonstrar, com métricas claras, a proximidade com a realidade medida. De modo semelhante, Celik et al. (2008) e Roache (2009) reforçam que a verificação e a validação em CFD devem seguir práticas consolidadas que impeçam a arbitrariedade, estabelecendo margens de aceitação com base em referências técnicas e experimentais.

Esse rigor torna-se ainda mais relevante em contextos de ventilação de cozinhas, onde falhas na contenção de poluentes podem ter impactos diretos na saúde ocupacional e na eficiência energética. Q. Chen (1995) mostrou, ao comparar diferentes modelos de turbulência $k-\epsilon$, que pequenas variações na modelação podem conduzir a diferenças significativas na previsão dos gradientes térmicos e dos campos de velocidade em salas fechadas, evidenciando a necessidade de métricas quantitativas para além da simples observação qualitativa. Peter V.

Nielsen (1998), em linha semelhante, destacou que a seleção inadequada de modelos de turbulência para ambientes internos pode induzir erros sistemáticos, e que apenas a aplicação de critérios estatísticos como R^2 , NSE e RMSE garante a identificação de previsões fisicamente consistentes. Emmerich & McGrattan (1998) demonstram, inclusive, que resultados que aparentam ser adequados em médias podem falhar em reproduzir eventos transientes e picos críticos, comprometendo a análise da segurança. Essa observação justifica a necessidade de adotar indicadores que capturem tanto o comportamento médio como a variabilidade temporal do fenómeno. Z. Zhang et al. (2007), ao avaliarem diversos modelos de turbulência em simulações de ambientes internos, reforçam que a validação deve considerar simultaneamente a correlação temporal, a variabilidade e o viés, critérios posteriormente sistematizados por Q. Chen & Srebric (2002), que propuseram um guia metodológico para relatórios de validação em CFD de ambientes construídos.

Deste modo, a presente análise organiza-se em torno de um conjunto de métricas que se complementam, cobrindo diferentes aspetos da comparação entre simulação e experimento. Entre os indicadores básicos, destaca-se o erro percentual ponto a ponto, calculado segundo a equação (34),

$$ER_i(\%) = \frac{CFD_i - EXP_i}{EXP_i} \times 100, \quad (34)$$

onde CFD_i e EXP_i são os valores simulados e experimentais no instante i . Esse índice permite avaliar discrepâncias instantâneas e identificar momentos específicos em que a simulação superestima ou subestima os valores medidos. Contudo, como observam Willmott & Matsuura (2005), esse indicador pode ser instável em situações de baixos valores absolutos, razão pela qual se adota também o erro percentual médio absoluto, ou MAPE, definido por:

$$MAPE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{CFD_i - EXP_i}{EXP_i} \right| \times 100. \quad (35)$$

Este parâmetro fornece uma visão global da precisão da simulação em relação ao experimento, sem ser afetado pela direção do erro. De acordo com Moriasi et al. (1983), valores de MAPE inferiores a 10% são geralmente considerados satisfatórios, e até 20% podem ser aceitos em contextos de elevada complexidade, como aqueles que envolvem emissões transientes de poluentes em ambientes confinados. Complementando essa perspectiva, a raiz do erro quadrático médio (RMSE), constitui uma métrica mais sensível a discrepâncias elevadas, pois penaliza erros de maior magnitude.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CFD_i - EXP_i)^2} . \quad (36)$$

Como nem sempre os valores absolutos são comparáveis entre variáveis, utiliza-se a forma normalizada (NRMSE), definida como:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{EXP}} \times 100 , \quad (37)$$

onde \overline{EXP} representa a média experimental. Estudos como os de Emmerich & McGrattan (1998) sugerem que valores de NRMSE inferiores a 10% são indicativos de boa aderência entre CFD e experimento, mesmo em condições transientes. Para avaliar tendências sistemáticas de viés, adota-se ainda o PBIAS, calculado por:

$$PBIAS(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (CFD_i - EXP_i)}{\sum_{i=1}^n EXP_i} \times 100 , \quad (38)$$

em que valores entre $\pm 10\%$ são aceitos como ausência de viés significativo (Moriassi et al., 1983). Assim, o conjunto formado por MAPE, RMSE, NRMSE e PBIAS fornece uma primeira camada de verificação estatística, cobrindo precisão média, penalização de picos e identificação de tendências sistemáticas.

A segunda camada de avaliação incorpora métricas de correlação e eficiência estatística. O coeficiente de Pearson (r) mede a aderência linear entre séries simulada e experimental, e seu quadrado, R^2 , representa a proporção da variância experimental explicada pelo modelo. Valores de $R^2 \geq 0,80$ são considerados satisfatórios em estudos de ventilação interna Moriassi et al. (1983). Contudo, a correlação isolada pode ser enganosa, pois séries deslocadas no tempo podem apresentar altos valores de R^2 mesmo sem boa correspondência ponto a ponto. Por isso, aplica-se a eficiência de *Nash–Sutcliffe* (NSE) que mede a capacidade da simulação de reproduzir a série temporal integralmente:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (CFD_i - EXP_i)^2}{\sum_{i=1}^n (EXP_i - \overline{EXP})^2} . \quad (39)$$

Valores de NSE acima de 0,5 são geralmente aceitos, e acima de 0,65 considerados desejáveis em CFD para ambientes internos (Z. Zhang et al., 2007).

Para a validação experimental (ensaio 1), todas essas métricas são aplicadas sobre a série temporal obtida a cada dois segundos no sensor v2.1, posicionado antes do filtro, comparando diretamente com a temperatura média na superfície de extração da simulação. Já nas baterias subsequentes, onde a comparação se dá apenas entre simulações, mantêm-se os mesmos indicadores aplicados aos pontos de monitoramento definidos.

Nos ensaios 2 a 4, a avaliação do impacto dos elementos construtivos da hotte sobre o desempenho do sistema de ventilação e extração foi conduzida tomando-se como referência o cenário previamente validado (ensaio 1). A análise organizou-se em dois níveis. No nível local, cada ponto de monitoramento (v1.0 a v1.6) foi caracterizado por estatísticas descritivas das séries temporais: a média temporal, que representa o valor médio da variável XXX no intervalo simulado, definida por:

$$\bar{X}_{(s,p)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{(s,p)}(t_i) \quad , \quad (40)$$

enquanto o valor máximo, associado à maior intensidade registrada no ponto, é definido por:

$$X_{(s,p)}^{max} = \max [X_{(s,p)}(t)] \quad , \quad (41)$$

e a variabilidade temporal é quantificada pelo desvio-padrão, dado por:

$$\sigma(X)_{(s,p)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{(s,p)}(t_i) - \bar{X}_{(s,p)})^2} \quad . \quad (42)$$

Essa abordagem permite identificar incrementos médios, intensificação de picos e aumento da variabilidade temporal, aspectos diretamente associados à estabilidade do escoamento (Emmerich & McGrattan, 1998; Peter V. Nielsen, 1998).

No plano global, a caracterização do desempenho foi complementada por indicadores integrados. A eficiência de captação (*equação 10*) expressa a capacidade do sistema em remover os poluentes gerados; a dispersão térmica foi quantificada pelo índice de exposição integrada aplicado às séries de temperatura:

$$IEI_T^{(s,p)} = \int_0^t \max[T_{s,p}(t) - T_{amb}] dt , \quad (43)$$

$$\langle IEI_T \rangle^{(s)} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n IEI_T^{(s,p)} , \quad (44)$$

e a homogeneidade espacial é avaliada pelo desvio-padrão espacial das médias temporais (*equação 45*), cuja elevação sinaliza maior irregularidade da pluma e risco de recirculações (Z. Zhang et al., 2007). Em conjunto, esses parâmetros permitem qualificar de maneira abrangente o papel dos elementos construtivos no desempenho do sistema, ainda que sem correlação direta com dados experimentais.

$$S_{esp}(X)_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{p=1}^n (\bar{X}_{s,p} - \langle \bar{X} \rangle_s)^2} . \quad (45)$$

Na terceira bateria (ensaios 5 a 16), o foco deslocou-se para a avaliação direta da contenção da pluma sob diferentes configurações operacionais. Adotou-se como requisito mínimo a ausência de fuga significativa nos pontos da borda, considerando-se valores inferiores a 10^{-5} em fração mássica como ruído numérico (Q. Chen, 1995; Z. Zhang et al., 2007). A distinção entre cenários foi então refinada por indicadores de severidade de fuga baseados nas mesmas estatísticas temporais já definidas aplicadas especificamente à fração mássica nos pontos de monitoramento da borda. Assim, a síntese do desempenho global foi obtida pela fuga média espacial a partir da qual se discriminam situações limítrofes (fuga residual) de cenários críticos (concentrações médias elevadas, picos intensos ou distribuição espacial irregular).

$$\langle \bar{Y} \rangle_{(s)} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n \bar{Y}_{(s,p)} . \quad (46)$$

Assim, a persistência do escape, os episódios críticos de *spillage* e o efeito agregado na borda são quantificados de modo coerente com os critérios já empregados, preservando comparabilidade e evitando sobreposição conceitual entre baterias.

4. Resultados e Discussão

O presente capítulo organiza-se em torno de três etapas interdependentes, concebidas para sustentar e aprofundar a compreensão dos mecanismos que governam o desempenho da hotte. A primeira corresponde à validação, na qual os resultados numéricos foram confrontados com dados experimentais obtidos em ensaio físico controlado. Esta etapa permitiu aferir a capacidade do modelo em reproduzir a evolução temporal e espacial da pluma térmica, assegurando que as simulações captam, com fidelidade razoável, as transições entre aquecimento, regime e arrefecimento, bem como os gradientes dominantes de temperatura.

Na sequência, a análise concentrou-se nos elementos construtivos do sistema de extração, isolando o papel desempenhado pela cortina e pela compensação. A interpretação combinou métricas de intensidade, variabilidade e homogeneidade espacial, articuladas com indicadores acumulativos de exposição térmica.

Por fim, a investigação avançou para a avaliação da contenção da pluma em diferentes combinações de geometria, estratégias de extração e caracterização da emissão, contrastando prescrições normativas e condições experimentais. Esta etapa sintetizou o desempenho global por meio de indicadores consistentes entre si, capazes de distinguir situações de fuga residual de cenários críticos.

O encadeamento entre as três fases assegura uma leitura integrada, em que cada bloco contribui para consolidar a robustez metodológica e oferecer conclusões aplicáveis tanto à interpretação científica como ao dimensionamento prático de sistemas de ventilação em cozinhas profissionais.

4.1. Validação experimental

A validação constitui um passo essencial na consolidação da credibilidade de qualquer modelo numérico. No presente estudo, o confronto entre a série temporal experimental e a série simulada no ponto v2.1, posicionado a montante do filtro, permitiu avaliar em detalhe a capacidade do modelo em reproduzir os mecanismos dominantes da pluma térmica gerada pelo grelhador. A Figura 31 apresenta a comparação direta entre os dois sinais, evidenciando que a simulação reproduz a sequência característica das três fases operacionais do ensaio físico: aquecimento, regime quase estacionário e início do arrefecimento. Ainda que diferenças locais sejam visíveis, sobretudo em amplitude, a coincidência global de rampas, patamares e oscilações indica que os processos de transferência de calor e transporte de massa foram representados com razoável fidelidade.

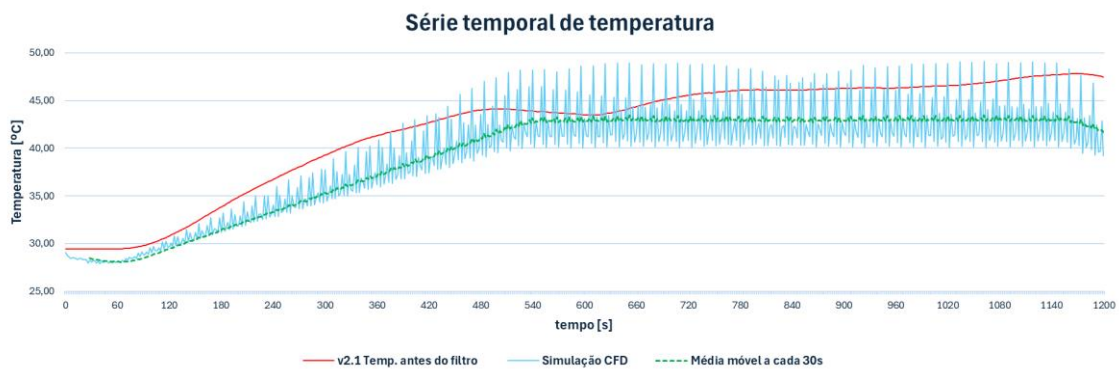


Figura 31 - Comparação temporal entre resultados experimentais e CFD. (Autor, 2025)

Na análise da evolução temporal da temperatura, importa reconhecer que cada série traduz não apenas o fenômeno físico em si, mas também a forma como este é captado e representado. A curva experimental apresenta um traçado suavizado e níveis médios mais elevados, resultado da inércia térmica dos materiais envolvidos e da constante de tempo associada ao sensor, que atenua naturalmente as variações rápidas. Essa resposta integrada reproduz o que ocorre numa instalação de ventilação real, em que massas metálicas, gradientes de condução e processos de mistura reduzem as flutuações instantâneas e conduzem a um sinal estabilizado. A simulação, em contraste, revela oscilações de maior amplitude em torno de um valor médio inferior, consequência da amostragem pontual num campo turbulento onde desprendimentos convectivos, vorticidade e instabilidades transitórias são captados em tempo real. A discrepância entre os dois registros não resulta de erro, mas da diferença fundamental entre a natureza instantânea da CFD e a resposta filtrada e integrada obtida no ensaio.

A inclusão da curva de média móvel a cada 30 s teve precisamente a finalidade de reduzir essa assimetria metodológica, funcionando como um filtro temporal que atenua as componentes de alta frequência e evidencia a tendência subjacente do processo. A escolha deste intervalo representa um compromisso metodológico: suficientemente amplo para eliminar oscilações transitórias, mas curto o bastante para não descaracterizar a evolução global. Com esta suavização, observa-se que a inclinação da curva simulada converge para a mesma tendência da experimental, validando a consistência do balanço energético global. Contudo, o nível médio da curva filtrada permanece inferior ao observado no ensaio, o que demonstra que a diferença não se explica apenas pelo ruído de alta frequência. Está relacionada sobretudo com as simplificações do modelo, que idealizou o grelhador como fonte térmica uniforme, sem considerar a acumulação energética no sólido, os gradientes de condução e a variabilidade da interação com a água. No ensaio, esses mecanismos elevam e estabilizam a temperatura média do ar, criando um patamar mais alto que não é reproduzido numericamente.

Assim, a comparação entre as três curvas revela que a CFD consegue reproduzir a dinâmica de crescimento, a coerência das inclinações médias e a evolução global do sistema, mas subestima o patamar médio em regime. Essa diferença deve ser interpretada como resultado das limitações estruturais da modelação, e não como falha do balanço energético. A curva de média móvel estabelece-se, por isso, como o indicador metodológico mais adequado para aproximar

os dois domínios e sustentar uma análise crítica robusta. A consistência desta leitura qualitativa será confirmada e aprofundada pelos indicadores estatísticos apresentados de seguida, os quais quantificam o grau de aproximação entre as séries e permitem avaliar, com maior objetividade, a magnitude e a natureza dos desvios observados. A análise estatística confirma esta interpretação ao revelar que o MAPE de 7,62% mantém a simulação dentro da faixa de precisão geralmente aceite para ambientes internos com emissões transitórias e recirculações complexas, em geral inferior a 10%. Esse resultado indica que, em média, o modelo consegue reproduzir a magnitude das temperaturas medidas no ensaio sem apresentar desvios estruturais relevantes. O RMSE de 3,84 e o NRMSE de 9,14% aprofundam esta leitura ao mostrar que as maiores diferenças ocorrem nos momentos de maior intensidade, quando a pluma térmica concentra energia e as flutuações se tornam mais marcantes. Essa sensibilidade decorre da penalização de extremos característica do RMSE, que amplia o peso dos erros em trechos de gradiente acentuado e reflete a tendência dos modelos de turbulência RANS a suavizar respostas em situações de forte interação entre flutuabilidade e recirculações. O PBIAS de -6,45% reforça este padrão ao evidenciar um viés consistente de subestimação, comportamento amplamente descrito na literatura para cenários em que a sucção localizada e os jatos de compensação modulam a estrutura do escoamento. Já os coeficientes de correlação, com R^2 de 0,7865 e NSE de 0,5533, embora não atinjam valores ideais, permanecem acima dos limiares mínimos de aceitação recomendados para séries transitórias. Estes resultados demonstram que o modelo não apenas acompanha a variabilidade experimental de forma estatisticamente significativa, mas também preserva a coerência global do fenómeno analisado.

A natureza dos desvios pode ser lida de forma sintética na figura 32, que apresenta a dispersão entre pares simulados e experimentais. A nuvem de pontos distribui-se em torno da bissetriz, mas com inclinação inferior a 1, confirmando o viés de subestimação. O afastamento é mais pronunciado nas temperaturas mais elevadas, precisamente onde RMSE e NRMSE concentram maior contribuição. Esta observação é coerente com o padrão dos resíduos, que revelam predominância de erros negativos em magnitudes associadas aos picos experimentais. Ainda assim, a forte correlação entre os sinais reforça que a tendência global é preservada, mesmo quando o modelo atenua valores extremos.



Figura 32 - Dispersão entre valores experimentais e CFD. (Autor, 2025)

Resultados e Discussão

O diagnóstico temporal do erro, mostrado na Figura 33, revela que a discrepância entre simulação e experimento apresenta comportamento dinâmico e sistemático, e não mero ruído numérico. Durante os primeiros instantes de aquecimento, o erro mantém-se em níveis reduzidos, oscilando em torno de valores próximos a -5%, o que demonstra boa correspondência inicial entre as séries. No entanto, à medida que o sistema progride para o regime estacionário, o padrão altera-se de forma marcante: as discrepâncias ampliam-se, estabilizando-se em torno de um viés negativo próximo de -10%. Este viés confirma a tendência de subestimação já apontada pelos indicadores globais e mostra que, nos períodos em que a pluma concentra maior energia, a simulação perde capacidade de acompanhar a intensidade dos fenômenos observados no ensaio físico.

Outro aspecto crítico é a presença de oscilações de alta frequência e episódios de *overshoot* positivo, que se repetem com cadência regular ao longo do regime. Estes episódios evidenciam que o modelo consegue acompanhar o tempo dos eventos, mas não as suas amplitudes, suavizando os extremos por efeito direto do fecho turbulento RANS e da dissipação numérica intrínseca ao método. No início do arrefecimento, a curva do erro acompanha a tendência de declínio, mas a persistência dessas oscilações impede qualquer convergência plena com a trajetória experimental. Este padrão sugere que, embora o modelo capte adequadamente a evolução global e o ritmo temporal do fenômeno, apresenta limitações estruturais na representação dos picos e dos transitórios de maior intensidade, o que deve ser considerado em análises de risco de fuga ou em cenários de operação crítica.

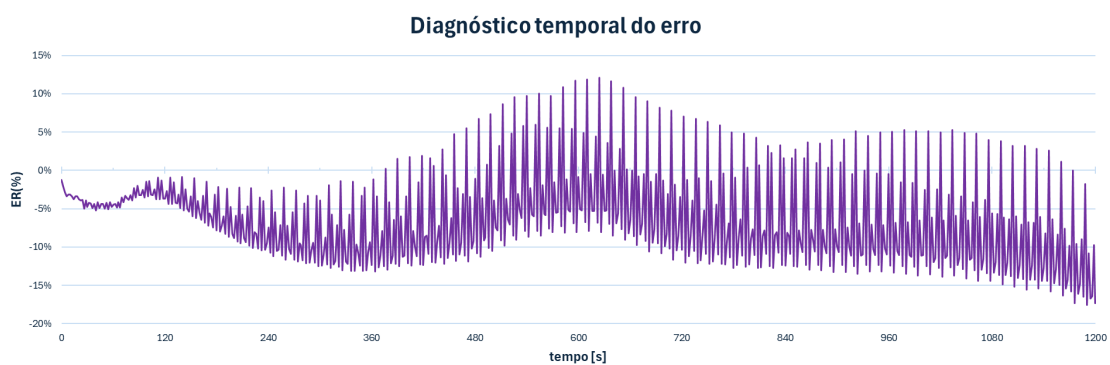


Figura 33 - Análise temporal do erro. (Autor, 2025)

A leitura espacial da pluma térmica no plano XY sob os sensores v1.5 e v1.6 acrescenta elementos que ajudam a interpretar os desvios estatísticos previamente discutidos. No instante de 624 s (Figura 34a), observa-se que a pluma ascende de forma organizada e concentrada, mas com menor estabilidade lateral, apresentando contornos difusos e assimetria na região próxima ao grelhador. Este comportamento está em linha com as discrepâncias iniciais apontadas pela análise temporal do erro: embora o modelo acompanhe o ritmo do aquecimento, tende a amplificar as oscilações locais devido à sensibilidade à convecção próxima da fonte. A pluma numericamente mais difusa explica por que os valores de pico foram subestimados, já que parte

da energia é artificialmente redistribuída pelo fecho turbulento RANS, atenuando gradientes mais intensos.

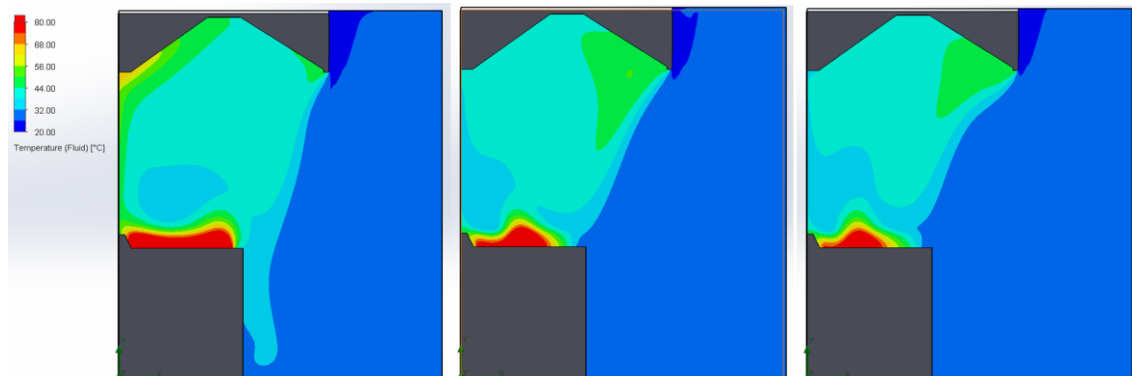


Figura 34 - Campo de temperatura a 624s (a), 824s (b) e 1190s (c). Autor (FLOEFD 2412, 2025)

No instante de 824 s (Figura 34b), a pluma mostra-se mais consolidada, com colunas de ascensão mais bem definidas e menor dispersão lateral. Esta configuração reforça a coerência do modelo em reproduzir a estrutura global do escoamento, aspecto já indicado pelo sincronismo entre as séries temporais. Ainda assim, nota-se que o núcleo quente permanece mais achatado do que seria esperado numa situação experimental, efeito que se relaciona diretamente com o viés negativo identificado pelo PBIAS. Ao suavizar a estratificação térmica, a simulação mantém a cadência dos eventos, mas não a sua intensidade, justificando a combinação de alta correlação com subestimação persistente.

Aos 1190 s (Figura 34c), correspondente à fase de declínio, a pluma mantém a sua organização espacial, mas exhibe sinais claros de dissipação numérica: os contornos laterais tornam-se novamente difusos e zonas residuais de recirculação emergem próximas das paredes. Este comportamento é coerente com a manutenção do viés negativo durante o arrefecimento, revelada pelos indicadores temporais, e ajuda a explicar por que as séries não convergiram em magnitude mesmo quando ambas apresentavam tendência descendente. Em termos físicos, a simulação preserva a coerência da dinâmica de escoamento, mas não consegue reproduzir os gradientes agudos associados ao arrefecimento real, reforçando a interpretação de que os modelos RANS penalizam transitórios de alta intensidade.

4.2. Impacto dos elementos construtivos

A segunda bateria de simulações foi dedicada a avaliar, de forma sistemática, os elementos construtivos do equipamento de extração no comportamento termoaerodinâmico da pluma térmica, tendo como referência a configuração previamente validada. Foram concebidos quatro cenários, organizados de modo a isolar o efeito de cada elemento construtivo: operação com cortina e compensação, operação apenas com a cortina, operação apenas com a compensação e operação sem nenhum dos dois dispositivos, restando apenas a extração central. Esta matriz experimental ampliada permite compreender como cada um desses

Resultados e Discussão

mecanismos auxiliares atua sobre a dinâmica do escoamento e até que ponto a sua presença é determinante para o desempenho global da hotte.

A leitura dos campos de velocidade esclarece, sem ambiguidades, o papel estruturante da cortina e o efeito modulador da compensação sobre a morfologia e a estabilidade da pluma. No Ensaio 1, a pluma desenvolve-se como um jato ascendente estreito, coeso e verticalmente canalizado. As recirculações existem, mas permanecem confinadas às margens e não interceptam o corpo principal. O plano XY mostra uma camada de alta velocidade junto a borda da hotte, criada pela cortina, que impede o alargamento lateral e preserva a integridade do núcleo. No plano XZ, o jato mantém espessura quase constante, sem cortes por linhas de separação ou reatacamentos internos, sinal de baixa variabilidade intranuclear e trajetória monotônica até à extração. Esta configuração, onde a barreira aerodinâmica (cortina) e o aporte ordenado da compensação atuam de forma concertada, é a mais estável e previsível da bateria, aquela em que se antecipam menores extremos e maior eficiência de captura (Figuras 35a e 35b).

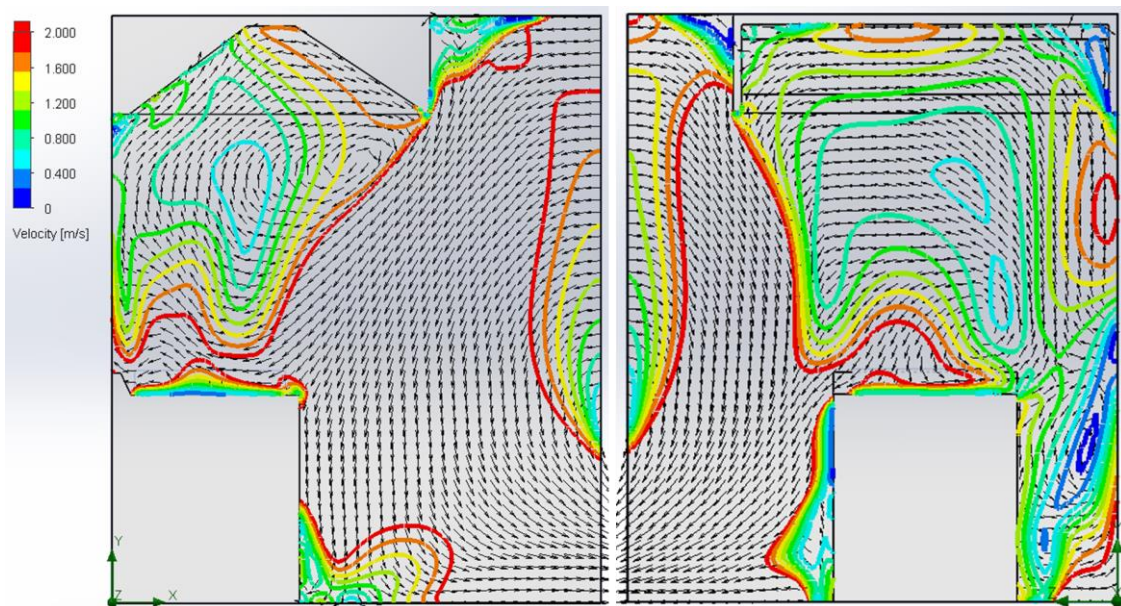


Figura 35 - Campos de velocidade para o Ensaio [1] no (a) plano XY e no (b) plano XZ.

Autor (FLOEFD 2412, 2025)

No Ensaio 2, a cortina preserva a geometria da pluma, porém a ausência de compensação expõe o jato a oscilações de intensidade. A Figura 36a confirma a contenção lateral mas revela ondulações na interface com o ambiente; no plano XZ (Figura 36b), surgem desprendimentos periódicos e recirculações marginais mais pronunciadas sob a hotte. O núcleo não se fragmenta, mas altera a sua espessura ao longo da subida, indicador de instabilidade temporal. Em termos operacionais, a cortina mantém a forma e limita a difusão, mas a falta de compensação reduz a robustez dinâmica do escoamento e aumenta a variabilidade que, adiante, se refletirá em desvio-padrão e RMSE superiores aos do Ensaio 1.

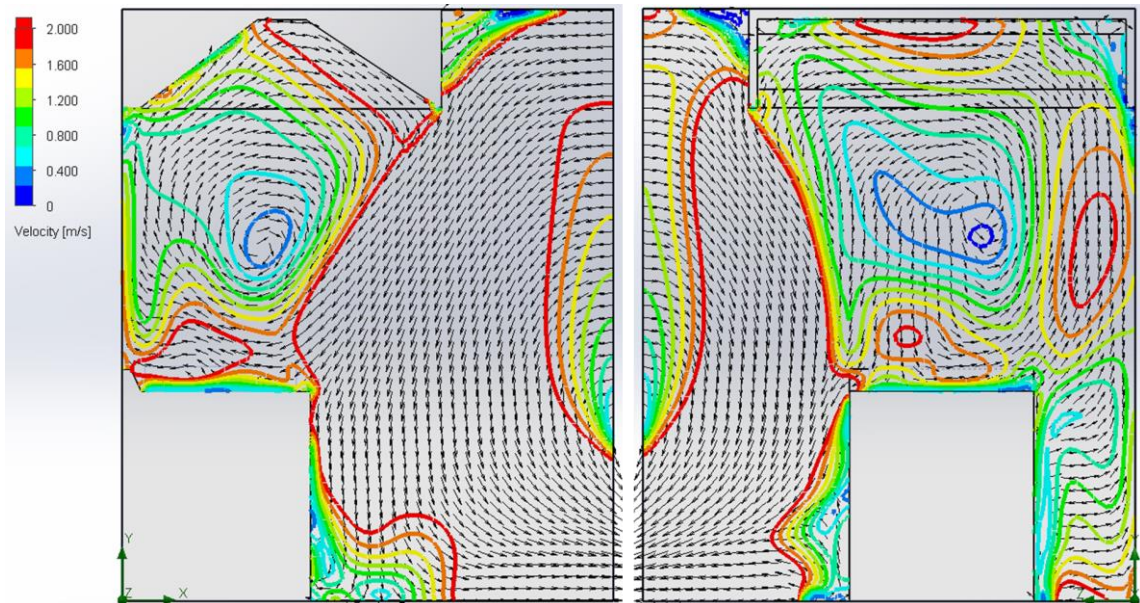


Figura 36 - Campos de velocidade para o Ensaio [2] no (a) plano XY e no (b) plano XZ.

Autor (FLOEFD 2412, 2025)

O Ensaio 3 constitui o padrão mais caótico em termos de estrutura interna. Sem a cortina, a pluma perde contenção lateral e alarga-se progressivamente até às paredes. O ponto decisivo surge no plano XZ (Figura 37b), onde a compensação, atuando isoladamente, introduz células recirculatórias embebidas no próprio núcleo, separadas por linhas de separação que atravessam o jato. Observa-se alternância rápida de zonas de subida e descida, com reatacamentos intermitentes junto ao intradorso e ao plano de captura. Em vez de estabilizar, a compensação espessa as camadas de tensão de corte e alimenta a produção turbulenta no interior do jato, convertendo a pluma num padrão estratificado e ondulante. Este mecanismo explica, qualitativamente, picos e variabilidade mais acentuados nos pontos centrais e uma tendência a penalizar a eficiência de captação, que a análise estatística confirmará.

Resultados e Discussão

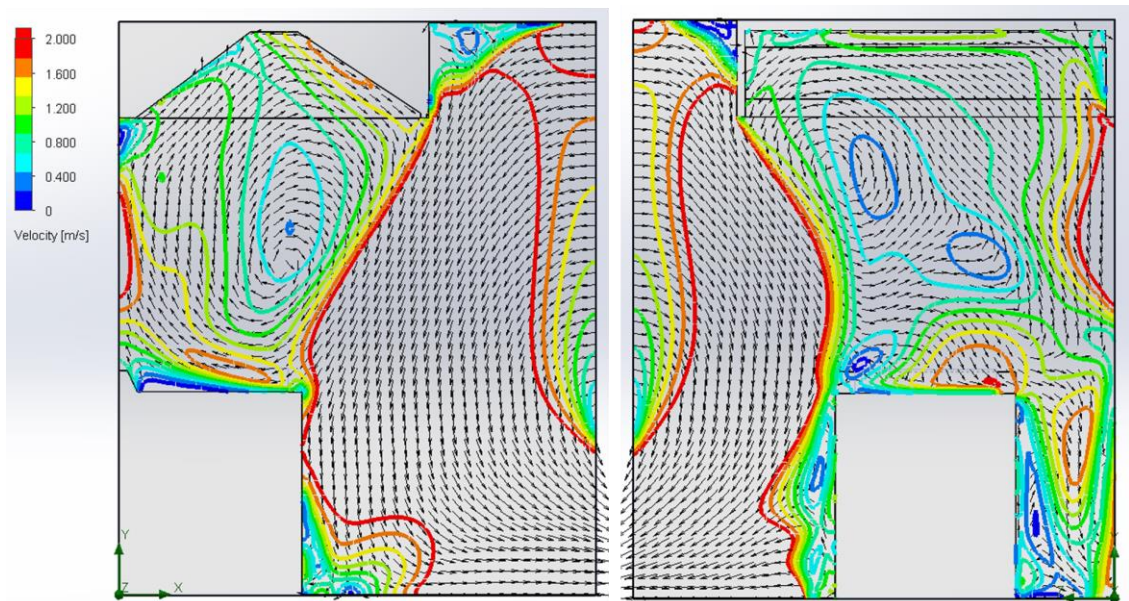


Figura 37 - Campos de velocidade para o Ensaio [3] no (a) plano XY e no (b) plano XZ.

Autor (FLOEFD 2412, 2025)

No Ensaio 4, a ausência simultânea de cortina e compensação conduz à desorganização global do escoamento. A pluma perde continuidade logo após a emissão, no plano XY (Figura 38a) exhibe difusão lateral acentuada e encosto às paredes, enquanto o no plano XZ (Figura 38b) revela redemoinhos largos que acompanham a massa difusa do jato. O regime é ineficiente por difusão, governado por flutuabilidade e arrasto da extração, com menor alternância intranuclear do que no Ensaio 3, mas com maior propensão a *spillage* pela falta de canalização. Em síntese, o Ensaio 4 é o mais desfavorável para contenção global e o Ensaio 3 o mais instável no interior do núcleo.

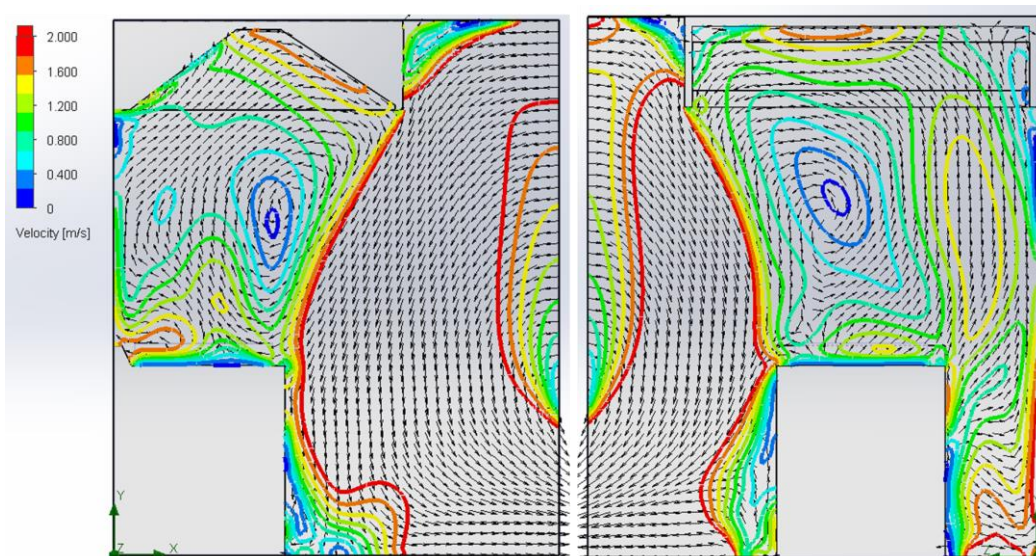


Figura 38 - Campos de velocidade para o Ensaio [4] no (a) plano XY e no (b) plano XZ.

Autor (FLOEFD 2412, 2025)

A síntese comparativa demonstra que a cortina é o elemento que estrutura a forma, uma vez que sempre que presente, a pluma mantém verticalidade, coesão e fronteira definida, com recirculações confinadas fora do corpo principal. A compensação é o elemento que modera a dinâmica, uma vez que quando acoplada à cortina, amortece oscilações e quando atua isoladamente, injeta instabilidade no núcleo e fragmenta a trajetória. Sem ambos, a pluma torna-se difusa e monotônica, com perda de coerência e fuga lateral.

Com esta base, o exame dos valores médios e máximos de temperatura nos pontos de monitorização (Tabela 10) deixa de ser um exercício isolado, uma vez que as médias periféricas próximas de 29 °C, invariantes entre cenários, confirmam que o microclima fora da zona de captura pouco reage às combinações operacionais; já nos pontos centrais (v1.5–v1.6), onde os plots evidenciam as diferenças morfológicas mais marcantes, espera-se precisamente a elevação dos máximos e da variabilidade quando a contenção falha e, inversamente, níveis mais moderados quando a forma e a dinâmica são simultaneamente controladas. Em suma, as assinaturas estatísticas que se apresentam a seguir decorrem diretamente da morfologia do escoamento observada nestes campos de velocidade.

Tabela 10 - Estatísticas de temperatura (Autor, 2025)

Sensor	Controle	Ensaio [1]	Ensaio [2]	Ensaio [3]	Ensaio [4]
v1.0	Média	25,68	29,08	29,90	29,08
	Valor máximo	29,09	29,09	29,09	29,09
	Desvio padrão	$3,18 \cdot 10^{-1}$	$3,66 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-1}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$
v1.1	Média	25,32	29,08	25,31	29,08
	Valor máximo	29,09	29,09	29,09	29,09
	Desvio padrão	$1,78 \cdot 10^{-1}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$8,59 \cdot 10^{-2}$	$7,34 \cdot 10^{-4}$
v1.2	Média	29,08	29,08	29,08	29,08
	Valor máximo	29,09	29,09	29,09	29,09
	Desvio padrão	$2,66 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$4,28 \cdot 10^{-4}$
v1.3	Média	29,08	29,08	29,08	29,08
	Valor máximo	29,09	29,09	29,09	29,09
	Desvio padrão	$4,57 \cdot 10^{-3}$	$3,59 \cdot 10^{-4}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$3,40 \cdot 10^{-4}$
v1.4	Média	29,08	29,08	29,08	29,08
	Valor máximo	29,09	29,09	29,09	29,09
	Desvio padrão	$7,52 \cdot 10^{-3}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$6,11 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$
v1.5	Média	41,82	42,79	42,91	44,31
	Valor máximo	51,02	54,38	51,97	56,45
	Desvio padrão	$6,85 \cdot 10^0$	$6,95 \cdot 10^0$	$7,30 \cdot 10^0$	$7,72 \cdot 10^0$
v1.6	Média	41,51	42,10	41,38	42,49
	Valor máximo	62,34	69,14	59,86	72,30
	Desvio padrão	$8,37 \cdot 10^0$	$8,77 \cdot 10^0$	$7,37 \cdot 10^0$	$8,47 \cdot 10^0$

Ao deslocar a leitura para v1.5 e v1.6, localizados no núcleo da pluma, o quadro muda de escala e de natureza. Em v1.6, o cenário de referência com cortina e compensação ativas mantém a média próxima de 41,5 °C e picos em torno de 62,3 °C. A supressão simultânea dos dois dispositivos eleva o máximo a 72,3 °C e aumenta a média para 42,5 °C, combinação que traduz intensificação dos extremos e maior carga térmica sustentada no núcleo. A retirada isolada da compensação já produz deterioração importante em v1.6, com máximos em 69,1 °C e desvio-padrão que salta para 8,77 °C. Esses valores indicam que a compensação exerce um papel de moderação direta sobre os picos, reduzindo o acumular de energia na região central. A supressão apenas da cortina, por sua vez, não amplia os extremos em v1.6 e até os reduz ligeiramente em relação ao caso de referência, com máximo de 59,9 °C e desvio-padrão de 7,37 °C. Essa resposta sugere redistribuição do calor por alargamento da pluma e aumento do espalhamento lateral, o que pode aliviar o núcleo sem necessariamente melhorar a contenção global.

Em v1.5, a resposta difere em detalhe, mas reforça a leitura de funções complementares. A remoção da compensação eleva o máximo de 51,0 °C para 54,4 °C, enquanto a retirada apenas da cortina mantém os picos próximos do caso de referência, porém com variabilidade mais alta, desvio-padrão de 7,30 °C face a 6,85 °C. O estado mais desfavorável surge quando ambos os dispositivos estão ausentes, com médias e máximos simultaneamente mais elevados e desvio-padrão que atinge 7,72 °C, sinal de um regime mais irregular e propenso a flutuações intensas. Em termos operacionais, essa combinação de extremos mais altos e maior variabilidade amplia a probabilidade de exceder localmente a capacidade de extração e de estabelecer recirculações persistentes na vizinhança do núcleo.

O impacto cumulativo da exposição térmica foi avaliado pelo índice de exposição integrada à temperatura, cujos resultados constam na Tabela 11. Em v1.6, por exemplo, o $\langle IET \rangle$ evoluiu de cerca de 15.000 s·°C no cenário de referência para mais de 18.000 s·°C quando cortina e compensação foram removidas, configurando um acréscimo de quase 20% na carga acumulada. Essa diferença não apenas quantifica o agravamento dos picos já identificados na Tabela 10, mas confirma que a ausência dos dispositivos prolonga a permanência em patamares críticos de temperatura. Em v1.5, o comportamento foi semelhante, com incremento de quase 3.000 s·°C entre os cenários extremos, sinal de que o núcleo da pluma não só concentra os máximos, como também sustenta exposições mais longas a condições severas. Já nos sensores periféricos, as diferenças entre cenários são desprezíveis, reforçando que a influência dos dispositivos auxiliares se limita essencialmente à região central. Esta leitura é particularmente relevante, pois indica que métricas baseadas apenas em médias ou máximos podem subestimar riscos de exposição acumulada, sendo o IEI uma medida mais sensível para caracterizar os impactos operacionais da supressão dos mecanismos auxiliares.

Tabela 11 - Índice de exposição integrada nos pontos v1.0 a v1.6 (Autor, 2025)

Ponto	Ensaio [1]	Ensaio [2]	Ensaio [3]	Ensaio [4]
v1.0	0,0025	2,1271	0,0025	2,8521
v1.1	0,0025	3,7460	0,0025	3,9865
v1.2	1,4293	2,0354	1,6447	2,2774
v1.3	1,8374	1,8769	1,9013	2,0142
v1.4	1,7882	1,7980	1,8858	1,9566
v1.5	15.364,8266	16.451,8496	16.674,1631	18.285,1892
v1.6	14.973,3891	15.631,1074	14.718,5075	16.094,4971

Outro aspeto que aprofunda a interpretação é a homogeneidade espacial, sintetizada pelo desvio-padrão espacial S_{esp} , apresentado na Tabela 12. Em condições ideais, com cortina e compensação ativas, a pluma mantém organização razoável, refletida em valores próximos de 7,6 °C nos pontos centrais. Contudo, a ausência dos dispositivos provoca aumento sistemático desse índice, chegando a 8,2 °C no cenário mais crítico, o que representa uma pluma menos estável e mais sujeita à formação de recirculações. O impacto é ainda mais evidente quando se observa a fração mássica de vapor, cujo desvio-padrão cresce nas mesmas condições, confirmando que a instabilidade térmica se traduz em maior dispersão de poluentes. Isso demonstra que a supressão dos dispositivos auxiliares não compromete apenas a intensidade local, mas também a coerência espacial do escoamento, criando regiões de mistura menos previsíveis e de difícil controlo pela hotte. Em termos práticos, significa que, mesmo que a eficiência global de captura se mantenha próxima do aceitável, a variabilidade espacial aumenta a probabilidade de pontos críticos de fuga, sobretudo junto às bordas da pluma.

Tabela 12 - Homogeneidade espacial de temperatura e fração mássica (Autor, 2025)

	Ponto	Ensaio [1]	Ensaio [2]	Ensaio [3]	Ensaio [4]
$S_{esp} (T)$	v1.0 a v1.4	1,7655	0,0007	1,7210	0,0009
	v1.5 e v1.6	7,6470	7,9221	7,3793	8,1563
$S_{esp} (Y_{H_2O})$	v1.0 a v1.4	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$3,76 \cdot 10^{-11}$	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$
	v1.5 e v1.6	$3,42 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$3,67 \cdot 10^{-3}$

A leitura espacial dos campos de temperatura reforça, de forma visual, os padrões já evidenciados pelas estatísticas. A figura 39a, correspondente ao cenário com cortina e compensação ativas, mostra uma pluma estreita, organizada e orientada verticalmente para a zona de extração. Esta configuração evidencia o papel estruturante dos dispositivos auxiliares: a compensação atua na diluição dos gradientes, enquanto a cortina canaliza o escoamento, reduzindo o espalhamento lateral.

Resultados e Discussão

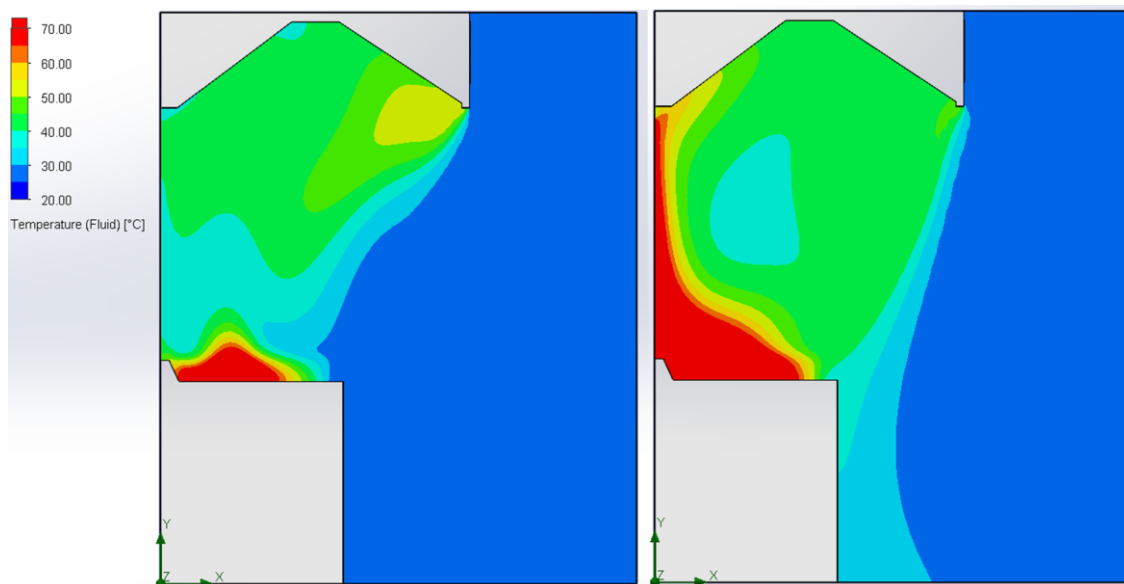


Figura 39 - Pluma térmica: Ensaio [1] (a) e Ensaio [2] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)

Em contraste, a figura 39b, relativa ao ensaio sem cortina e sem compensação, revela uma pluma desorganizada, com expansão lateral acentuada e formação de zonas de recirculação nas margens. A difusão irregular não apenas amplia os gradientes como também gera regiões instáveis de mistura que comprometem a previsibilidade do escoamento. A consequência imediata dessa configuração é a elevação dos valores máximos nos sensores centrais: enquanto o cenário de referência manteve picos em torno de 62 °C, a ausência dos dispositivos elevou-os para mais de 72 °C, acréscimo superior a 10 °C que traduz um regime mais severo e menos controlado. Esse aumento não deve ser interpretado apenas como uma diferença numérica, mas como evidência de risco operacional adicional, uma vez que maiores temperaturas sustentadas intensificam a carga térmica acumulada e elevam a probabilidade de falhas na contenção e de exposição crítica para os ocupantes.

A comparação entre os cenários mostra funções distintas e complementares para cada dispositivo. A compensação atua principalmente na moderação dos extremos térmicos, suavizando os picos que tendem a acumular-se no núcleo da pluma. Já a cortina contribui mais fortemente para a organização espacial, mantendo o jato coeso e reduzindo a dispersão lateral. Quando apenas a compensação é suprimida, a pluma mantém alguma coerência, mas com intensificação dos máximos; quando apenas a cortina é removida, os picos não aumentam de forma tão significativa, mas a instabilidade espacial torna-se mais evidente. A ausência de ambos, portanto, resulta no pior cenário. Esta leitura qualitativa das plumas complementa diretamente os resultados numéricos da Tabela 13, que sintetiza os rendimentos de captação:

Tabela 13 - Eficiência de captação em cada cenário. (Autor, 2025)

Qualidade do ar	η_c (%)
Ensaio [1]	55,56
Ensaio 2]	56,29
Ensaio [3]	53,45
Ensaio [4]	50,29

No caso de referência, a eficiência foi de 55,6%, valor já modesto em termos absolutos, mas que representa o equilíbrio alcançado pela atuação conjunta de cortina e compensação. A retirada isolada da compensação, embora tenha elevado ligeiramente a eficiência calculada para 56,3%, não significa melhoria real, mas sim redistribuição da pluma: parte do escoamento que antes escapava lateralmente passa a ser direcionado para a extração, à custa da intensificação dos picos térmicos e de maior carga acumulada no núcleo. Situação inversa ocorre quando apenas a compensação é mantida: a redução dos máximos é observada, mas a perda da canalização favorece a dispersão lateral, levando a uma queda da eficiência para 53,5%. O pior desempenho global aparece no ensaio sem nenhum dispositivo, no qual a eficiência decai para 50,3%, acompanhada não apenas por instabilidade espacial, mas também pelos picos mais severos registados em toda a série.

4.3. Análise da contenção da pluma

A terceira bateria de simulações (ensaios 5 a 16) foi concebida para avaliar diretamente a contenção da pluma sob diferentes combinações de geometria, critérios de extração e caracterização da emissão. A análise comparativa dos cenários pode ser sintetizada pelo gráfico da média da fração mássica registada nos pontos de monitorização (Figura 40), que revela de forma clara a existência de quatro conjuntos distintos de desempenho.

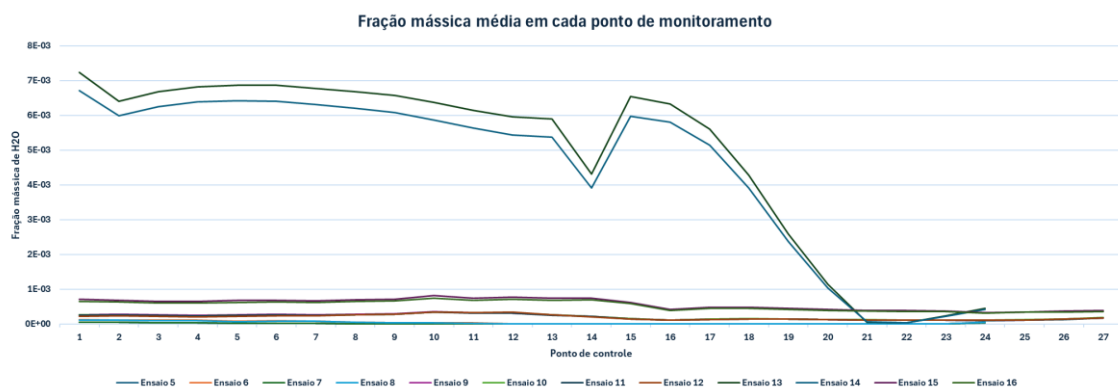


Figura 40 - Média da fração mássica em cada ponto de controle. (Autor, 2025)

Resultados e Discussão

Os ensaios 5 e 6 situam-se no limite inferior de detecção, com valores próximos de 10^{-5} , caracterizando situações de fuga residual, como pode ser visualizado nas Figuras 41a e 41b. Esta resposta, embora coerente com a formulação normativa, reflete sobretudo o caráter idealizado dos cenários, onde a geometria é regular e a emissão é constante. A ausência de variações temporais elimina picos críticos e favorece uma contenção quase integral, mas trata-se de um resultado condicionado a hipóteses simplificadas que raramente se confirmam em cozinhas reais.

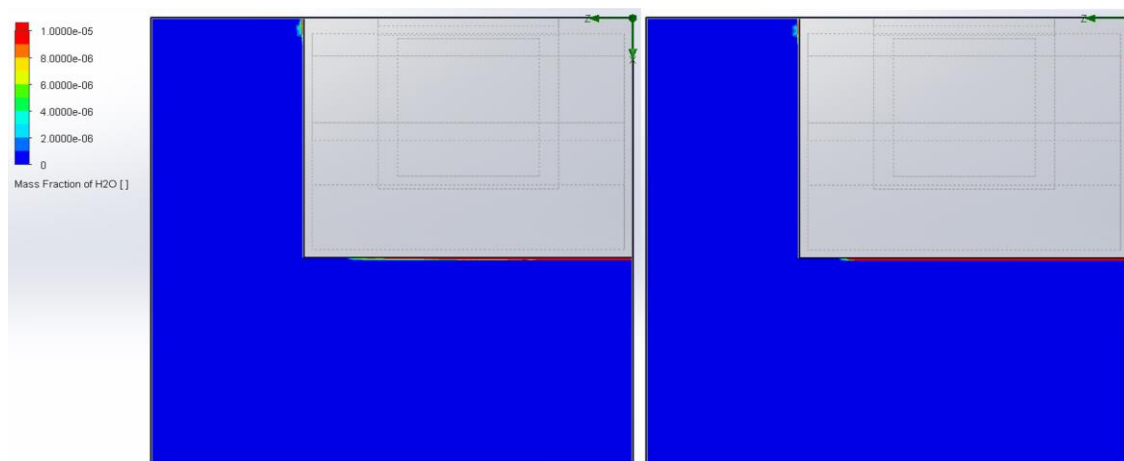


Figura 41 - Ensaio [5] (a) e Ensaio [6] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)

A introdução da emissão experimental, nos ensaios 7 e 8, rompe com essa estabilidade e provoca um salto imediato nos níveis médios, que passam a situar-se na ordem de 10^{-4} . Essa alteração decorre do caráter intermitente da fonte de poluentes, cuja variabilidade temporal gera episódios críticos de maior intensidade. As Figuras 42a e 32b correspondentes ilustram bem esse efeito: ainda que a pluma mantenha organização global satisfatória, surgem zonas de instabilidade que se propagam até à borda, elevando os picos de concentração para além do limite aceitável. Essa discrepância entre médias moderadas e máximos elevados evidencia que os critérios normativos, por se basearem em condições estacionárias, tendem a sobrestimar a eficácia da contenção quando confrontados com emissões reais.

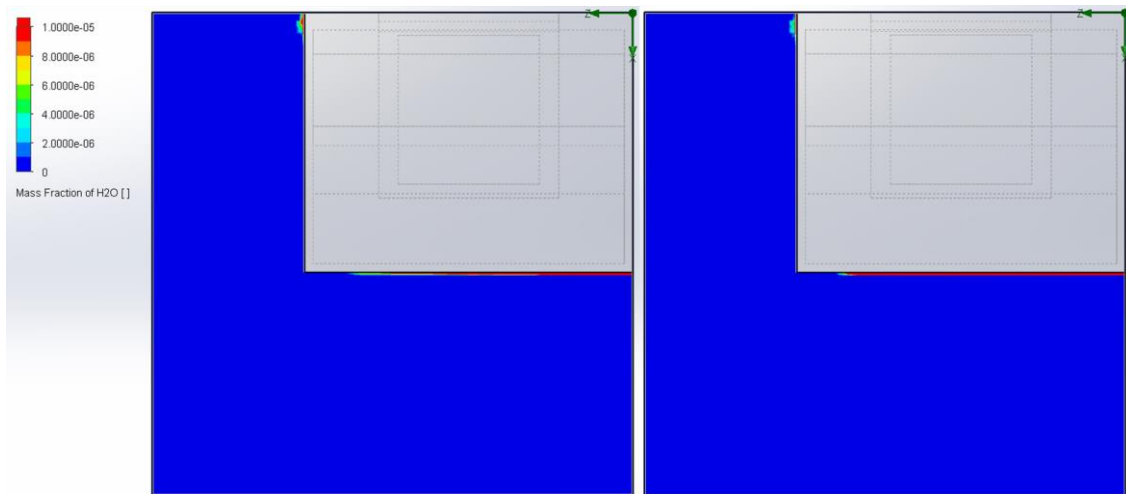


Figura 42 - Ensaio [7] (a) e Ensaio [8] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)

Nos ensaios 9 a 12, em que a geometria experimental foi combinada com os caudais prescritos pela norma, observa-se uma mudança substancial no comportamento da pluma. As médias espaciais evoluem para a ordem de 10^{-3} , acompanhadas por maior dispersão e episódios críticos recorrentes nas regiões periféricas. As Figuras 43a a 43d, que sintetizam os quatro cenários, mostram concentrações mais elevadas junto às bordas, evidenciando recirculações persistentes e bolsões de poluentes em contacto direto com as paredes.

Resultados e Discussão

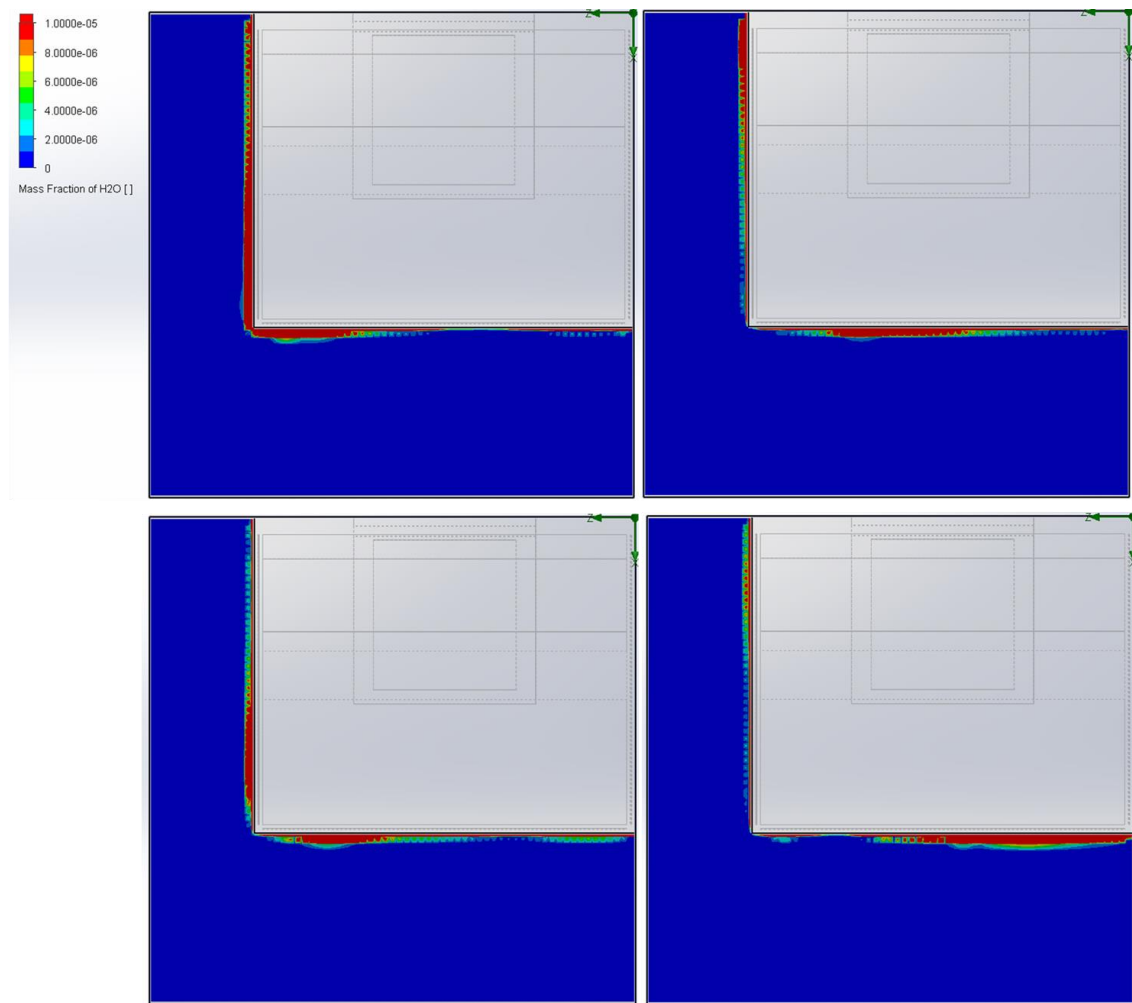


Figura 43 - Ensaio [9] (a), Ensaio [10] (b), Ensaio [11] (c) e Ensaio [12] (d). Autor (FLOEFD 2412, 2025)

A análise do corte lateral do ensaio 9 (Figura 44), representativo também dos ensaios 10, 11 e 12, mostra que a fuga observada está fortemente associada ao aumento da zona de captação. A maior abertura da geometria faz com que a pluma se expanda de forma mais ampla, intensificando o cisalhamento entre o núcleo ascendente e o ar adjacente. Esse processo gera instabilidades turbulentas que desorganizam o jato e criam recirculações localizadas, prolongando o tempo de residência dos contaminantes e favorecendo a sua dispersão para regiões periféricas. Embora a parede contribua para canalizar parte desse escoamento, é a própria ampliação do volume de captura que induz maior turbulência e, em última instância, origina os episódios de fuga. Esse resultado evidencia que a eficiência de contenção não depende apenas do caudal prescrito pela norma, mas também da forma como a geometria de captação condiciona o desenvolvimento da pluma.

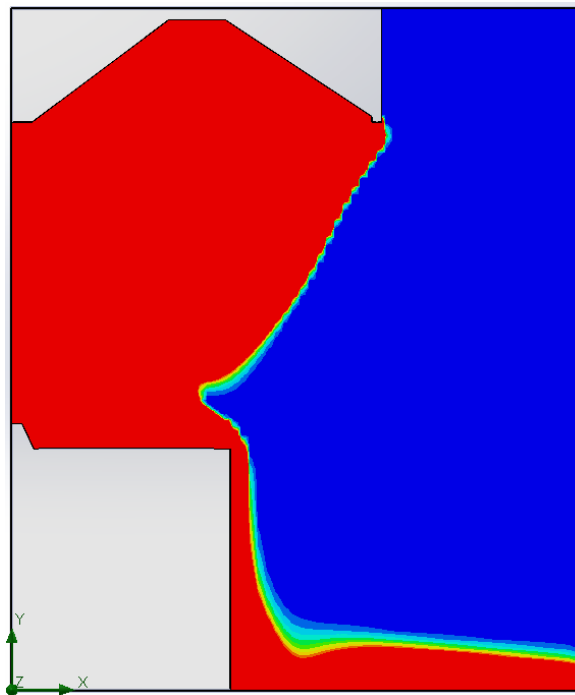


Figura 44 - Expansão da pluma térmica no corte lateral do Ensaio [9]. Autor (FLOEFD 2412, 2025)

O contraste mais marcante surge nos ensaios 13 e 14, onde a extração experimental foi associada à geometria normativa. Esses cenários apresentam concentrações médias na ordem de 10^{-2} , com picos que ultrapassam em muito o critério de fuga residual. As Figuras 45a e 45b evidenciam a perda de coesão da pluma logo após a emissão, que se espalha lateralmente e origina manchas de elevada concentração fora da zona de captação. Os cortes laterais (46a e 46b), por sua vez, revelam um núcleo aparentemente mais centrado e organizado, mas que não encontra suporte no caudal de extração disponível. Tanto para a emissão normativa como para a experimental, a taxa de extração mostra-se insuficiente para acompanhar a carga gerada, o que se traduz em acumulação progressiva sob a hotte e em episódios recorrentes de fuga. Esse contraste entre a forma visualmente contida da pluma e a incapacidade de efetiva captura reforça que a estabilidade geométrica do jato não garante desempenho, sendo a compatibilidade entre extração e emissão o fator determinante. Em última análise, o desajuste entre as grandezas envolvidas rompe a coerência do escoamento, alimenta recirculações e trajetórias caóticas e torna o regime sistematicamente propenso à fuga. Assim, mesmo em geometrias regulares, a inadequação entre extração e emissão evidencia os limites das prescrições normativas simplificadas, incapazes de antecipar a complexidade dinâmica que se manifesta em condições reais de operação.

Resultados e Discussão

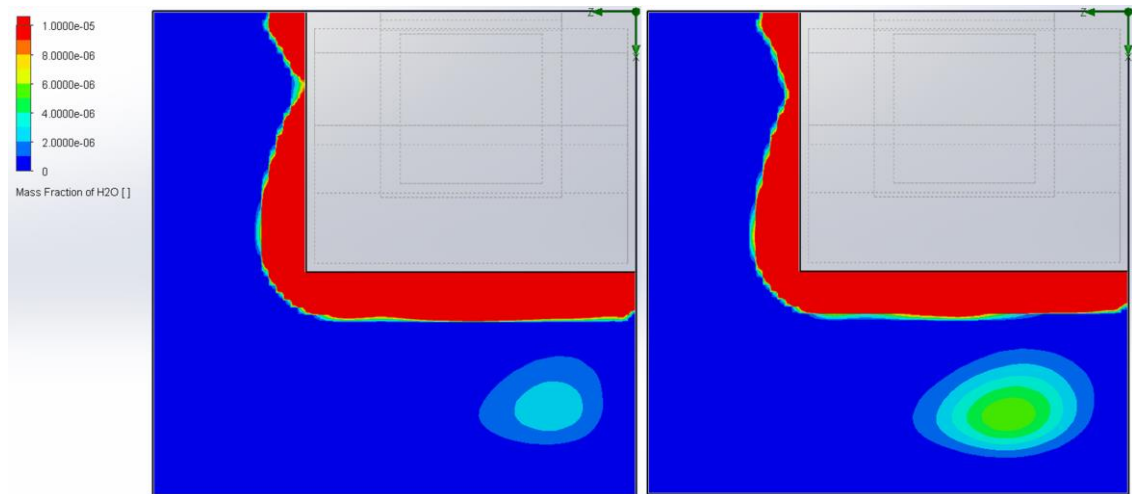


Figura 45 - Ensaio [13] (a) e Ensaio [14] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)

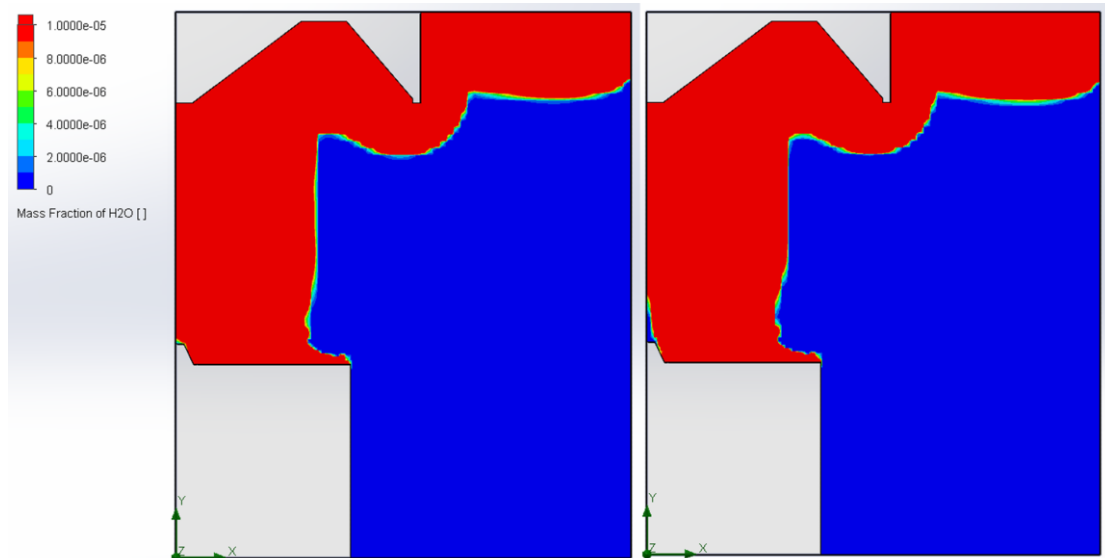


Figura 46 - Vistas laterais: Ensaio [13] (a) e Ensaio [14] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)

Por fim, os ensaios 15 e 16 sintetizam a configuração mais próxima da realidade, em que tanto a geometria como os caudais e a emissão são experimentais. Os resultados situam-se em patamares intermédios, com médias em torno de 10^{-3} e dispersão significativa. As Figuras 47a e 47b mostram instabilidades recorrentes na zona de extração, indicando que, mesmo com extração ajustada às condições experimentais, a variabilidade temporal da emissão e as recirculações impostas pela geometria conduzem inevitavelmente à ocorrência de fugas. Em termos práticos, significa que a contenção perfeita é inalcançável em operação real e que a avaliação do desempenho deve considerar não apenas médias globais, mas também a frequência e a severidade dos episódios críticos.

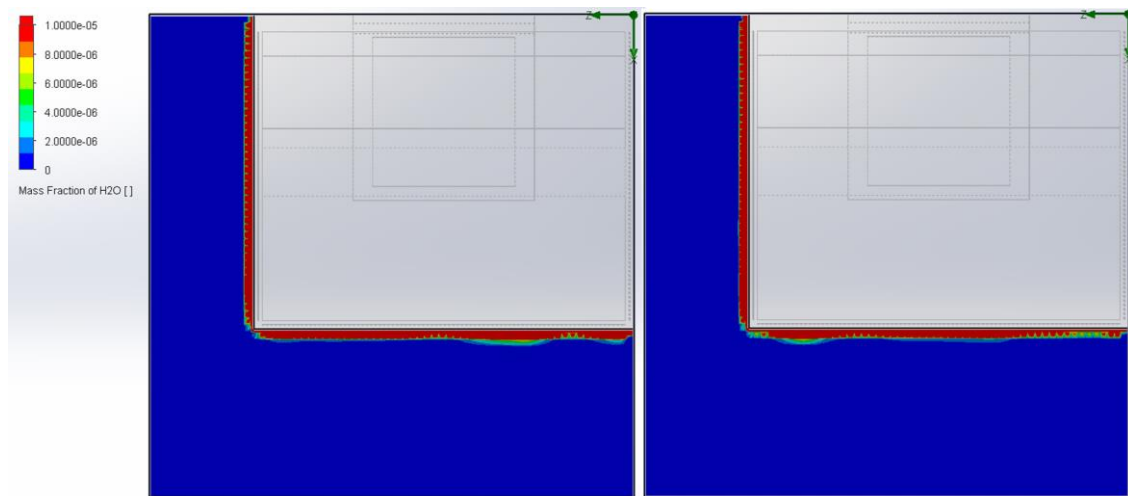


Figura 47 - Ensaio [15] (a) e Ensaio [16] (b). Autor (FLOEFD 2412, 2025)

A leitura integrada deste último bloco metodológico confirma que todos os cenários apresentam algum nível de fuga, revelando que a norma, embora útil como referência preliminar, não garante robustez em condições reais de operação. Fica evidente também que a geometria desempenha um papel determinante na contenção; enquanto a configuração experimental impõe limitações intrínsecas associadas a recirculações e efeitos de parede, a normativa, ao ampliar a zona de captação, induz uma expansão mais ampla da pluma e intensifica a turbulência. Esse quadro é agravado quando a taxa de extração não acompanha a carga poluente emitida, rompendo a coerência do jato e instaurando recirculações persistentes, trajetórias caóticas e episódios de fuga, mesmo em cenários aparentemente organizados. A emissão experimental, ao introduzir variabilidade temporal e picos intermitentes, amplia esse descompasso, evidenciando que o risco operacional está menos ligado ao valor médio do caudal e mais à capacidade do sistema de responder a transitórios intensificados. Em conjunto, os resultados mostram que a contenção perfeita é inalcançável em operação real e que a avaliação do desempenho deve considerar não apenas médias globais, mas também a frequência, a severidade e a natureza das instabilidades que condicionam a propagação da pluma.

Resultados e Discussão

5. Conclusão

O presente capítulo organiza-se em duas partes complementares, concebidas para consolidar e enquadrar o conjunto de evidências reunidas ao longo da investigação. A primeira corresponde às conclusões finais, nas quais os resultados obtidos em laboratório, as simulações numéricas e a confrontação com critérios normativos são integrados numa leitura crítica. Esta etapa permite não apenas avaliar a fidelidade do modelo CFD na reprodução da pluma térmica, mas também destacar o papel estruturante desempenhado pelos dispositivos auxiliares no comportamento do escoamento e questionar a adequação de parâmetros normativos, como o valor de referência para fuga residual, face à complexidade de cozinhas reais.

Na sequência, a análise avança para as limitações e trabalhos futuros, onde se discutem as fronteiras metodológicas que moldaram o estudo e as oportunidades de aprofundamento que dele decorrem. São exploradas as restrições impostas pela instrumentação experimental, pelas simplificações inerentes ao modelo numérico e pelas lacunas identificadas no enquadramento normativo, ao mesmo tempo que se projetam caminhos de continuidade. Entre eles, destacam-se o uso de técnicas de medição mais avançadas, a adoção de simulações de maior fidelidade, a incorporação de variáveis operacionais até aqui pouco consideradas e a ampliação do escopo para diferentes configurações de cozinha.

5.1. Conclusões finais

O presente trabalho procurou compreender, de forma integrada, como normas técnicas, experimentação e simulação numérica podem ser articuladas para avaliar e aprimorar o desempenho dos sistemas de ventilação em cozinhas industriais. A investigação partiu do reconhecimento de que o dimensionamento prescritivo, embora constitua um ponto de partida necessário, é insuficiente para captar a complexidade inerente a estes ambientes, marcados por elevadas cargas térmicas, emissões intermitentes de poluentes, intensa variabilidade operacional e geometrias que frequentemente se afastam das idealizações normativas. Ao longo da pesquisa, cada uma das etapas desenvolvidas revelou aspetos complementares deste problema, permitindo consolidar conclusões que se estendem tanto ao plano específico das simulações realizadas como a reflexões mais amplas sobre a prática de projeto.

A primeira etapa concentrou-se na validação experimental, onde os resultados demonstraram que a modelação CFD, ainda que baseada em modelos RANS, foi capaz de reproduzir os mecanismos dominantes da pluma térmica. O confronto direto entre as séries temporais experimentais e simuladas evidenciou correspondência não apenas qualitativa, mas também

Conclusão

quantitativa, uma vez que os indicadores estatísticos apontaram margens de erro compatíveis com o que a literatura considera aceitável para ambientes internos de elevada complexidade. Esta constatação é fundamental, pois confere legitimidade ao uso da simulação como ferramenta de projeto. Embora se tenham registado desvios em instantes de maior intensidade, especialmente nos picos térmicos, a proximidade global entre experimento e simulação confirma que a metodologia adotada é válida para representar a evolução temporal e a estrutura espacial da pluma, legitimando a sua aplicação em estudos futuros.

Na segunda bateria de ensaios, o foco deslocou-se para os elementos construtivos do sistema de extração, com especial atenção ao papel da cortina de ar e do sistema de compensação. Os resultados obtidos demonstram que tais dispositivos não podem ser entendidos como acessórios opcionais, mas sim como componentes estruturantes da eficiência global do sistema. Enquanto a compensação atuou de modo decisivo na moderação dos picos térmicos, evitando a acumulação excessiva de energia no núcleo da pluma, a cortina de ar organizou o jato ascendente e reduziu a sua dispersão lateral, conferindo maior estabilidade ao escoamento. A ausência simultânea destes dispositivos resultou no pior cenário avaliado, caracterizado por instabilidade espacial, aumento expressivo da carga térmica acumulada e intensificação das recirculações. Tais resultados demonstram que o desempenho da ventilação não se define apenas pela magnitude do caudal de extração, mas sobretudo pela interação entre dispositivos auxiliares e pela forma como estes moldam a pluma desde a sua formação. Este achado tem implicações práticas relevantes, uma vez que orienta projetistas a considerar a hotte como um sistema integrado, em que cada elemento cumpre função complementar, e não como um simples duto de extração.

A terceira bateria de testes, dedicada à contenção da pluma, apresentou os resultados mais críticos e desafiadores. Independentemente da configuração adotada, todos os cenários avaliados apresentaram algum nível de fuga de poluentes, reprovando, portanto, no critério estabelecido de 10^{-5} em fração mássica. Este valor, frequentemente utilizado como referência para fuga residual, mostrou-se inadequado como discriminador absoluto, pois foi sistematicamente ultrapassado em condições experimentais mais próximas da realidade. Esta falha não decorreu de erros de modelação ou limitações metodológicas, mas da própria natureza instável da emissão experimental e das recirculações inerentes ao confinamento da geometria. Assim, os resultados questionam a adequação deste valor como limite de controlo, sugerindo que esse parâmetro, ainda que útil em condições idealizadas, não pode ser aplicado de maneira acrítica a ambientes reais de cozinha. O trabalho mostra, portanto, que critérios normativos excessivamente conservadores ou idealizados podem conduzir a diagnósticos pouco representativos, afastando a análise da realidade prática e comprometendo a credibilidade das recomendações técnicas.

Ao integrar estas três etapas, pode afirmar-se que a pesquisa fornece evidências sólidas em três direções complementares. Em primeiro lugar, a validação experimental confirma que a simulação CFD, quando aplicada com critérios adequados de modelação e análise estatística, constitui ferramenta legítima e fiável para apoiar o dimensionamento de sistemas de ventilação. Em segundo, a avaliação dos dispositivos auxiliares revela que a eficiência da hotte não se limita ao caudal de extração, mas depende de forma crítica da interação entre cortinas

de ar, compensação e geometria do escoamento, o que reforça a necessidade de abordagens sistêmicas e não meramente prescritivas. Em terceiro lugar, a análise da contenção demonstra que a norma EN 16282, embora relevante como guia de projeto, carece de métricas capazes de lidar com a variabilidade transitória e geométrica típica de cozinhas reais, e que a simples adoção de limites fixos não traduz a complexidade operacional observada em campo.

Estas conclusões, tomadas em conjunto, reforçam a ideia de que o dimensionamento da ventilação em cozinhas industriais não pode permanecer preso a práticas baseadas exclusivamente em empirismo ou a prescrições conservadoras. É imperativo avançar para modelos fundamentados em evidências, em que experimentação controlada, simulação numérica e normas técnicas dialoguem de maneira contínua e produtiva. Diante disso, a contribuição central desta dissertação não está em propor um novo referencial normativo acabado, mas em evidenciar que a engenharia aplicada, quando apoiada em metodologias de validação e análise crítica, pode oferecer critérios mais realistas, precisos e alinhados às exigências de segurança ocupacional, eficiência energética e sustentabilidade ambiental.

Do ponto de vista metodológico, o trabalho demonstra que a integração de diferentes abordagens é mais poderosa do que a aplicação isolada de cada uma delas. Em termos práticos, os resultados obtidos oferecem subsídios diretos ao setor de ventilação profissional, confirmando que a engenharia aplicada pode ir além de prescrições rígidas e empirismos acumulados, oferecendo instrumentos mais robustos e adaptáveis ao dimensionamento de sistemas de ventilação. Ainda que aperfeiçoável e aberta a desenvolvimentos futuros, a abordagem aqui consolidada demonstra que é possível alinhar rigor científico, aplicabilidade prática e relevância normativa num mesmo percurso investigativo.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Apesar dos avanços alcançados, a presente investigação apresenta limitações que precisam de ser reconhecidas para situar adequadamente o alcance dos resultados e, ao mesmo tempo, abrir caminhos para a continuidade de pesquisas no tema. Estas limitações não diminuem a relevância das conclusões, mas indicam pontos onde a metodologia poderia ser aprofundada ou complementada, revelando oportunidades de evolução tanto no plano científico como no aplicado.

Do ponto de vista experimental, a principal limitação residiu na natureza da instrumentação utilizada. Os ensaios foram conduzidos em ambiente controlado e com medições fiáveis, mas a utilização de sensores pontuais impediu a captura de fenômenos de microescala, como flutuações instantâneas na camada limite ou gradientes térmicos de alta frequência. Técnicas mais avançadas poderiam permitir um mapeamento completo dos campos de velocidade e temperatura, proporcionando dados mais ricos para a validação dos modelos numéricos e possibilitando a análise de episódios críticos de *spillage* com maior precisão. Assim, investigações futuras poderiam incorporar tais ferramentas para superar a visão parcial oferecida por sensores isolados.

Conclusão

No plano numérico, a escolha pelo *Simcenter FLOEFD* mostrou-se coerente com a realidade operacional e com as necessidades de integração CAD, garantindo viabilidade computacional e continuidade metodológica. No entanto, essa escolha impôs limitações quanto ao detalhamento físico de alguns fenômenos relevantes. Não foram incorporados, por exemplo, efeitos de radiação térmica de forma detalhada, nem a modelação explícita dos processos de evaporação e condensação do vapor. Além disso, a abordagem RANS, embora robusta para estudos de engenharia aplicada, suaviza gradientes intensos e perde sensibilidade em regimes altamente transitórios, o que restringe a sua capacidade de reproduzir fielmente picos e flutuações críticas. Nesse sentido, o uso de ferramentas de código aberto, como o *OpenFOAM*, representa uma via promissora para trabalhos futuros, uma vez que oferece flexibilidade para implementar modelos de transporte multiespécies, acoplamentos termo-hidrodinâmicos mais refinados e abordagens de maior fidelidade, como LES ou híbridos RANS–LES. A adoção desses modelos poderia fornecer parâmetros de calibração para simplificações aplicadas em escala industrial, enriquecendo o diálogo entre simulação e prática.

No campo normativo, a pesquisa também revelou lacunas significativas. A norma EN 16282, embora estruturada e amplamente reconhecida, baseia-se em valores fixos de velocidade ou de caudal que não contemplam adequadamente a variabilidade operacional de cozinhas reais. O critério de 10^{-5} como limite de fuga, frequentemente citado na literatura, mostrou-se excessivamente idealizado, já que nenhum dos cenários experimentais conseguiu cumpri-lo em condições realistas. Este resultado sugere que tal limite é mais adequado como indicador numérico de estabilidade em simulações do que como métrica de desempenho prático. Trabalhos futuros poderiam, portanto, propor métricas alternativas que combinem médias, picos e frequência de ocorrência, aproximando-se da lógica de indicadores de risco utilizados noutras áreas da engenharia. Este avanço teria impacto direto não apenas na revisão de normas técnicas, mas também na formação de projetistas e operadores, oferecendo ferramentas mais representativas para a tomada de decisão.

No plano operacional, algumas dimensões importantes não foram abordadas neste trabalho, mas revelam-se críticas para o desempenho real dos sistemas. A influência da climatização do ambiente, por exemplo, não foi explorada, ainda que seja evidente que fluxos de ar condicionado podem alterar significativamente a difusão da pluma térmica e a eficiência de captura da hotte. Do mesmo modo, a circulação de pessoas, a abertura de portas e perturbações externas constituem fatores de instabilidade que raramente são incorporados em dimensionamentos, mas que têm potencial para comprometer a contenção de poluentes. A degradação progressiva dos sistemas, seja pela saturação de filtros, pela acumulação de gordura em dutos ou pelo desgaste de ventiladores, também representa um desafio prático, pois compromete a eficácia da ventilação ao longo do tempo, mesmo quando o projeto inicial é adequado. Incorporar estas variáveis em experiências ou em simulações futuras poderia aproximar ainda mais a análise das condições reais de operação.

Finalmente, no plano metodológico, esta dissertação limitou-se a uma configuração específica, baseada num único tipo de hotte e grelhador, o que restringe a generalização dos resultados. Embora suficiente para validar a metodologia proposta, esse recorte não contempla a diversidade de layouts, equipamentos e estilos de confeção que caracterizam as cozinhas

Conclusão

industriais. Investigações futuras poderiam ampliar o escopo para diferentes geometrias, múltiplas fontes de calor e instalações de maior escala, de modo a testar a robustez das conclusões em contextos variados.

Em síntese, as limitações aqui reconhecidas não devem ser vistas como fragilidades do trabalho, mas como pontos de partida para a sua continuidade, em que cada uma delas revela oportunidades de aprofundamento científico e técnico, seja pela ampliação da capacidade experimental, pela sofisticação dos modelos numéricos, pela revisão crítica das normas vigentes ou pela incorporação de variáveis operacionais e metodológicas mais próximas da realidade.

Conclusão

Referências

- Ababio, B. A., Nkansah, M. A., Hogarh, J. N., Agyekum, T. P., & Commeh, M. K. (2024). Gaseous air quality and health risk assessment of high school kitchens in the Kumasi Metropolis. *Environmental Advances*, 17, 100576. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100576>
- Alves, C. A., Evtugina, M., Vicente, E., Vicente, A., Gonçalves, C., Neto, A. I., Nunes, T., & Kováts, N. (2022). Outdoor charcoal grilling: Particulate and gas-phase emissions, organic speciation and ecotoxicological assessment. *Atmospheric Environment*, 285, 119240. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119240>
- Alves, C. A., Vicente, E. D., Evtugina, M., Vicente, A. M. P., Sainnokhoi, T.-A., & Kováts, N. (2021). Cooking activities in a domestic kitchen: Chemical and toxicological profiling of emissions. *Science of The Total Environment*, 772, 145412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145412>
- Amouei Torkmahalleh, M., Gorjinezhad, S., Unluevcek, H. S., & Hopke, P. K. (2017). Review of factors impacting emission/concentration of cooking generated particulate matter. *Science of The Total Environment*, 586, 1046–1056. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.088>
- ASHRAE. (2016). Standard 62.1-2016: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Em ASHRAE Standards.
- ASHRAE. (2018). Standard 180-2018: Standard Practice for Inspection and Maintenance of Commercial Building HVAC Systems.
- ASTM International. (2018). ASTM E3087-18: Standard Test Method for Measuring Capture Efficiency of Domestic Range Hoods.

Referências

- Atamaleki, A., Asadi, Z. S., & Moradinia, M. (2024). Quantification and probabilistic health risk assessment of benzene series compounds emitted from cooking process in restaurant kitchens. *Building and Environment*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112100>
- Awbi, H. B. (2015). Ventilation and Air Distribution Systems in Buildings. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 1. <https://doi.org/10.3389/fmech.2015.00004>
- Bartolozzi, G., Palma, G., & Rizzo, A. (2024). Energy saving starts in the kitchen. *Energy and Buildings*, 322, 114726. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114726>
- Benchikh Le Hocine, A. E., Poncet, S., & Fellouah, H. (2020). CFD modeling of the CO₂ capture by range hood in a full-scale kitchen. *Building and Environment*, 183, 107168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107168>
- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., & Raad, P. E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 130(7), 0780011–0780014. <https://doi.org/10.1115/1.2960953>
- CEN. (2016). EN 16282: Equipment for commercial kitchens.
- Chen, H. J., Moshfegh, B., & Cehlin, M. (2013). Investigation on the flow and thermal behavior of impinging jet ventilation systems in an office with different heat loads. *Building and Environment*, 59, 127–144. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.014>
- Chen, Q. (1995). Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 28(3), 353–369. <https://doi.org/10.1080/10407799508928838>
- Chen, Q., & Srebric, J. (2002). A procedure for verification, validation, and reporting of indoor environment CFD analyses. *HVAC and R Research*, 8(2), 201–216. <https://doi.org/10.1080/10789669.2002.10391437>

Referências

- Chen, S. W., Chang, C. Y., & Chan, Y. C. (2025). Assessing the impact of kitchen hoods and ventilation openings on indoor air quality post-cooking. *Journal of Building Engineering*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111721>
- Chen, Z., Xin, J., & Liu, P. (2020). Air quality and thermal comfort analysis of kitchen environment with CFD simulation and experimental calibration. *Building and Environment*, 172, 106691. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106691>
- Cheng, S., Wang, G., Lang, J., Wen, W., Wang, X., & Yao, S. (2016). Characterization of volatile organic compounds from different cooking emissions. *Atmospheric Environment*, 145, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.037>
- Clark, J. D., Rojas, G., & Walker, I. S. (2018). Towards the development of a standardized testing protocol for overhead island kitchen exhaust devices: Procedures, measurements and paths forward. *Building and Environment*, 142, 301–311. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.023>
- Code du Travail, Pub. L. No. Article 235-5-7, *Journal Officiel de la République Française* (2008). https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006647568
- Ding, M., Zhang, S., Wang, J., Ye, F., & Chen, Z. (2023). Study on Spatial and Temporal Distribution Characteristics of the Cooking Oil Fume Particulate and Carbon Dioxide Based on CFD and Experimental Analyses. *Atmosphere*, 14(10), 1522. <https://doi.org/10.3390/atmos14101522>
- Diretiva 2012/27/UE, Pub. L. No. 2012/27/UE, *Jornal Oficial da União Europeia* L 315/1 (2012). <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/27/oj>
- Dobbin, N. A., Sun, L., Wallace, L., Kulka, R., You, H., Shin, T., Aubin, D., St-Jean, M., & Singer, B. C. (2018). The benefit of kitchen exhaust fan use after cooking - An experimental assessment. *Building and Environment*, 135, 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.039>
- Du, B., Gao, J., Chen, J., Stevanovic, S., Ristovski, Z., Wang, L., & Wang, L. (2017). Particle exposure level and potential health risks of domestic Chinese cooking. *Building and Environment*, 123, 564–574. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.031>

Referências

- Emmerich, S. J., & McGrattan, K. B. (1998). Application of a Large Eddy Simulation Model to Study Room Airflow.pdf. ASHRAE Transactions.
- EPA. (2018). Technical Guide for Volatile Organic Compounds in Air. Em United States Environmental Protection Agency. EPA.
- EPA. (2021). National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. Em United States Environmental Protection Agency. EPA.
- Etheridge, D., & Sandberg, M. (2020). Building Ventilation: Theory and Measurement (Second Edition). John Wiley & Sons.
- Fasiuddin, M., & Budaiwi, I. (2011). HVAC system strategies for energy conservation in commercial buildings in Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 43(12), 3457–3466. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.004>
- Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics* (Springer, Ed.; 4th ed.). <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-99693-6>
- Figueiredo, D., Vicente, E. D., Gonçalves, C., Lopes, I., Oliveira, H., & Alves, C. A. (2024). Outdoor charcoal combustion in barbecue grills: Potential cytotoxic, oxidative stress and mutagenic effects. *Atmospheric Environment*, 322, 120383. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120383>
- France Air. (2025). France Air s'engage - Catalogue 25/26. https://it2v7.interactiv-doc.fr/html/guide_france_air_880/.
- Gao, J., Cao, C., Wang, L., Song, T., Zhou, X., Yang, J., & Zhang, X. (2013). Determination of Size-Dependent Source Emission Rate of Cooking-Generated Aerosol Particles at the Oil-Heating Stage in an Experimental Kitchen. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(2), 488–496. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.09.0238>
- Gao, N. P., Niu, J. L., Perino, M., & Heiselberg, P. (2008). The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings: Tracer gas simulation. *Building and Environment*, 43(11), 1805–1817. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.023>

Referências

- GRESILVA. (2025). Catálogo Técnico GHPI 2/600. <https://www.gresilva.pt/produtos/gre-lhador-ghpi-2-600/>.
- Han, D., Zhang, T., Qin, Y., & Tan, Y. (2022). Experimental study on thermal plume characteristics of building façades based on PIV technology. *Sustainable Cities and Society*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103589>
- Han, O., Li, A., & Kosonen, R. (2019). Hood performance and capture efficiency of kitchens: A review. *Building and Environment*, 161, 106221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106221>
- Huang, X., Han, D., Cheng, J., Chen, X., Zhou, Y., Liao, H., Dong, W., & Yuan, C. (2020). Characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds (VOCs) in restaurants in Shanghai. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(1), 490–499. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06881-6>
- IARC. (2013). Some Drugs and Herbal Products (Vol. 108). International Agency for Research on Cancer. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Formaldehyde-2-Butoxyethanol-And-1-Tert-Butoxypropan-2-ol-2006>
- IPQ. (2007). NP EN 13779:2007 – Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.
- IPQ. (2017). NP EN 16282-1:2017 – Equipamentos para cozinhas profissionais – Componentes para ventilação – Requisitos gerais, incluindo cálculo e projeto.
- IPQ. (2019). NP EN 16798-1:2019 – Ventilation for buildings – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- Iwaro, J., & Mwashia, A. (2010). A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries. *Energy Policy*, 38(12), 7744–7755. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.027>

Referências

- Kosonen, R., Koskela, H., & Saarinen, P. (2006a). Thermal plumes of kitchen appliances: Cooking mode. *Energy and Buildings*, 38(10), 1141–1148. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.01.003>
- Kosonen, R., Koskela, H., & Saarinen, P. (2006b). Thermal plumes of kitchen appliances: Idle mode. *Energy and Buildings*, 38(9), 1130–1139. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.01.002>
- Kosonen, R., & Mustakallio, P. (2003). The Influence of a Capture Jet on the Efficiency of a Ventilated Ceiling in a Commercial Kitchen. *International Journal of Ventilation*, 1(3), 189–199. <https://doi.org/10.1080/14733315.2003.11683634>
- Leonard, B. P. (1979). A STABLE AND ACCURATE CONVECTIVE MODELLING PROCEDURE BASED ON QUADRATIC UPSTREAM INTERPOLATION. Em *COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING* (Vol. 19). [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90034-3)
- Li, A., Zhao, Y., Wang, Z., & Gao, R. (2014). Capture and Containment Efficiency of the Exhaust Hood in a Typical Chinese Commercial Kitchen with Air Curtain Ventilation. *International Journal of Ventilation*, 13(3), 221–234. <https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684050>
- Li, J., Liu, A., Yu, L., Meng, C., Ma, Y., & Dong, J. (2024). Influence and optimal operating parameters of slit make-up air system on low-energy kitchen environment. *Journal of Building Engineering*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110016>
- Li, Y.-C., Shu, M., Ho, S. S. H., Wang, C., Cao, J.-J., Wang, G.-H., Wang, X.-X., Wang, K., & Zhao, X.-Q. (2015). Characteristics of PM_{2.5} emitted from different cooking activities in China. *Atmospheric Research*, 166, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.010>
- Liang, Q., Yu, Y., Cao, C., Hou, Y., Zhou, J., Gao, J., Li, B., & Wang, J. (2024). Constant static pressure strategy for residential kitchen exhaust system: Deducing control parameters from required exhaust rate and non-distributed data transmission. *Building and Environment*, 259, 111642. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111642>

Referências

- Lu, F., Shen, B., Li, S., Liu, L., Zhao, P., & Si, M. (2021). Exposure characteristics and risk assessment of VOCs from Chinese residential cooking. *Journal of Environmental Management*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112535>
- Lu, F., Shen, B., Yuan, P., Li, S., Sun, Y., & Mei, X. (2019). The emission of PM_{2.5} in respiratory zone from Chinese family cooking and its health effect. *Science of The Total Environment*, 654, 671–677. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.397>
- Lunden, M. M., Delp, W. W., & Singer, B. C. (2015). Capture efficiency of cooking-related fine and ultrafine particles by residential exhaust hoods. *Indoor Air*, 25(1), 45–58. <https://doi.org/10.1111/ina.12118>
- Mak, C. M., & Yik, F. W. H. (2002). A Study of Natural Ventilation in a Kitchen Using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Architectural Science Review*, 45(3), 183–190. <https://doi.org/10.1080/00038628.2002.9697509>
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Mentor, G. C. (2024). *Simcenter FLOEFD 2412 Technical Reference Manual*.
- Moran, M. J. ; S. H. N. (2020). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (Wiley, Ed.; 8.a ed.).
- Morawska, L., & Cao, J. (2020). Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Em Environment International* (Vol. 139). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (1983). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. *Em Transactions of the ASABE* (Vol. 50, Número 3).
- Mudie, S., Essah, E. A., Grandison, A., & Felgate, R. (2014). Electricity use in the commercial kitchen. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11(1), 66–74. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt068>

Referências

- Oberkampf, W. L., & Roy, C. J. (2010). *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511760396>
- OSHA. (2023). Occupational Safety and Health Standards. Em Code of Federal Regulations (1910.1000). OSHA.
- Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>
- Peter V. Nielsen. (1998). The Selection of Turbulence Models for Prediction of Room Airflow (Vol. 104). ASHRAE Transactions.
- Pikmann, J., Drewnick, F., Fachinger, F., & Borrmann, S. (2023). Particulate emissions from cooking activities: emission factors, emission dynamics, and mass spectrometric analysis for different preparation methods. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2172>
- Règlement Sanitaire Départemental, Pub. L. No. Article 63-1, Journal Officiel de la République Française (1979). https://www.legifrance.gouv.fr/loda/article_lc/LEGIARTI000006363928
- República Portuguesa. (2020). Decreto-Lei n.º 101-D. [chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://files.dre.pt/1s/2020/12/23701/0002100045.pdf](https://files.dre.pt/1s/2020/12/23701/0002100045.pdf)
- República Portuguesa. (2021). Portaria n.º 138-G. Em Diário da República, 2.ª série, n.º 127. Diário da República Eletrónico. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/138-g-2021-166296490>
- Rim, D., Wallace, L., & Persily, A. (2012). Reduction of Exposure to Ultrafine Particles by Kitchen Exhaust Fans of Varying Flow Rates. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=907768
- Roache, P. J. . (2009). *Fundamentals of verification and validation*. Hermosa Publishers.

Referências

- Schraufnagel, D. E., Balmes, J. R., Cowl, C. T., De Matteis, S., Jung, S. H., Mortimer, K., Perez-Padilla, R., Rice, M. B., Riojas-Rodriguez, H., Sood, A., Thurston, G. D., To, T., Vanker, A., & Wuebbles, D. J. (2019). Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 1: The Damaging Effects of Air Pollution. *Em Chest* (Vol. 155, Número 2, pp. 409–416). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.042>
- Seppänen, O. A., Seppänen, S., Fisk, W. J., & Mendell, M. J. (1999). Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x>
- Song, Y., Chen, X., Zhang, Z., Cao, S., Du, T., & Guo, H. (2022). Studies on the control of kitchen pollutants by exhaust hood with air-filled slots. *Journal of Building Engineering*, 48, 103891. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103891>
- To, W. M., & Yeung, L. L. (2011). Effect of Fuels on Cooking Fume Emissions. *Indoor and Built Environment*, 20(5), 555–563. <https://doi.org/10.1177/1420326X11409462>
- Torkmahalleh, M. A., Gorjinezhad, S., Keles, M., Unluevcek, H. S., Azgin, C., Cihan, E., Tanis, B., Soy, N., Ozaslan, N., Ozturk, F., & Hopke, P. K. (2017). A controlled study for the characterization of PM_{2.5} emitted during grilling ground beef meat. *Journal of Aerosol Science*, 103, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.10.011>
- Vainiotalo, S., & Matveinen, K. (1993). COOKING FUMES AS A HYGIENIC PROBLEM IN THE FOOD AND CATERING INDUSTRIES. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 54(7), 376–382. <https://doi.org/10.1080/15298669391354838>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition* (Pearson Education, Ed.; 2nd ed.). www.pearsoned.co.uk/versteeg
- Vicente, A. M. P., Rocha, S., Duarte, M., Moreira, R., Nunes, T., & Alves, C. A. (2021). Fingerprinting and emission rates of particulate organic compounds from typical restaurants in Portugal. *Science of The Total Environment*, 778, 146090. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146090>

Referências

- Wang, L., Xiang, Z., Stevanovic, S., Ristovski, Z., Salimi, F., Gao, J., Wang, H., & Li, L. (2017). Role of Chinese cooking emissions on ambient air quality and human health. *Science of The Total Environment*, 589, 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.124>
- Waring, M. S., & Siegel, J. A. (2011). The effect of an ion generator on indoor air quality in a residential room. *Indoor Air*, 21(4), 267–276. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00696.x>
- WHO. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Wilcox, D. C. . (2010). Turbulence modeling for CFD. DCW Industries.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). CLIMATE RESEARCH Clim Res. <https://doi.org/https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Yakhot, V., & Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence (Vol. 57). <https://doi.org/10.1007/BF01061452>
- Yu, G., Zhang, G., Poslad, S., Fan, Y., & Xu, X. (2024). A study of quantifying the influence of kitchen human activity on indoor air quality dynamics. *Environmental Pollution*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124900>
- Zhang, C., Yang, F., Xia, Y., He, L., Yu, Y., Zeng, L., Cao, C., & Gao, J. (2024). Make-up air optimization and demand exhaust rate of commercial kitchens under multiple cookers operation. *Journal of Building Engineering*, 89, 109274. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109274>
- Zhang, H., Cheng, X., Pan, W., Liu, S., Zhang, M., Long, Z., Zhang, T., & Chen, Q. (2017). Experimental study of relative exposure to particles transmitted from kitchen in an apartment. *Procedia Engineering*, 205, 3830–3837. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.079>

Referências

- Zhang, S., Huang, X., Li, A., Yu, B., Jiang, Y., Peng, L., & Chen, Z. (2024). Improving kitchen thermal comfort in summer based on optimization of airflow distribution. *Journal of Building Engineering*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110614>
- Zhang, S., Shen, Z., & Chen, Z. (2025). Optimization strategy for joint operation of kitchen air-conditioning and fan based on energy consumption and comfort. *Building and Environment*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112919>
- Zhang, Z., Zhang, W., Zhai, Z. J., & Chen, Q. Y. (2007). Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 2—comparison with experimental data from literature. *HVAC and R Research*, 13(6), 871–886. <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10391460>
- Zhao, Y., Liu, L., Tao, P., Zhang, B., Huan, C., Zhang, X., & Wang, M. (2019). Review of Effluents and Health Effects of Cooking and the Performance of Kitchen Ventilation. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(8), 1937–1959. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0198>
- Zhao, Y., & Zhao, B. (2018). Emissions of air pollutants from Chinese cooking: A literature review. *Em Building Simulation* (Vol. 11, Número 5, pp. 977–995). Tsinghua University Press. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0456-6>
- Zhao, Y., Zhao, D., Zhang, B., Chen, L., & Xue, H. (2017). Correction and analysis of calculation equations of the thermal plume above kitchen appliances. *Procedia Engineering*, 205, 1186–1192. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.346>

Referências

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: Alisson Santos Silva

ISEP, Porto, 10 de Outubro de 2025

