Encontro Nacional do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP - 2026

Avaliação Energética e de Emissões em um Motor Aeronáutico utilizando Hidrogênio

Pedro Afonso Cassani Martins

Orientadores: Marcos Sebastião de Paula Gomes e Florian Alain Yannick Pradelle

PRH 10/PUC-Rio

Tipo de Bolsa: Mestrado

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Gestão:

Roteiro da Apresentação

01
Motivação e Objetivos
Por que hidrogênio? Metas da ICAO para 2050.

02
Combustor e Configuração CFD
Geometria, malha, modelos e condições de contorno.

03
Verificação do Modelo
Comparação com Mark & Selwyn (2016).

04
Campos de Escoamento e Térmicos
Contornos de velocidade, pressão e temperatura.

05
Análise de Emissões
NO_x, H_2O, CO_2eq — comparação direta.

06
Envelope Operacional do H_2 + RSM
Fatorial com 9 casos + superfícies de resposta.

07
Ciclo de Vida Well-to-Wake
EI a partir do CFD + rotas WtT (GREET 2022).

08
Conclusões
Compromissos, limitações e próximos passos.

Por que Hidrogênio na Aviação?

2.5%

do CO_2 global
vem da aviação

4×

maior impacto
climático (não-CO_2)

2050

meta net-zero
da ICAO

2.8×

maior energia
gravimétrica (H_2)

A aviação responde por ≈2.5% do CO_2 global, mas seu forçamento climático total é 4× maior quando se incluem NO_x, fuligem, H_2O e contrails. **A ICAO tem como meta emissões líquidas zero até 2050, via CORSIA.** Entre as rotas de descarbonização (SAF, elétrica, hidrogênio), o H_2 atrai a atenção da Airbus (ZEROe), da CFM International (RISE) e da Embraer (Energia) por suas emissões diretas de carbono quase nulas e densidade energética gravimétrica 3× maior, mas suas características de combustão diferem muito das do Jet-A.

- Primeiro, hidrogênio e Jet-A foram comparados em condições operacionais equivalentes. Depois, a viabilidade do hidrogênio foi avaliada variando as vazões mássicas de ar e de combustível.
- Avaliar os principais parâmetros de escoamento e térmicos, incluindo os campos de temperatura, pressão e velocidade;
- Analisar as emissões de poluentes, incluindo $NO_x, N_2O, CO, CH_4, CO_2, H_2O$ e fuligem;

H_2 vs. Jet-A — Principais Propriedades de Combustão

Propriedade	H_2	Jet-A
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	119.96	42.8
Limite de inflamabilidade no ar (% vol.)	4.0 – 75	0.6 – 4.7
Energia mínima de ignição (mJ)	0.017	0.25
Temperatura mínima de autoignição (K)	858	> 500
Temperatura adiabática de chama no ar (K)	2318	2200
Velocidade máxima de queima (m/s)	3.46	< 0.5

Vantagens

· Maior densidade energética
· Inflamabilidade mais ampla
· Ignição mais rápida

Desafios

· Risco de flashback
· Chama mais quente → mais NO_x ·

Geometria do Combustor e Domínio Computacional



Figura 1. Seção meridional 2D axissimétrica da câmara de combustão e adaptação do duto final.

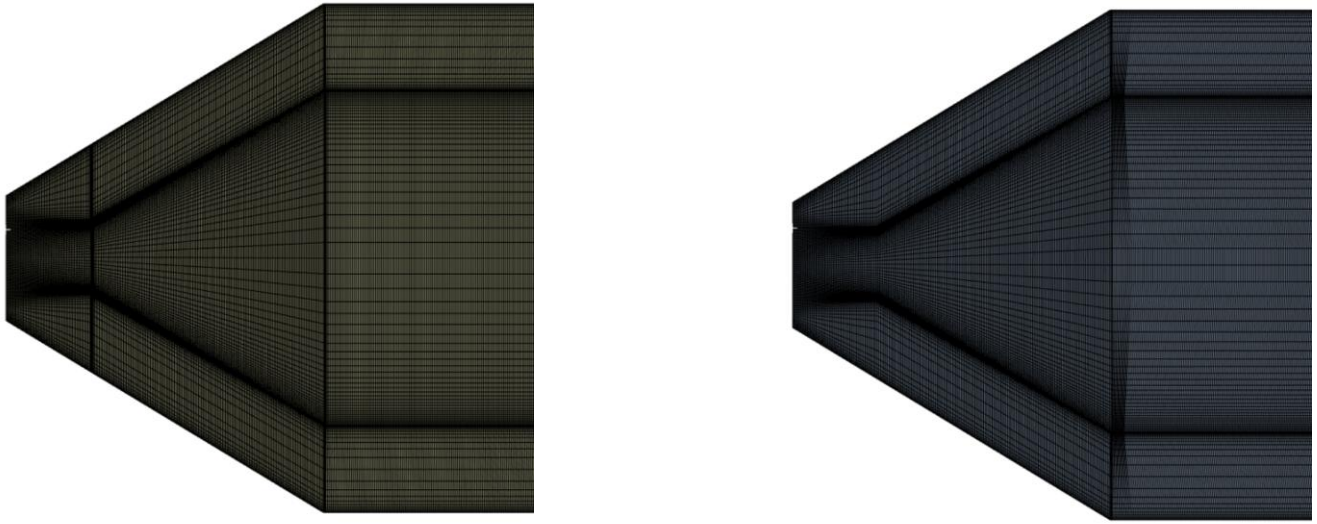


Figura 2. Malha estruturada quadrilateral, região do injetor (configuração querosene e hidrogênio).

Referência	**Mark & Selwyn (2016)**
$\dot{m}$ de ar na entrada	**28.71 kg/s**
T_3 / P_3	**743 K / 2.08 MPa**
$\dot{m}$ de Jet-A	**0.258 kg/s (DPM)**
$\dot{m}$ H_2	**0.10 kg/s (termo fonte)**
Domínio	**2D axissimétrico**
Malha	**~208 mil elementos quadrilaterais**
Qualidade da malha	**Ortog. média = 0.99**
Faixa de y^+	**34.8 – 36.2**

Modelos Físicos e Métodos Numéricos

Turbulência

k–ε padrão
$C\mu=0.09 \cdot C_1\varepsilon=1.44 \cdot C_2\varepsilon=1.92$
Funções de parede padrão (y^+ 35–36)

Combustão

PDF não pré-misturada
(tabela de equilíbrio químico)
Tabela com 20 espécies

NO_x

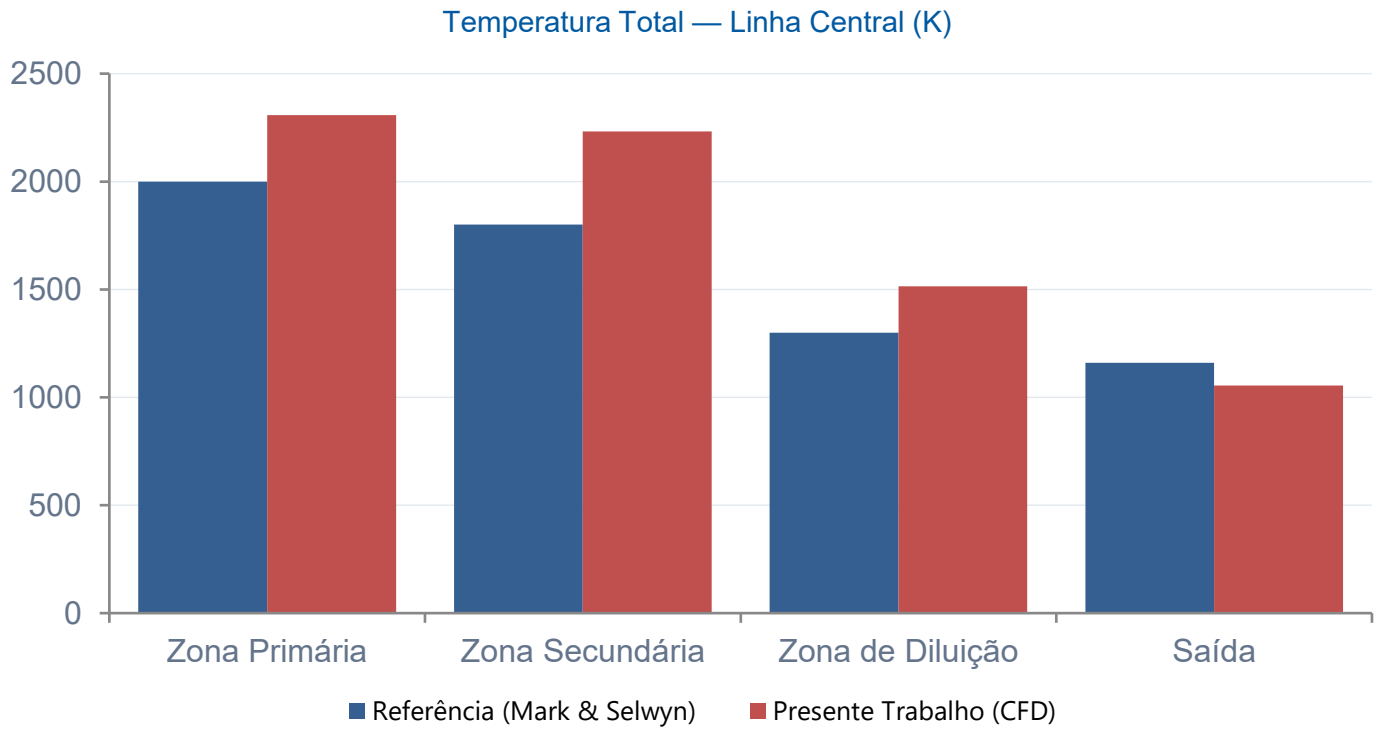
NO térmico: Zeldovich (T>1800 K)
NO imediato: Fenimore (apenas Jet-A)
Via intermediária do N_2O (H_2 e Jet-A)

Fuligem / Rad.

Moss–Brookes + oxidação de Lee
(apenas Jet-A)
Radiação por Ordenadas Discretas (DO)
Propriedades do gás por WSGG

Solver: P-V acoplado · upwind de 2ª ordem · critério de resíduo 10^{-6} · 1500 iterações · verificação por GCI (Celik et al. 2008)

Verificação do Modelo com Mark & Selwyn (2016)



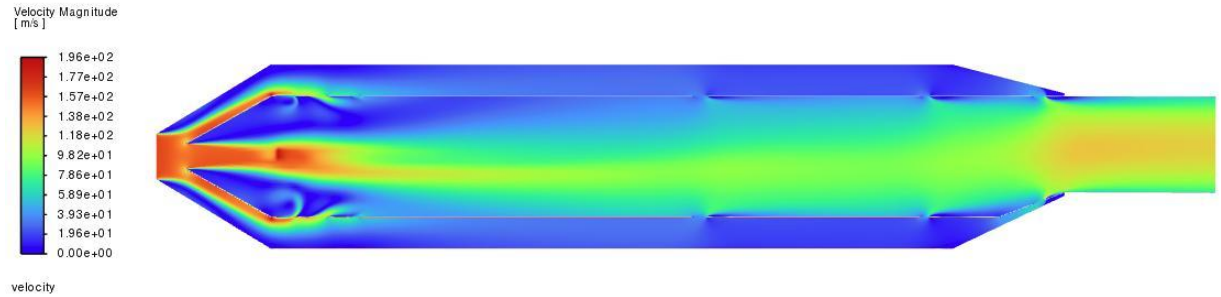
Parâmetro	Jet-A	H_2
Variável monitorada	T média na saída	T máx. no domínio
Tamanhos de malha (mil elementos)	105 / 208 / 303	105 / 208 / 303
Ordem aparente p	7.06	6.96
GCI (malha fina)	0.0095%	0.0096%
Qualidade ortogonal	0.99	0.99

Pressão: desvio < 4.2%
Temperatura: 9–18% (sem swirler → mistura reduzida)

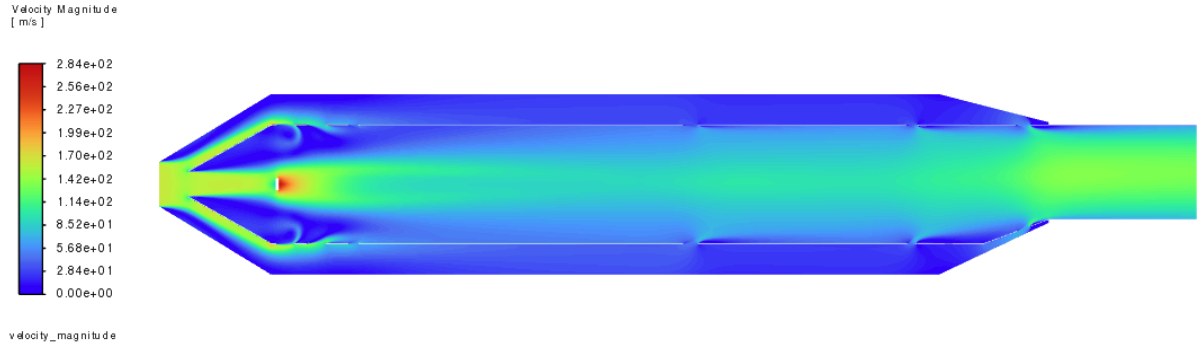
O gráfico mostra superestimação de T na zona primária (sem mistura do swirler), tendência axial correta e leve subestimação na saída — qualitativamente válido para o estudo comparativo H_2/Jet-A.

Contornos de Magnitude de Velocidade

JET-A



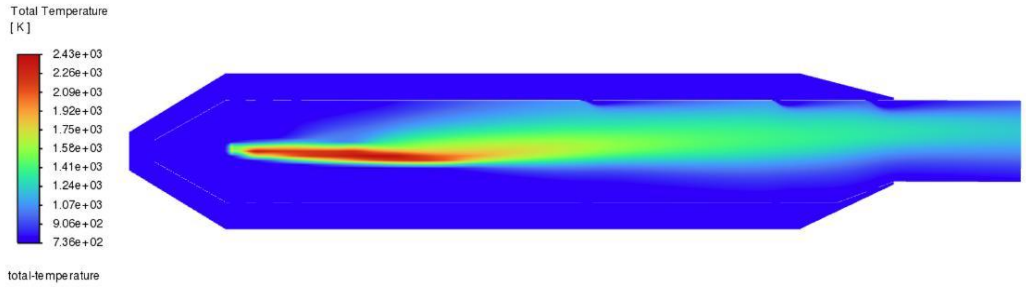
HIDROGÊNIO



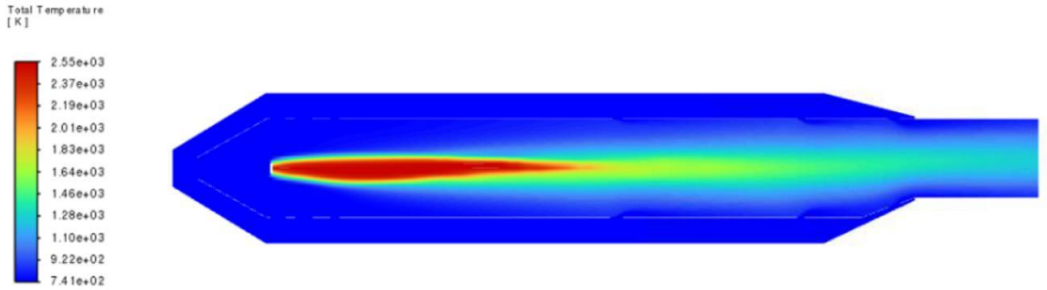
- Topologia semelhante: núcleo de alta velocidade + zonas de recirculação junto ao domo nos dois combustíveis.
- Pico de injeção do H_2: ~280 m/s vs ~170–200 m/s no Jet-A — menor densidade → maior vazão volumétrica.
- Velocidade na saída: 113.7 m/s (H_2) vs 106.8 m/s (Jet-A) — 6.5% maior, devido à T mais alta.

Contornos de Temperatura Total

JET-A — Pico: 2430 K | Saída: 1055 K



HIDROGÊNIO — Pico: 2550 K | Saída: 1081 K

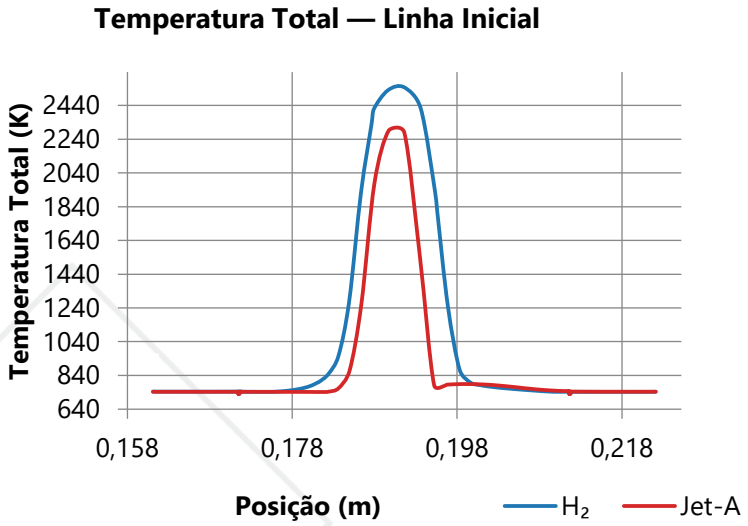


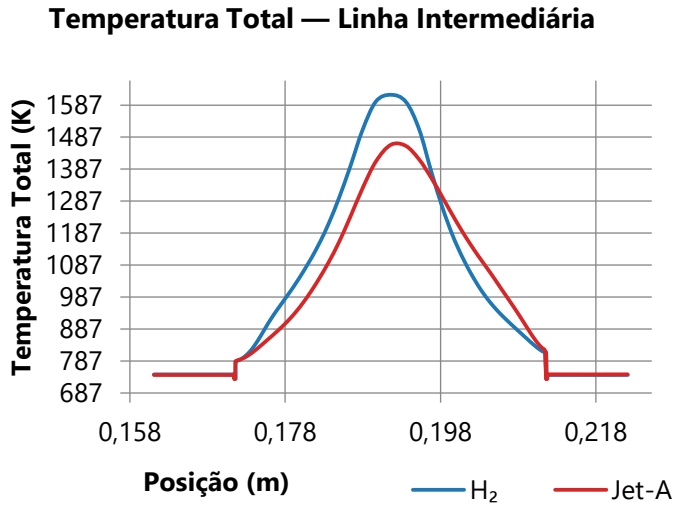
⚠ O pico de T do H_2 é 120 K maior (+5%) → coerente com a maior temperatura adiabática de chama.

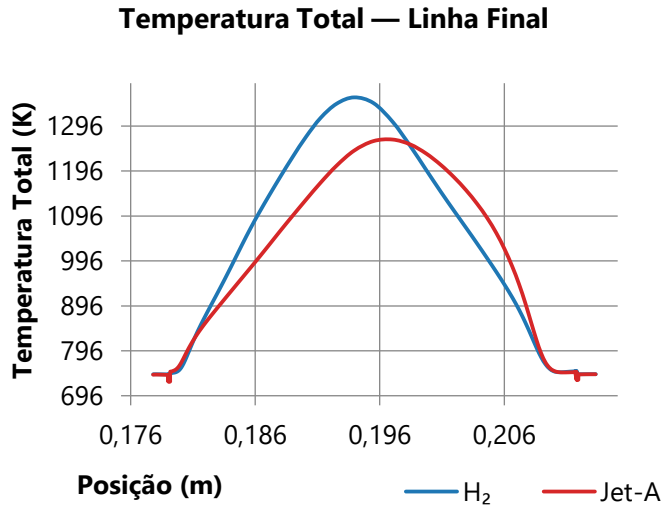
✔ Os dois picos superam a temperatura adiabática estequiométrica teórica: ar pré-aquecido (743 K) + alta pressão (20.8 bar).

⚙ ΔT na saída = 26 K — dentro dos limites das pás da turbina (~1400 K com resfriamento por *film cooling*). Gerenciável.

Perfis Radiais de Temperatura Total





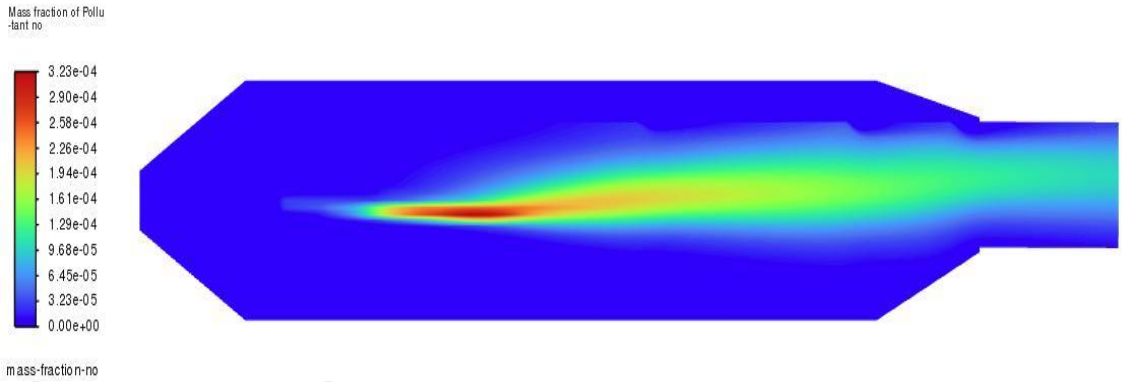




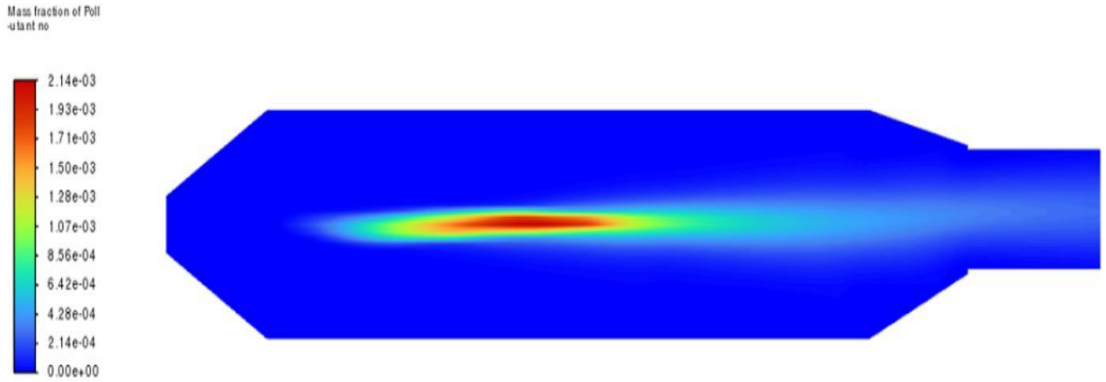
Comparação dos perfis radiais de temperatura entre Jet-A e hidrogênio.

Campos de Fração Mássica de NO e H_2O

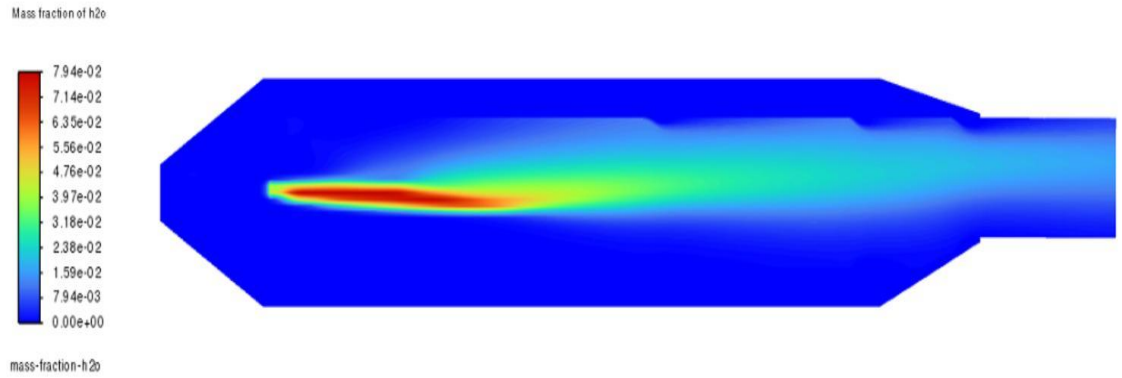
NO — Jet-A | Saída: 5.84×10^{-3} %



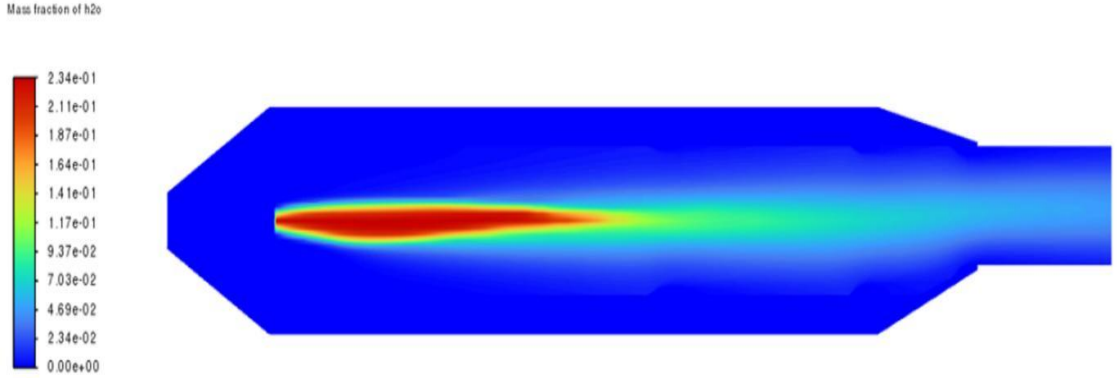
NO — Hidrogênio | Saída: 1.69×10^{-2} % (+2.75×)



H_2O — Jet-A | Saída: 1.07 %



H_2O — Hidrogênio | Saída: 3.09 % (+2.9×)



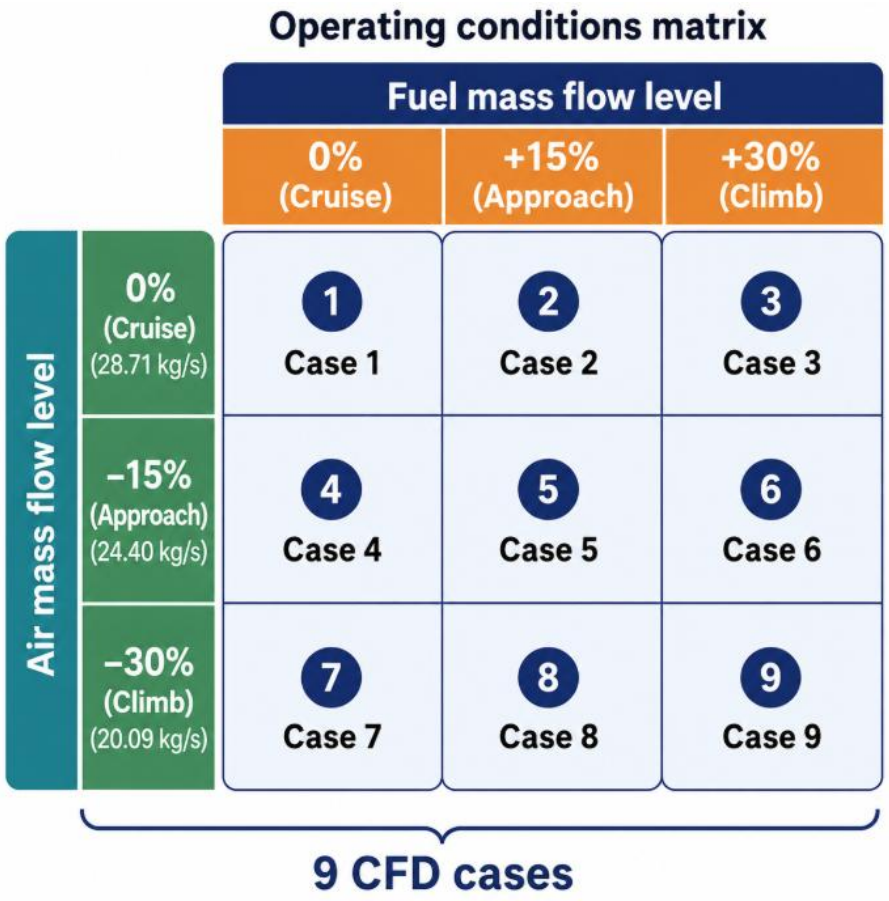
NO: O campo de NO do H_2 é morfologicamente mais compacto, concentrado radialmente no núcleo da chama — mecanismo de Zeldovich governado pela temperatura de pico. **H_2O:** O H_2 produz 3× mais vapor de água (único produto da combustão) — relevante para a formação de rastros de condensação (limiar +10 K acima do Jet-A).

Condições na Saída — Resumo

Parâmetro	Jet-A	Hidrogênio	Δ (H_2 vs Jet-A)
Temperatura total (K)	1055	1081	+26 K (+2.5%)
Magnitude da velocidade (m/s)	106.8	113.7	+6.5%
Pressão absoluta (MPa)	2.08	2.08	—
Fração mássica de CO_2 (%)	2.72	0.00	–100% 🟢
Fração mássica de H_2O (%)	1.07	3.09	+2.9× 🔴
Fração mássica de fuligem (%)	5.94×10^{-3}	0.00	–100% 🟢
Fração mássica de NO (%)	5.84×10^{-3}	1.69×10^{-2}	+2.75× 🔴
Fração mássica de N_2O (%)	2.50×10^{-6}	1.28×10^{-5}	+5.1×
CO_2eq (%)	2.72	0.00349	–3 ordens de grandeza 🟢
Eficiência de combustão (%)	99.14	≈100	+0.86%

🟢 O H_2 elimina CO_2, CO e fuligem — mas 🔴 o NO_x e o H_2O mais altos exigem estratégias de mitigação

Planejamento do Estudo Paramétrico — Fatorial Completo 3×3 + RSM



Modelo RSM: $y = \beta_0 + \Sigma\beta_i x_i + \Sigma\beta_{ii} x_i^2 + \Sigma\beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$

Respostas: T_{out} · v_{out} · NO · H_2O
Variáveis codificadas: −1 / 0 / +1 | critério $R^2 > 0.90$

Superfícies de Resposta RSM — Hidrogênio

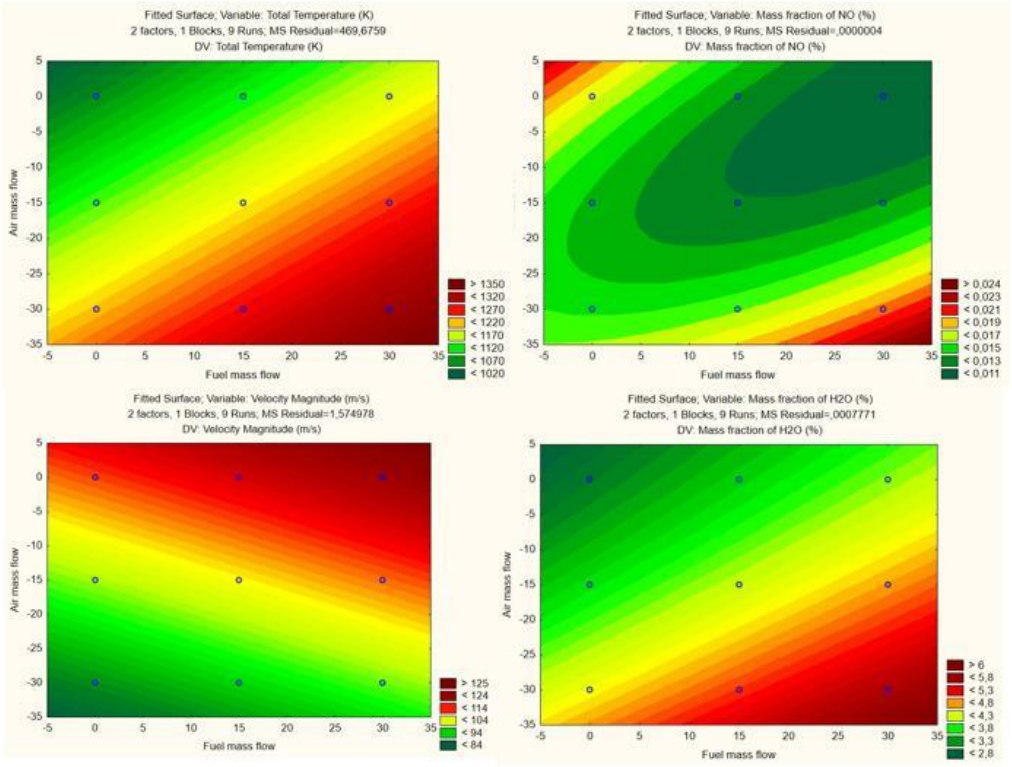


Figura 15. Superfícies ajustadas por RSM: T, velocidade, NO e H_2O vs. vazões mássicas de combustível e de ar.

Temperatura

$R^2 = 0.952$ | R^2 aj. = 0.905

95.2%

Velocidade

$R^2 = 0.990$ | R^2 aj. = 0.980

99.0%

Fração de H_2O

$R^2 = 0.999$ | R^2 aj. = 0.998

99.9%

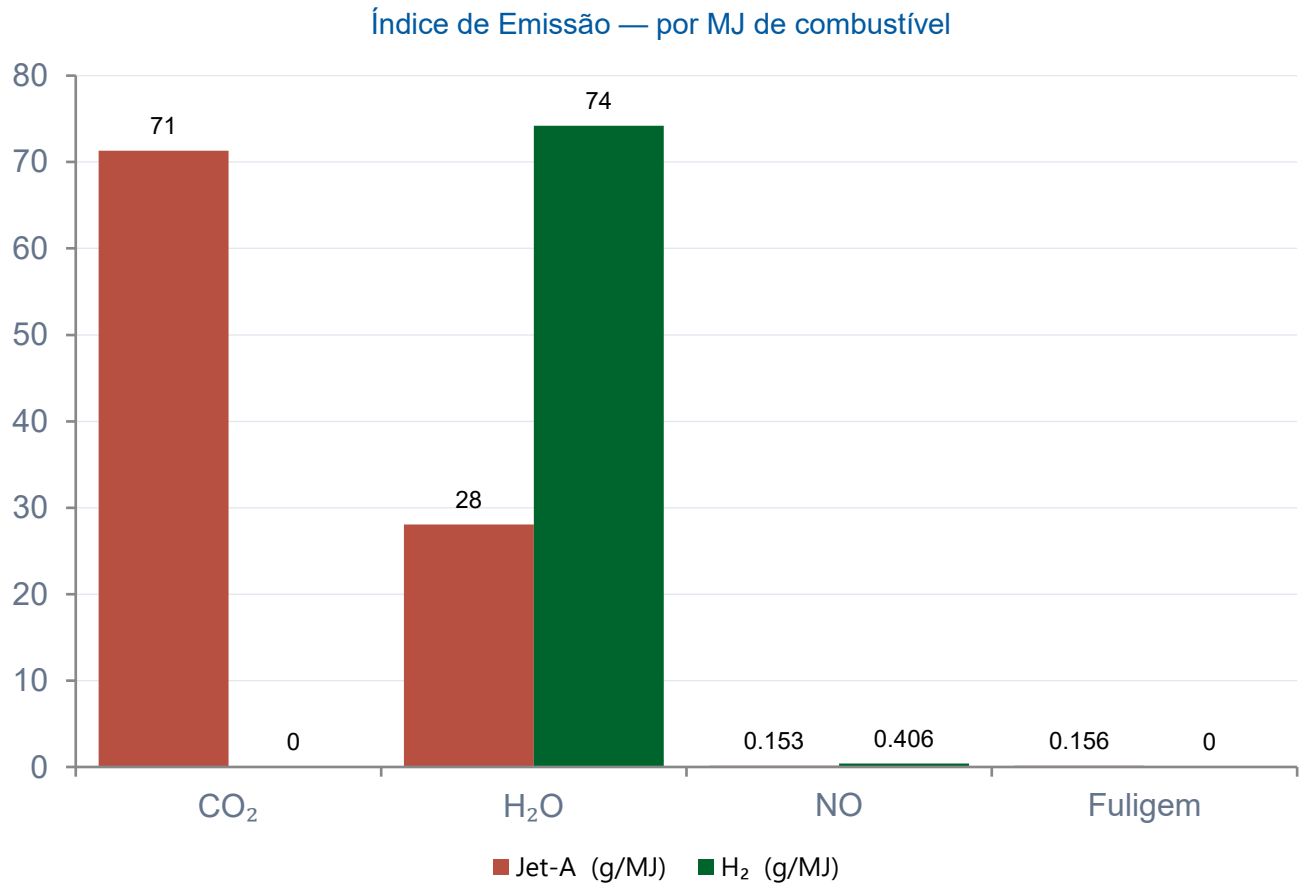
Fração de NO

$R^2 = 0.980$ | R^2 aj. = 0.946

98.0%

Não linearidade do NO_x: dois mecanismos concorrentes — T e razão de combustível mais altas intensificam a formação de NO por Zeldovich, mas zonas ricas em combustível consomem O_2 e suprimem o NO. Um polinômio de 2ª ordem capta isso apenas em parte (R^2 aj. 0.946).

Etapa 1 — Índices de Emissão a partir do CFD



Espécie	Jet-A (g/kg)	H_2 (g/kg)	Razão /MJ
CO_2	3051.6	0.0	—
H_2O	1200.5	8902.3	2.65×
NO	6.55	48.69	2.65×
N_2O	0.0028	0.0369	—
Fuligem	6.66	0.0	—

EI_{CO_2} (Jet-A) = 3052 g/kg — a 3.3% do valor estequiométrico teórico (3157 g/kg para $C_{12}H_{23}$) ✓

Fórmula: EI_sp = (ṁ_sp / ṁ_fuel) × 1000 [g / kg_fuel] ← calculado com os dados de saída do CFD

Etapa 2 — CO_2eq Well-to-Wake por Rota de Produção

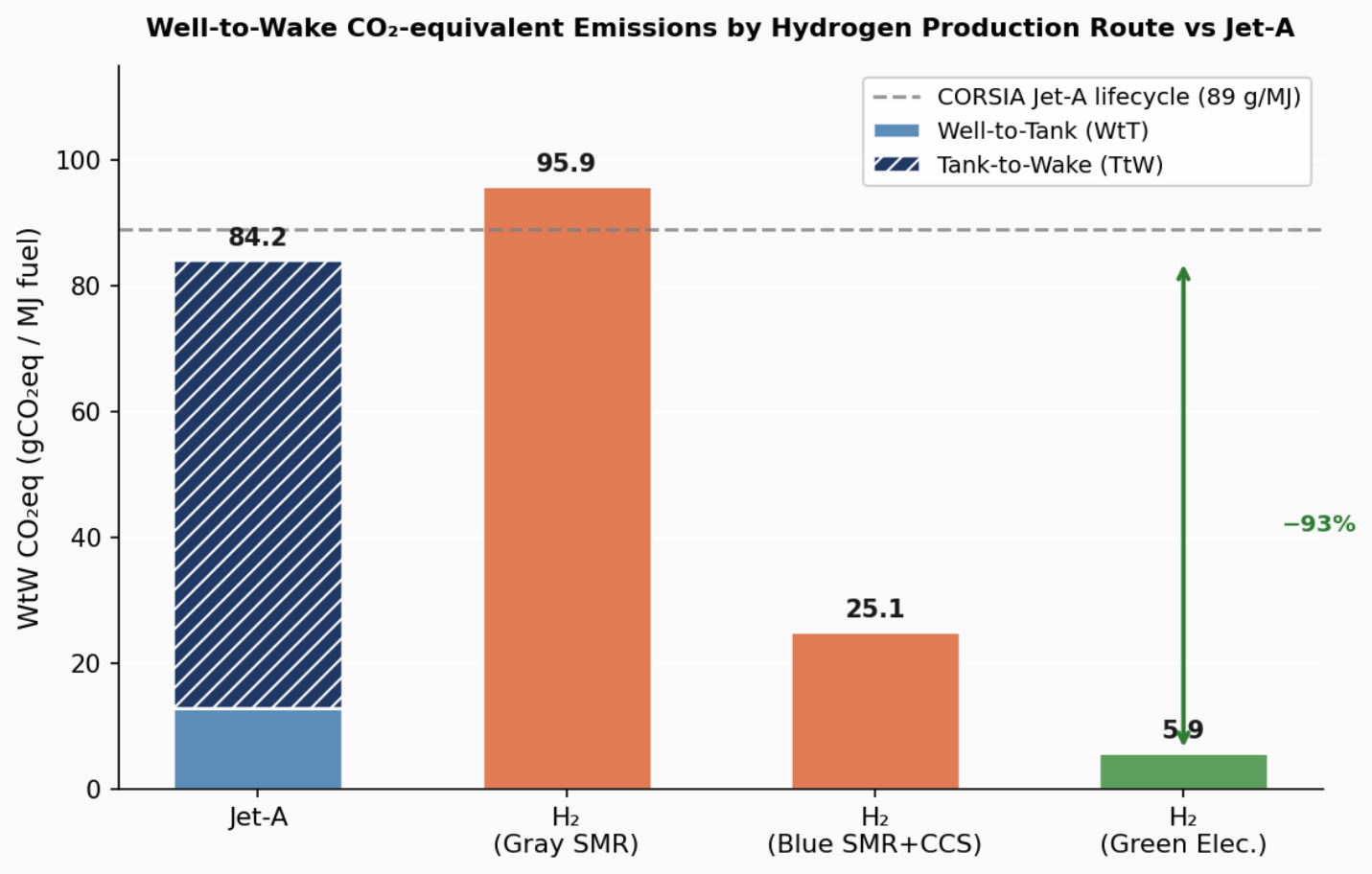


Figura 16. CO_2eq WtW (gCO_2eq/MJ). TtW a partir do CFD (este trabalho); WtT do GREET 2022 e da ICAO CORSIA.

Rota	WtT (kg/kg)	WtW (g/MJ)	Δ vs Jet-A
Jet-A	0.55	84.2	—
H_2 Cinza (SMR)	11.50	95.9	+14% ❌
H_2 Azul (SMR+CCS)	3.00	25.1	−70% ✅
H_2 Verde (Eletr.+RES)	0.70	5.9	−93% 🏆

⚠ H_2 cinza (SMR): 14% pior que o Jet-A — predominam as emissões fósseis a montante.

✔ H_2 azul (SMR+CCS): redução de 70% — depende de captura por CCS >85-90%.

🍃 H_2 verde (Eletr.+RES): redução de 93% — única rota próxima da meta da ICAO para 2050.

Nota: o CO_2eq WtW exclui o forçamento não-CO_2 (NO_x, rastros de H_2O) — tratado separadamente na análise de emissões.

Principais Conclusões

O H_2 elimina CO_2, CO e fuligem locais — o CO_2eq cai 3 ordens de grandeza vs Jet-A (0.00349% vs 2.72%).

O NO_x do H_2 é 2.75× maior e o H_2O 3× maior que no Jet-A — ambos causados pela temperatura de chama elevada. É necessária mitigação.

Pico de T 120 K maior (2550 vs 2430 K); ΔT na saída de apenas 26 K — dentro dos limites térmicos da turbina.

A RSM confirma a viabilidade em um envelope operacional de 9 casos. T, v e H_2O lineares (R^2>0.95); NO não linear (Zeldovich vs consumo de O_2 em competição).

Well-to-Wake: o H_2 cinza é 14% PIOR que o Jet-A. Apenas o H_2 verde (eletrólise+RES) alcança redução de 93% nos GEE do ciclo de vida.

Limitações: 2D axissimétrico (sem swirler), paredes adiabáticas, RANS em regime permanente. Próximos passos: LES 3D + validação com dados experimentais, por exemplo via PIV.



Pedro Afonso Cassani Martins

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Email: pedrocassanilive@hotmail.com

Linkedin: Pedro Afonso


prh anp


anp
Gestão:
FAPESP