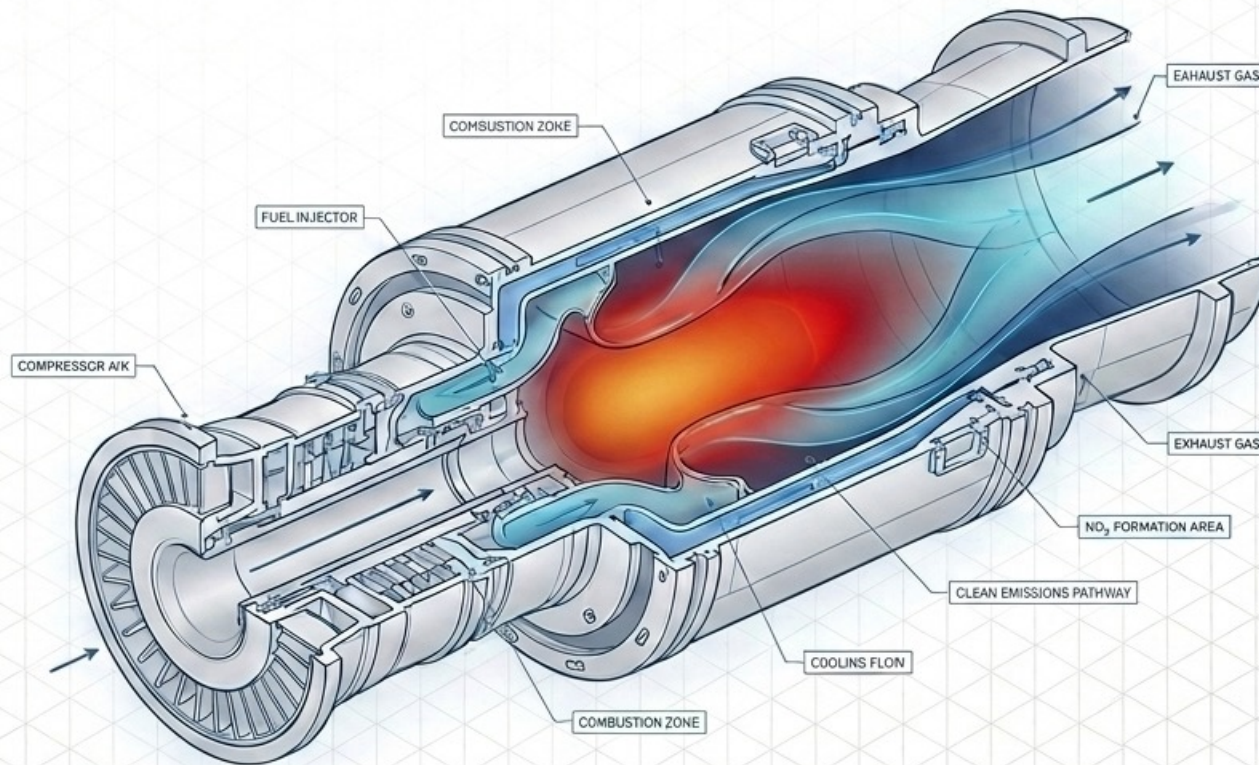


Turbinas a Gás e o Paradoxo das Emissões

Soluções de engenharia para o controle simultâneo de NO_x e CO₂



O Paradoxo

O Cenário Atual (Baseline)



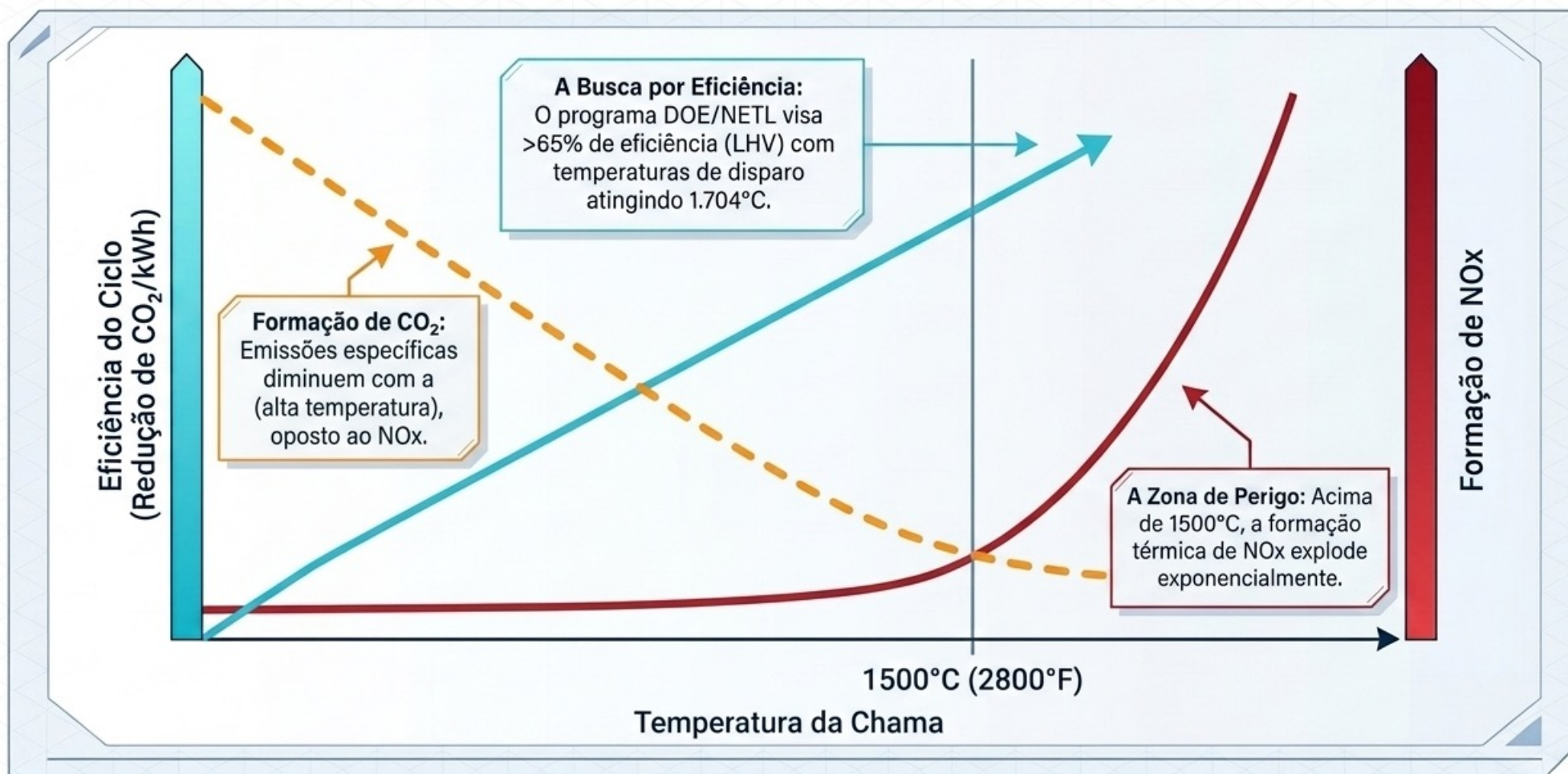
- **Fonte de Energia Confiável:** Essenciais para a estabilidade da rede elétrica, complementando as renováveis intermitentes.
- **Eficiência e Flexibilidade:** Altamente eficientes e capazes de rápida partida e variação de carga para atender à demanda.
- **Emissões Moderadas:** Emitem significativamente menos CO2 e poluentes do que usinas a carvão, mas ainda contribuem para o aquecimento global.

O Desafio (Sobrevivência)

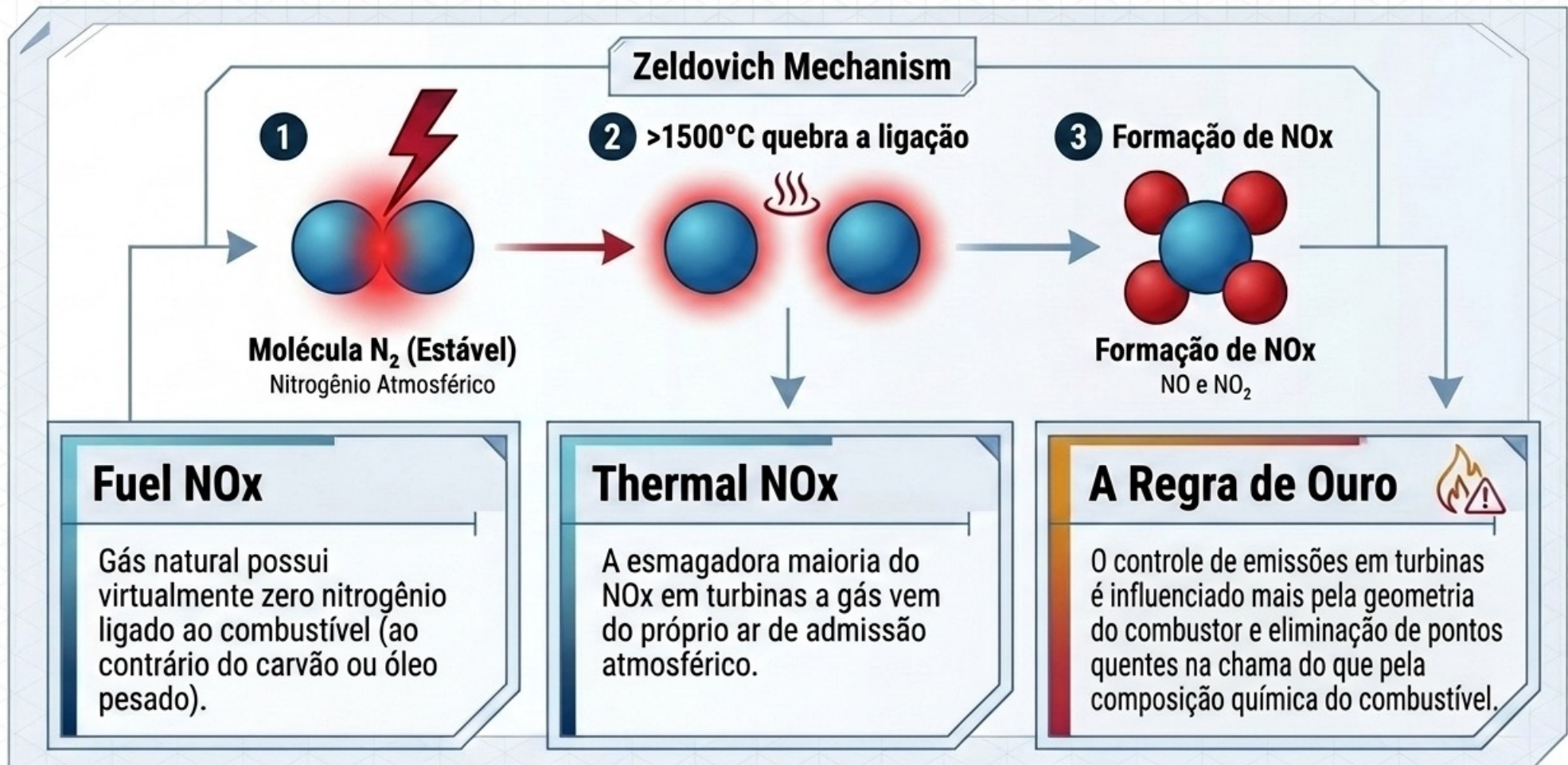


- **Redução Extrema de CO2:** A transição energética exige uma descarbonização profunda. As turbinas devem reduzir drasticamente suas emissões diretas (ex: hidrogênio, captura de carbono).
- **Limites Rigorosos de NOx:** Regulamentações ambientais cada vez mais severas para Óxidos de Nitrogênio (NOx).
- **Inovação para Competir:** A sobrevivência depende de inovações tecnológicas que permitam a operação com emissões próximas de zero.

O Impasse Termodinâmico: Eficiência vs. Emissões

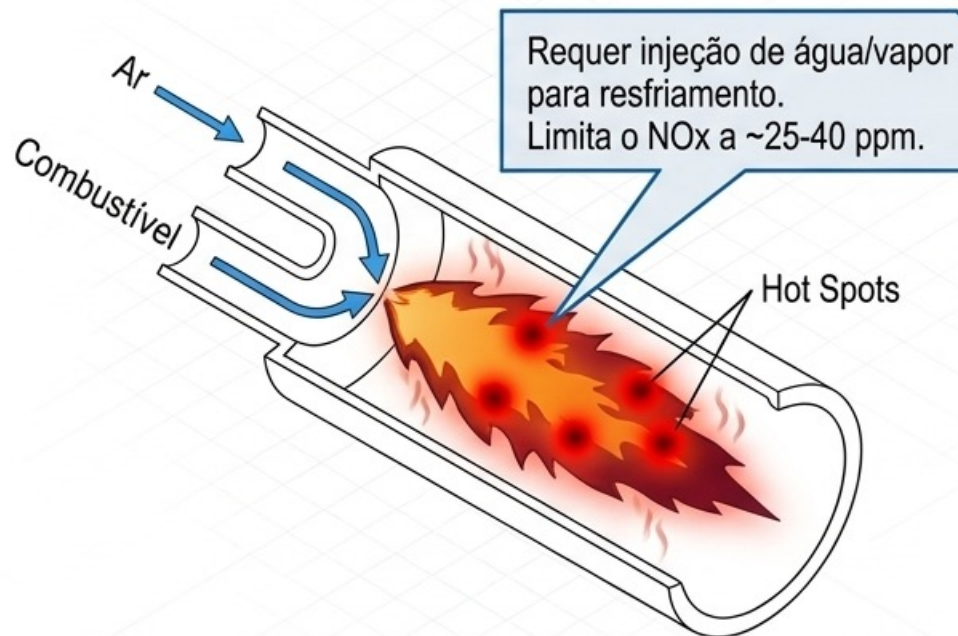


A Formação do NOx: O Problema Está no Ar, Não no Combustível

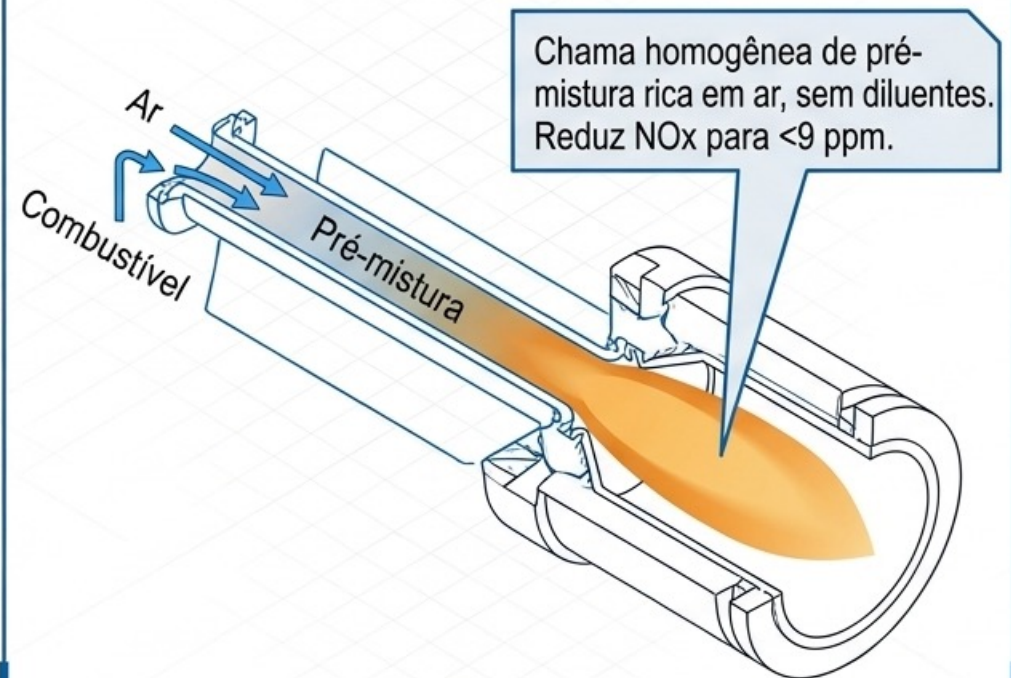


Evolução dos Combustores (Parte 1): A Revolução da Mistura

Chama de Difusão (Diffusion Flame)



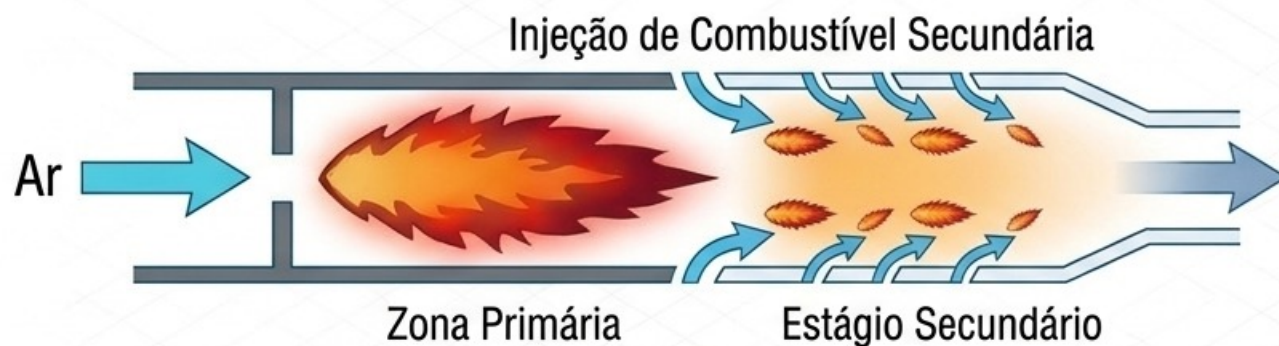
Dry Low NOx (DLN / DLE)



Nota Técnica: A mistura pobre (excesso de ar) afasta a chama da estequiometria, derrubando os picos de temperatura. O desafio mecânico passa a ser a instabilidade termoacústica e o risco de apagamento (lean blow-out).

Evolução dos Combustores (Parte 2): Distribuição Espacial

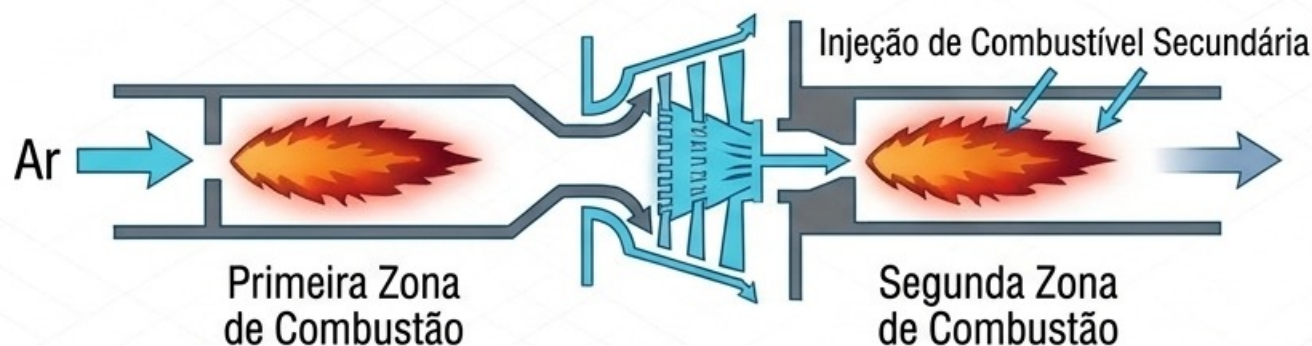
Combustão Estagiada (ex: Axial Fuel Staging - AFS)



Permite reduzir a carga da máquina (turndown) para ~25% mantendo NOx e CO abaixo de 9 ppm.

Evita desligamentos frequentes e otimiza a flexibilidade térmica.

Combustão Sequencial (ex: Arquitetura GT36)



Distribui a adição de calor ao longo da expansão em duas zonas isoladas.

Atualmente oferecida comercialmente para operar com misturas de até 70% de Hidrogênio.

Tecnologias para Controle de NOx em Turbinas a Gás

Tecnologia	Mecanismo	Nível de NOx (Gás)	Efeitos Secundários
Injeção de Água/Vapor (Wet Control)	Redução de temperatura via calor sensível	~25 ppm	Consome água tratada; eleva CO; reduz ligeiramente a eficiência térmica.
Dry Low NOx (DLN / DLE)	Mistura prévia rica em ar (Lean Premix)	<5 a 9 ppm	Janela estreita de estabilidade; requer controle dinâmico complexo.
Selective Catalytic Reduction (SCR)	Pós-combustão (Catalisador + Amônia) converte NOx em N ₂ e H ₂ O	Redução adicional de até 90%	Requer temperatura de exaustão ideal; impõe carga mínima de operação.

O Desafio do CO₂: A Baixa Concentração na Exaustão

Diluição Extrema

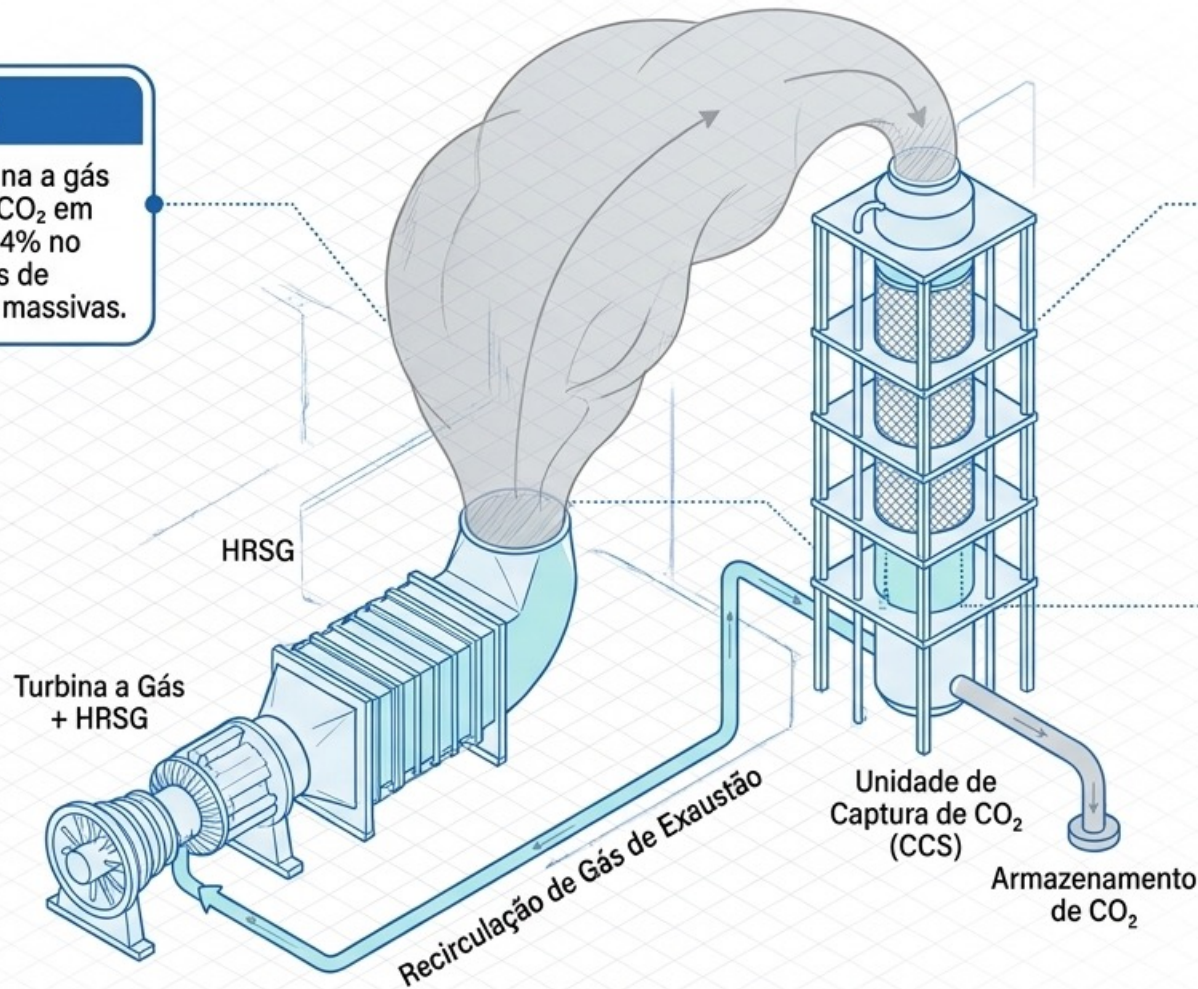
A exaustão de uma turbina a gás contém apenas ~4% de CO₂ em volume (comparado a ~14% no carvão), exigindo colunas de absorção de proporções massivas.

O Preço da Captura

A implementação de CCS de amina tradicional em um ciclo combinado subtrai aproximadamente 7 pontos percentuais da eficiência líquida global.

EGR (Recirculação)

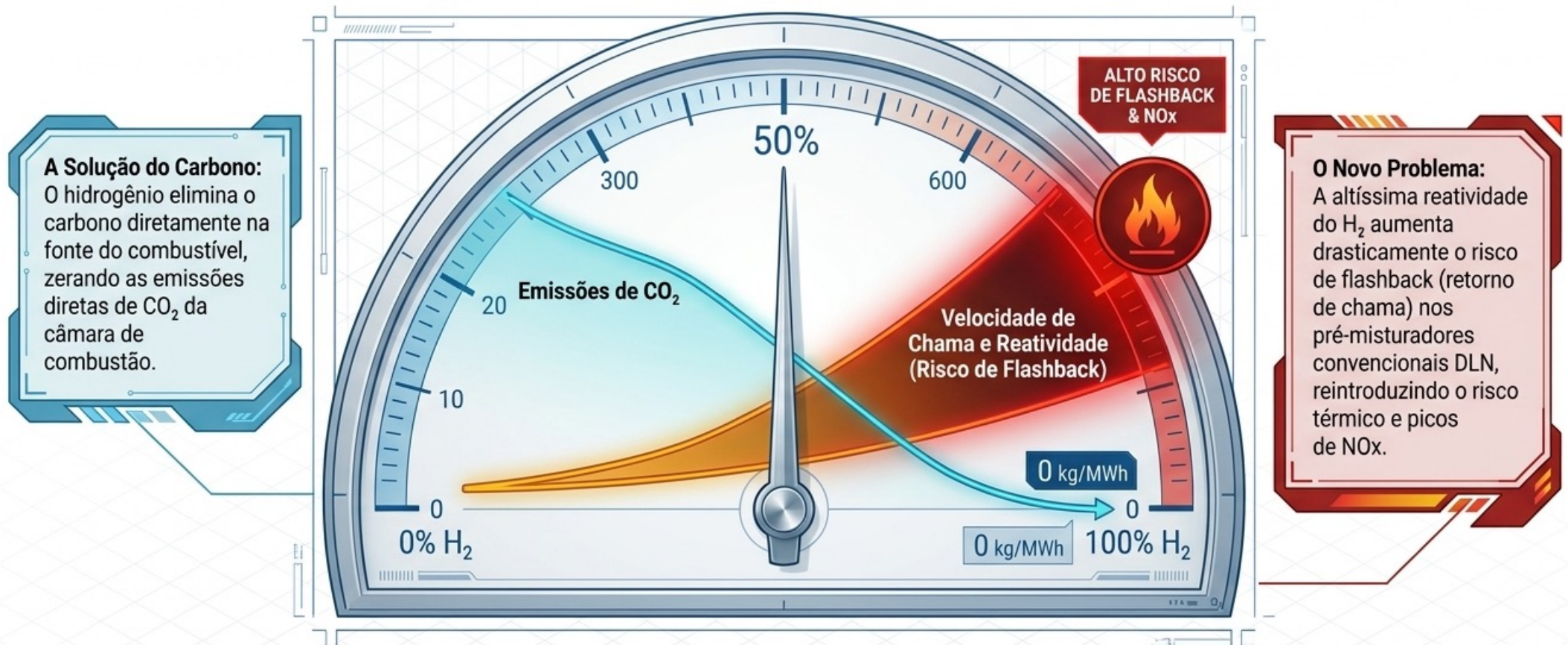
Recircular gases de exaustão pode elevar o CO₂ para 7-10%, facilitando a captura química, mas afeta drasticamente a estabilidade dinâmica da combustão.



Inovação em Ciclos Termodinâmicos de Baixo Carbono

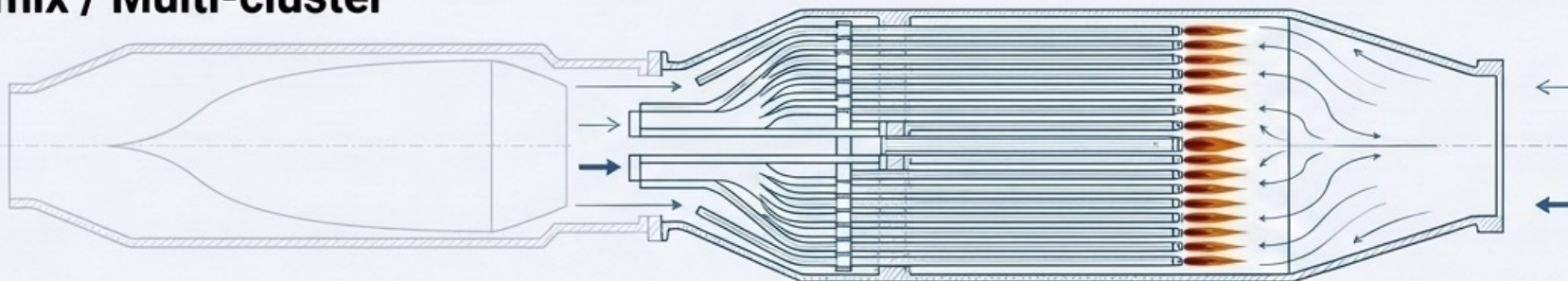
Configuração		Eficiência Relativa	Custo de Capital (CAPEX)	Footprint Físico (Tamanho)
Baseline	Ciclo Combinado (CCGT) + CCS	Padrão (-7% penalidade)	Baseline	Muito Alto (Colunas maciças) 
Advanced	Ciclo ICR (Intercooled-Recuperatd) + CCS	>3% superior ao CCGT+CCS	12% menor que CCGT	70% menor (Altamente compacto) 
Disruptive	Ciclo Allam (Oxi-Combustível)	Equivalente ao CCGT sem captura	Alto	Compacto (Captura 100% nativa de CO ₂) 

A Fronteira Final: Co-combustão de Hidrogênio



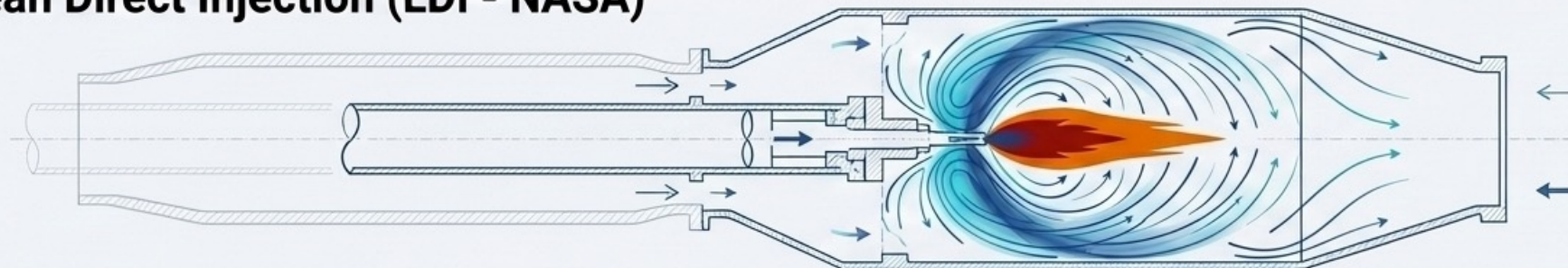
A Chegada do Hidrogênio: Reduzindo Escalas para Prevenir o Flashback

Micromix / Multi-cluster



Substitui uma grande chama central por centenas de pequenas zonas de reação capilares. Reduz o tempo de residência das partículas e impede fisicamente a propagação do flashback.

Lean Direct Injection (LDI - NASA)

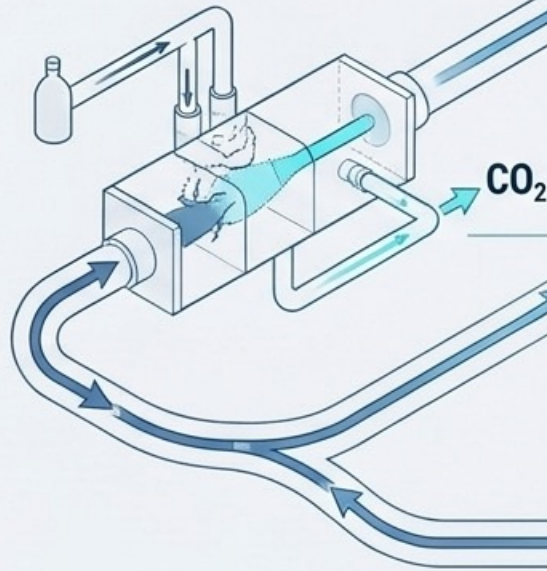


Injeção no ponto de chama com mistura rotativa extremamente rápida (swirlers). Pula a fase longa de pré-mistura, evitando completamente a autoignição em misturas ricas em H_2 .

Síntese: A Anatomia da Usina a Gás do Futuro

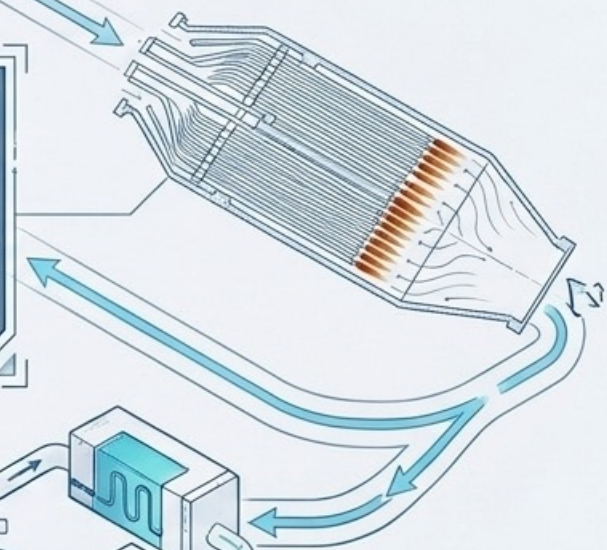
1. O Combustível

Misturas avançadas de Hidrogênio (eliminando CO_2 na fonte química).



2. A Geometria (Combustor)

Arquiteturas Micromix/Sequential (neutralizando o risco de flashback e limitando a formação de NO_x térmico).



O controle de emissões deixou de ser um acessório de exaustão. Combustível, geometria da chama e ciclo termodinâmico precisam evoluir simultaneamente como um sistema único e inseparável para atingir Zero CO_2 e Ultra-Baixo NO_x .

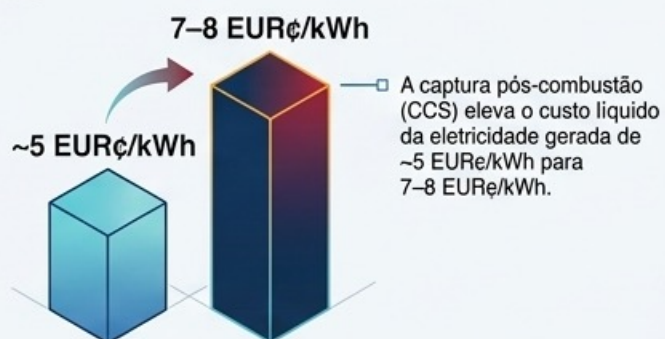
3. O Ciclo Termodinâmico

Ciclos avançados como ICR ou captura pós-combustão super-compacta (recuperando a penalidade de eficiência).



Realidades Econômicas e Mercadológicas

LCOE de Base



Preço do Carbono Requerido



Para a implantação em larga escala de Gás + CCS ser viável no mercado, é necessária uma forte precificação de emissões de pelo menos $\text{EUR } 60 / \text{tCO}_2$.

O Prêmio do Hidrogênio



Atualmente, a queima de hidrogênio puro resulta em um LCOE 50% a 300% maior que as soluções CCS, tornando o CCS economicamente mais atraente no curto prazo.

O Gargalo do CAPEX



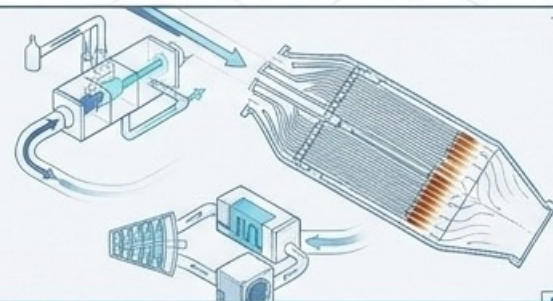
As massivas unidades de separação de gases permanecem a fonte dominante de custos de capital e das penalidades de eficiência na planta.

Conclusões e Imperativos Estratégicos

1

O Limite Físico é Superado pela Geometria

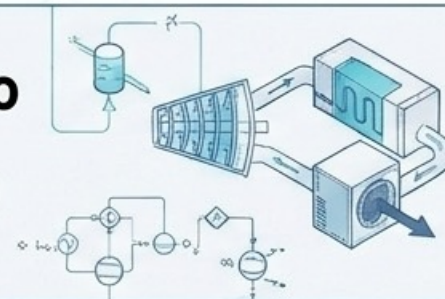
O conflito termodinâmico inato entre eficiência e NOx não se resolve apenas esfriando a chama, mas controlando a mistura espacial e temporalmente através de arquiteturas DLN, Sequenciais e Micromix.



2

Captura de Carbono Exige Redesenho Sistêmico

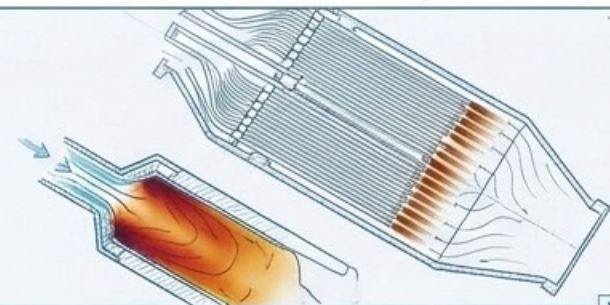
Adicionar CCS na exaustão não é um mero 'plug-and-play'. A severa penalidade de eficiência exige a adoção de novos ciclos nativamente integrados (como ICR e Allam) e simulações físico-químicas exatas dos solventes.



3

O Combustor é o Gargalo do Hidrogênio

O Hidrogênio resolve de forma elegante a equação química do CO₂, mas a sua viabilidade comercial depende diretamente de arquiteturas mecânicas e de fluidos que dominem a sua violenta reatividade térmica.



Saiba Mais

1. DOE / NETL — Advanced Combustion Turbines
(<https://www.netl.doe.gov/carbon-management/turbines/act>)
2. GE Vernova — 7F Axial Fuel Staging (AFS) Turbine Upgrade
(<https://www.gevernova.com/gas-power/services/gas-turbines/upgrades/7f-axial-fuel-staging>)
3. GE Vernova validates 100% hydrogen-fueled DLN combustor technology (15/01/2025)
4. Siemens Energy — SGT-600 Turbina a gás industrial
(<https://www.siemens-energy.com/br/pt/home/products-services/product/sgt-600.html>)
5. Ansaldo Energia — GT36
(<https://www.ansaldoenergia.com/offering/equipment/turbomachinery/gt36>)
6. Ansaldo Energia — GT36 sequential combustion technology achieves 100% hydrogen (13/02/2024)
7. Ansaldo Energia advances fuel flexibility strategy with hydrogen (01/09/2026)
8. NASA — Sector Tests of a Low-NO_x, Lean, Direct-Injection (NTRS: 20050205799)
9. NASA — Flame Tube NO_x Emissions Using a Lean-Direct-Wall-Injection Combustor Concept (NTRS: 20020014404)

Nota Técnica: A expressão '100% H₂' em testes de componente isolado difere de prontidão comercial contínua de frota.



www.gt2.com.br