Desempenho de emissões de Usinas de ciclo combinado a gás natural

Uma comparação técnica do CO_2, NOx e outros poluentes; mecanismos de formação; efeitos da temperatura e vias de mitigação.

Sumário executivo

As usinas de ciclo combinado a gás natural (CCGN) ocupam uma posição distinta em termos de emissões. Por queimarem combustíveis fósseis, em sua maioria, não conseguem atingir as emissões quase nulas das usinas eólicas, solares, hidrelétricas ou nucleares. No entanto, entre as tecnologias convencionais de geração de energia a combustíveis fósseis, elas são a opção de menor emissão de carbono com alta eficiência e, com o uso de tecnologias próprias de mitigação, são opções de baixa emissão de NOx. O resultado é uma redução substancial de CO_2, NOx, SO_2 e material particulado por unidade de eletricidade, em comparação com o que é típico da geração de energia a carvão e óleo.

Três limites de medição devem ser mantidos separados. A intensidade operacional abrange as emissões na planta. A intensidade média da frota reflete a combinação real de idades, cargas, combustíveis e sistemas de controle. A intensidade do ciclo de vida inclui adicionalmente a produção e o transporte de combustível, a construção da planta, o metano a montante e os processos de fim de vida. Uma comparação só é válida quando a unidade funcional e o limite são os mesmos.

Utilizando dados de usinas do EPA eGRID2023, a frota de usinas de ciclo combinado a gás natural dos EUA representada nesta análise apresentou uma média de aproximadamente 390 g de CO_2/kWh, 0,085 gNOx/kWh e 0,008 g SO_2/kWh na usina. As taxas correspondentes da frota primária a carvão dos EUA foram de cerca de 1.011 g CO_2/kWh, 0,606 g NOx/kWh e 0,826 g SO_2/kWh. A comparação indica reduções de aproximadamente 61% para o CO_2, 86% para NOx e 99% para SO_2, embora reconhecendo que o valor do carvão é uma média da frota por categoria de combustível e o valor do NGCC é um resultado da frota de gás filtrado por tecnologia. [2][3]

    - Combustível e eficiência são importantes. O gás natural contém menos carbono por unidade de energia do que o carvão, e o NGCC converte a energia do combustível em eletricidade de forma mais eficiente do que as turbinas a gás de ciclo simples ou as centrais a vapor convencionais. [1][5][10]
- A temperatura tem efeitos aparentemente opostos, mas reconciliáveis. Uma temperatura de combustão mais alta na turbina pode melhorar a eficiência do ciclo Brayton/combinado e reduzir o CO_2 por kWh; uma alta temperatura local da chama e um tempo de residência maior aumentam a formação de NOx térmico. A combustão pré-misturada pobre (lean) suprime pontos quentes locais, preservando uma alta temperatura de entrada da turbina. [6][8]
- O NOx é principalmente um problema do combustor e dos controles. O gás natural tem nitrogênio ligado ao combustível insignificante, portanto o NOx térmico domina as chamas convencionais de gás natural. A combustão DLN/ULN, a injeção de água ou vapor e o SCR podem ser combinados para atingir níveis baixos de ppm na ordem de um dígito. [6][7]
- O CO_2 é um problema da quantidade de carbono que entra no combustor. A melhoria da eficiência reduz o CO_2 por kWh, mas reduções significativas exigem combustível de baixo carbono ou captura e armazenamento permanente. Os cenários de ciclo de vida do NETL para 2024 caem de 417-428 g CO_{2e}/kWh sem captura para 86-116 g CO_{2e}/kWh com 90-97% de captura, dependendo da classe da turbina e da taxa de captura. [5]

- O gás natural não é automaticamente de baixo carbono em termos de ciclo de vida. As emissões de metano a montante, a rota de liquefação e transporte, a eficiência da planta, o fator de capacidade e o modo de operação afetam materialmente o resultado. [5][16]

Nota sobre terminologia. O CO2 é um gás de efeito estufa, enquanto NOx, SO2, CO, compostos orgânicos voláteis e material particulado são normalmente tratados como poluentes atmosféricos ou precursores de poluentes. "NOx" denota a família dominada por NO e NO2 nos gases de escape de turbinas a combustão. A intensidade de emissão é expressa por kWh líquido ou fornecido, conforme especificado.

1. Quadro de comparação

1.1 A unidade funcional e os limites do sistema

Uma comparação de emissões começa com uma unidade de eletricidade útil. As unidades funcionais mais comuns são 1 kWh ou 1 MWh de eletricidade líquida, mas os dados podem usar, alternativamente, a produção bruta do gerador ou a eletricidade entregue. A produção líquida subtrai o consumo interno da usina. A produção entregue reflete, adicionalmente, as perdas de transmissão e distribuição. A captura de carbono aumenta a carga auxiliar, portanto, um denominador de produção líquida é essencial ao comparar usinas com e sem captura de carbono.

Limite	Etapas incluídas	Métricas típicas	Melhor uso
Chaminé / direto	Combustível queimado na usina elétrica	CO_2, NOx, SO_2, CO, VOC, PM	Desempenho da planta e conformidade com as licenças
Frota operacional	Geração real, carga, combustível e controles em todas as usinas.	Tarifas diretas ponderadas pela geração	efeitos de benchmarking e despacho do sistema
Vida útil	Abastecimento de combustível + construção + operação + transmissão e distribuição + fim de vida útil	CO_{2e} e outras categorias de impacto	Comparação de tecnologias e políticas

Nota: *As definições seguem as convenções eGRID, UNECE e NETL. [3][4][5]*

1.2 Por que não existe um valor único e universal de g/kWh

Para uma central de combustão, as emissões por kWh variam com a composição do combustível, a eficiência, as condições ambientais, a degradação, a carga, a frequência de arranque, a queima em condutas e a disponibilidade de equipamento de controle. Para a geração renovável e nuclear, as emissões operacionais da chaminé são efetivamente nulas para CO_2, NOx e SO_2, mas os custos de construção, materiais, ciclo do combustível e descomissionamento permanecem nos resultados do ciclo de vida. A energia hidroelétrica é particularmente específica do local, e a avaliação da UNECE alerta que as emissões de reservatórios biogénicos podem ser elevadas em alguns sistemas tropicais, embora estejam maioritariamente fora do intervalo modelado. [4]

Consequentemente, este artigo utiliza três perspectivas de dados complementares: as médias de emissões diretas de CO_2 por combustível dos EUA, da EIA; os dados operacionais do eGRID2023 da EPA; e as avaliações do ciclo de vida da UNECE/NETL. Os valores de diferentes perspectivas não são combinados em uma única classificação.

2. Por que o ciclo combinado reduz a intensidade das emissões

2.1 Dois ciclos de potência a partir de uma única entrada de combustível

Uma turbina a gás de ciclo simples converte parte da energia do combustível através do ciclo Brayton e rejeita um gás de escape de alta temperatura. Em um ciclo combinado, uma caldeira de recuperação de calor (HRSG) captura grande parte dessa energia de escape para gerar vapor para um ciclo Rankine de fundo. Portanto, é produzida energia elétrica adicional sem aumento proporcional na adição de combustível.

2.2 Teor de carbono e eficiência

Para um combustível fixo, a intensidade direta de CO_2 é regida principalmente pela quantidade de combustível queimado por unidade de eletricidade líquida. Uma relação de engenharia conveniente é:

$$I_CO_2 = EF_CO_2,combustível \times HR$$

onde I_CO_2 é a intensidade direta de CO_2, EF_CO_2,combustível é o fator de emissão de CO_2 específico do combustível por unidade de entrada de calor e HR é o heat rate líquido da usina. Equivalentemente, quando EF está em kg CO_2/GJ e a eficiência elétrica líquida η_e está na mesma base de poder calorífico:

$$I_CO_2\ (kg/MWh) = 3{,}6 \times EF_CO_2,combustível\ (kg/GJ) / \eta_e$$

Essa relação separa duas vantagens do NGCC: a menor intensidade de carbono do gás natural por unidade de calor e a menor heat rate da geração de ciclo combinado. Ela também mostra por que a incrustação do compressor, a degradação da turbina, a contrapressão do condensador, as perdas do HRSG e a operação sustentada em carga parcial podem aumentar o CO_2 por kWh mesmo quando a composição química do combustível permanece inalterada.

2.3 O modo de operação é importante

O modelo de ciclo de vida do gás natural dos EUA de 2024 da NETL relata 472 kg CO_{2e}/MWh para um cenário de frota de carga base, 510 kg CO_{2e}/MWh para acompanhamento de carga e 713 kg CO_{2e}/MWh para pico. A progressão é consistente com a piora do heat rate e o uso de unidades menos eficientes à medida que a demanda passa de carga base estável para serviço de pico. Esses são valores de ciclo de vida, eletricidade entregue, não medições apenas da chaminé. [5]

3. Comparação quantitativa por kWh

3.1 Emissões diretas de CO_2 pelo combustível

Combustível	lb CO_2/kWh	g CO_2/kWh	Limite
Carvão	2.31	1.048	Média de escala de serviços públicos dos EUA.
Gás natural	0,96	435	Geração totalmente a gás natural; não exclusivamente a gás natural liquefeito (NGCC).
Petróleo	2,46	1.116	Média de escala de serviços públicos dos EUA.

Nota: *EIA 2023 Geração líquida em escala de utilidade pública dos EUA e emissões de CO_2 associadas. Os valores métricos são convertidos usando 453,592 g/lb. [1]*

Essas médias mostram que a geração de energia a gás natural emitiu menos da metade do CO_2 direto por kWh emitido pelo carvão ou petróleo em 2023. O número referente ao gás natural inclui ciclo combinado, ciclo simples, turbinas a vapor e motores; portanto, é necessária a separação tecnológica para isolar a contribuição do ciclo combinado.

3.2 Emissões operacionais resolvidas por tecnologia

Tecnologia / categoria	Amostra de 2023	CO_2 g/kWh	NOx g/kWh	SO_2 g/kWh
Frota americana movida principalmente a carvão	Todos os tipos de usinas a carvão	1.010,6	0,6060	0,8256
Turbina a vapor de gás natural	125 usinas; 61,2 TWh	590,3	0,5681	0,1118
Turbina a gás natural de ciclo simples	590 usinas; 99,8 TWh	509,5	0,4341	0,0057
Ciclo combinado de gás natural	535 usinas; 1.543,0 TWh	389,8	0,0848	0,0078

Nota: *EPA eGRID2023 Revisão 2. Os valores de carvão são as taxas de produção primária de carvão publicadas nos EUA. Os valores de gás são cálculos ponderados pela geração a partir das emissões da usina e da geração líquida para usinas primárias a gás classificadas por motor primário do gerador; usinas mistas e motores alternativos são excluídos. [2][3]*

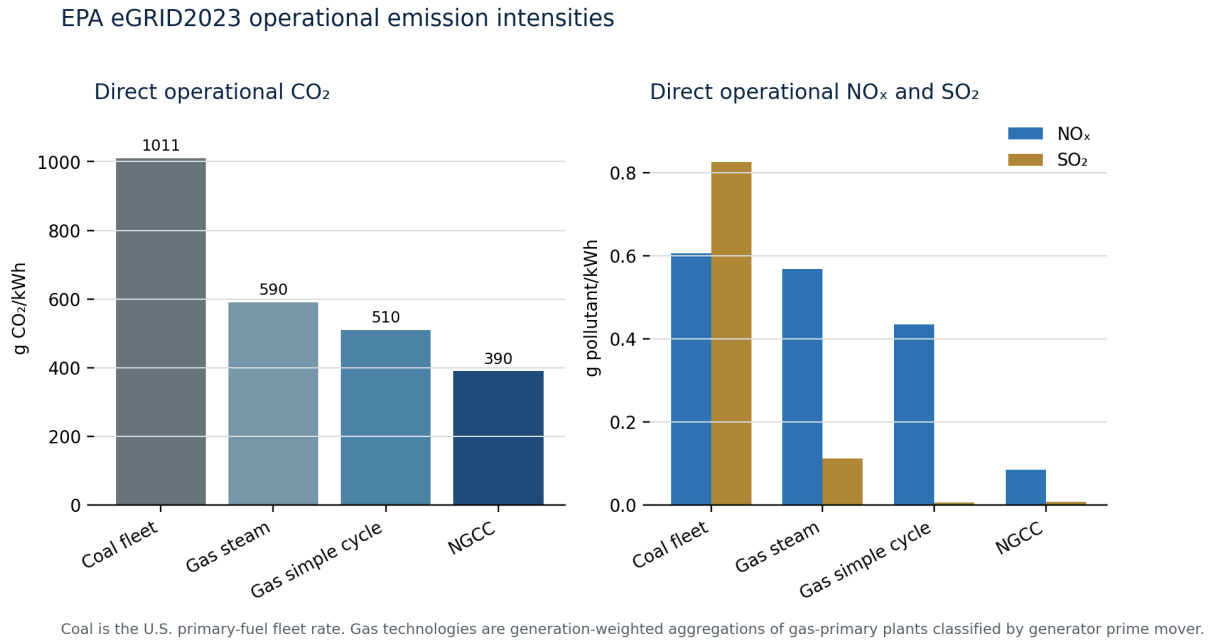

Figura 1. Intensidades de emissão operacional do EPA eGRID2023[1].

O resultado do NGCC é cerca de 24% menor em intensidade de CO_2 do que o resultado da turbina a gás de ciclo simples e cerca de 61% menor do que a taxa da frota primária a carvão. Para NOx, o NGCC é cerca de 80% inferior às turbinas a gás de ciclo simples e 86% inferior ao carvão. A taxa excepcionalmente baixa de SO_2 reflete o baixo teor de enxofre do gás natural; o AP-42 também caracteriza as emissões de partículas das turbinas a gás natural como insignificantes em relação à queima de combustível líquido. [6]

[1] Os números apresentados para cada usina não são garantias de desempenho dos equipamentos. São resultados históricos, ponderados pela geração, que incorporam os controles existentes, os padrões operacionais e os ajustes de dados. Uma estimativa para um novo projeto deve utilizar dados de desempenho do fabricante original (OEM), emissões garantidas, análise de combustível no local, condições de licenciamento e um modelo de despacho.

3.3 Comparação das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida

Tecnologia	Ciclo de vida g CO_{2e}/kWh	Interpretação principal
Carvão, sem CCS	751-1.095	O fornecimento de combustível e a combustão predominam
Ciclo combinado de gás natural	403-513	Inclui vazamento de metano modelado
Ciclo combinado de gás natural com CCS (Captura e Armazenamento de Carbono).	92-220	Captura e armazenamento incluídos
Nuclear	5.1-6.4	O ciclo de combustível frontal é importante
Energia hidrelétrica	6-147	Altamente específico para cada local; ressalva quanto ao reservatório.
Solar PV	8-83	Infraestrutura e manufatura dominam o cenário.
Energia solar concentrada	27-122	Infraestrutura e irradiação regional
Vento em terra	7,8-16	Dominado pela infraestrutura
Energia eólica offshore	12-23	Dominado pela infraestrutura

Nota: *Avaliação integrada do ciclo de vida da UNECE. Os intervalos de cenários refletem suposições regionais, tecnológicas, da cadeia de combustível e do fator de capacidade. [4]*

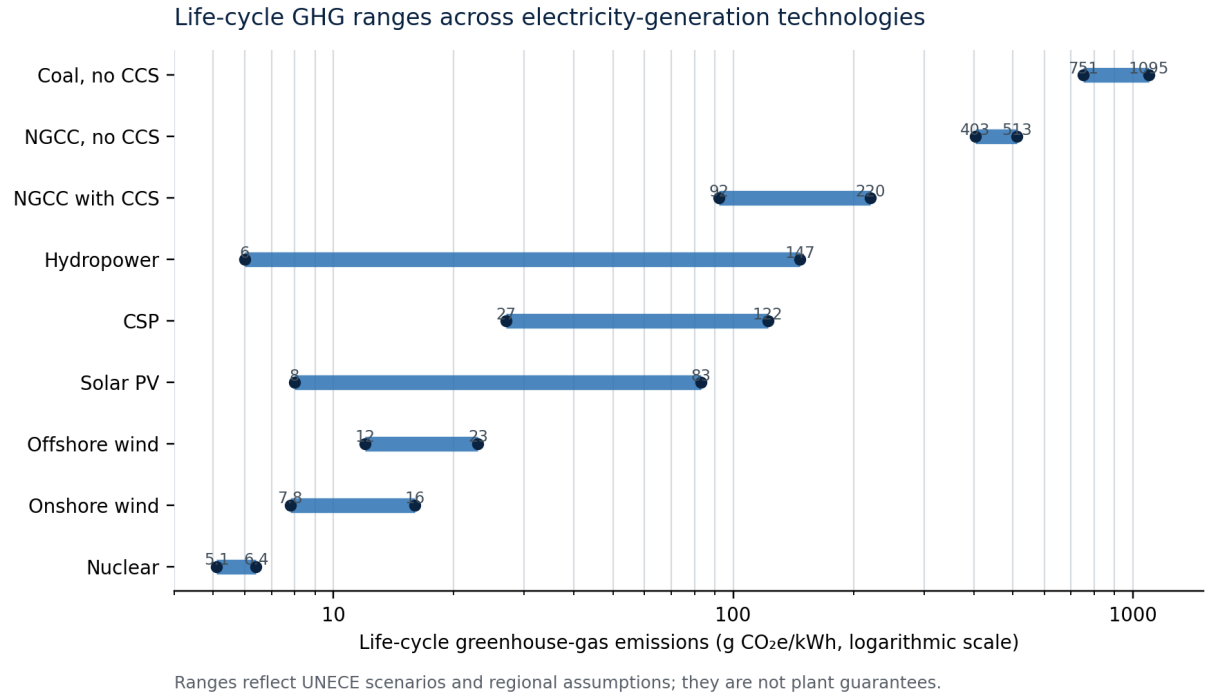

Figura 2. Faixas de emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida da UNECE. O eixo logarítmico preserva a visibilidade para tecnologias de baixo carbono.

A geração de energia a gás natural liquefeito (NGCC) sem captura de carbono apresenta desempenho significativamente inferior ao do carvão sem mitigação de emissões, mas permanece muito superior ao da energia eólica, nuclear e às fontes de energia solar e hidrelétrica, que possuem menores emissões. Essa é a principal limitação de descrever o gás natural como "limpo": ele é mais limpo do que outras opções de combustíveis fósseis sem mitigação de emissões para os poluentes medidos, e não uma fonte de emissão zero.

3.4 O que muda quando se adiciona a captura de carbono?

Cenário NETL	HHV líquido eficiência	Vida útil kg CO_{2e}/MWh	Redução kg/MWh	Redução vs. não capturado
Classe F NGCC	53,6%	428	-	-
Classe F + 90% de captura	47,6%	116	312	73%
Classe F + 95% de captura	47,3%	96	332	78%
Classe F + 97% de captura	47,0%	89	339	79%
NGCC classe H	55,1%	417	-	-
Classe H + 90% de captura	49,0%	113	304	73%
Classe H + 95% de captura	48,7%	94	323	77%
Classe H + 97% de captura	48,4%	86	331	79%

Nota: *NETL 2024 casos médios dos EUA do berço ao túmulo usando GWP de 100 anos do IPCC AR6. As reduções percentuais são calculadas a partir dos totais NETL citados. [5]*

A captura reduz drasticamente o CO_2 emitido pela chaminé, mas requer vapor, eletricidade e compressão, diminuindo a eficiência. O total residual do ciclo de vida inclui o CO_2 não capturado pela chaminé, as emissões de gás natural a montante, o fornecimento de eletricidade e o transporte e armazenamento de CO_2. Portanto, uma taxa de captura de 90% no absorvedor não se traduz em uma redução de 90% nas emissões de CO_{2e} (equivalente a CO_2) por MWh fornecido, do berço ao túmulo.

4. Formação de poluentes e o papel da temperatura de combustão

4.1 Formação de dióxido de carbono

Para combustíveis de hidrocarbonetos, o CO_2 é o produto final de carbono pretendido da combustão completa. Para o metano, por exemplo, a reação global é $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$. Com vazão e composição de combustível fixas, o aumento da temperatura da chama não cria carbono adicional; promove principalmente a oxidação para CO_2 em vez de CO e hidrocarbonetos não queimados. Por kWh, o efeito dominante da temperatura é indireto, por meio da eficiência do ciclo, das necessidades de resfriamento, das perdas de pressão e do ponto de operação.

Em baixas cargas ou com mistura e resfriamento inadequados, o CO e os COVs podem aumentar devido à oxidação incompleta. O AP-42 observa que a operação em plena carga geralmente melhora a eficiência da combustão e a queima de CO, enquanto cargas leves a médias aumentam os produtos de combustão incompleta. Ao mesmo tempo, menor eficiência significa mais combustível por kWh, portanto a intensidade de CO_2 ainda pode aumentar mesmo que uma pequena fração do carbono saia como CO ou hidrocarbonetos. [6]

4.2 NOx térmico: a principal via do gás natural

O gás natural contém quantidades insignificantes de nitrogênio combustível quimicamente ligado. Na combustão convencional em turbinas a gás natural, o NOx é, portanto, formado principalmente pela oxidação do nitrogênio atmosférico. A rota de alta temperatura é representada pelo mecanismo de Zeldovich estendido:

$$O + N_2 \rightleftharpoons NO + N$$

$$N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$$

$$N + OH \rightleftharpoons NO + H$$

A taxa é altamente sensível à temperatura porque a dissociação e as concentrações de radicais aumentam rapidamente em regiões quentes. O DOE resume o comportamento como uma resposta aproximadamente exponencial à temperatura e uma resposta linear ao tempo de residência. A EPA identifica a temperatura máxima, a disponibilidade de oxigênio e o tempo na temperatura máxima como os principais fatores. [6][8]

4.3 Vias de reação imediata, de combustível e intermediárias de N_2O

Caminho	Fonte de nitrogênio	Região/rota de formação	Relevância para turbinas a gás
NOx térmico	N_2 atmosférico	Gás queimado em alta temperatura; bolsas quentes quase estequiométricas	Dominante em chamas de difusão de gás natural convencionais
NOx imediato	N_2 atmosférico	Os radicais de hidrocarbonetos formam intermediários HCN/NH/N próximos à frente de chama.	Menor no geral, mas pode representar uma fração maior à medida que o NOx térmico for suprimido.
NOx de combustível	Nitrogênio quimicamente ligado no combustível	Espécies de nitrogênio combustível oxidam-se em direção a NO/NO_2	Negligenciável para gás natural canalizado; importante para combustíveis nitrogenados.
Rota intermediária de N_2O	N_2 atmosférico	Química pobre, de baixa temperatura e alta pressão através de N_2O	Uma nuance de projeto em sistemas pré-misturados muito enxutos; requer cinética detalhada.

Nota: *As vias térmicas, imediatas e de combustível seguem as descrições da EPA/DOE. A rota intermediária de N_2O é incluída como uma via cinética de combustão pobre reconhecida, consistente com a literatura de combustão de turbina a gás; ela não é quantificada aqui. [6][8]*

4.4 Temperatura da chama, razão de equivalência e pontos quentes

O NOx térmico não é controlado pela temperatura média dos gases de escape. Ele é controlado pelo histórico local de tempo-temperatura-oxigênio na zona de reação. As chamas de difusão contêm interfaces próximas às condições estequiométricas, onde a temperatura é alta e o NOx térmico se forma rapidamente. A EPA relata que o NOx térmico máximo ocorre em uma mistura ligeiramente pobre em combustível, porque a alta temperatura coincide com a disponibilidade de oxigênio. Uma mistura ainda mais pobre reduz a temperatura da chama; uma mistura mais rica reduz o oxigênio disponível e também diminui a temperatura em relação ao pico estequiométrico. [6]

Não confunda a temperatura da chama com a temperatura de entrada da turbina.

A temperatura de entrada da turbina é uma temperatura mista e diluída, limitada pelo projeto da seção quente. Os núcleos de chama locais a montante podem ser muito mais quentes. As câmaras de combustão avançadas buscam uma mistura pobre e uniforme que evite bolsões estequiométricos locais, permitindo uma alta temperatura de entrada da turbina e alta eficiência do ciclo sem aceitar o nível de NOx de uma chama de difusão.

4.5 Operação em carga e transitória

O mapa operacional cria uma janela de emissões. Em alta carga, a temperatura de combustão e a tendência térmica do NOx aumentam. Em baixa carga, a temperatura de combustão e as condições de residência podem ser insuficientes para a queima completa de CO e VOC. Os modernos sistemas DLN

adicionam outro recurso: abaixo de aproximadamente metade da carga, algumas máquinas dependem mais fortemente dos modos de difusão ou piloto para estabilidade, o que pode causar excursões de NOx. O desempenho do SCR também depende de atingir a janela de temperatura do catalisador; a EPA observa que a injeção de amônia pode precisar ser interrompida abaixo da temperatura de projeto, geralmente em torno de 50-60% da carga para as configurações citadas. [6][7]

5. Tecnologias de mitigação de CO2 para NGCC

Medir	Mecanismo físico	Evidências/benefícios	Restrição principal
Melhoria na taxa de aquecimento	Mais eletricidade líquida a partir da mesma quantidade de combustível.	Etapa inicial de menor complexidade; os benefícios acompanham o ganho de eficiência verificado.	Não elimina o carbono fóssil.
Otimização de ciclo combinado / HRSG	Recupera a energia dos gases de escape da turbina a gás.	Principal razão pela qual o NGCC supera o ciclo simples	Afetado por pontos de estrangulamento, níveis de pressão, queima em dutos e condições do ciclo de vapor.
Preservação de desempenho	Evita o aumento do consumo de combustível causado pela degradação.	A lavagem, a vedação, os controles e o desempenho do condensador/HRSG do compressor protegem a linha de base.	Requer monitoramento de desempenho corrigido, e não apenas a eficiência bruta.
CCS pós-combustão de alta taxa	Separa o CO_2 dos gases de escape, comprime-o e armazena-o.	Os modelos NETL capturam 90%, 95% e 97% dos resultados.	Penalidade de eficiência, aumento da demanda de água/vapor/serviços auxiliares, transporte e armazenamento.
Reciclagem de gases de escape com CCS	Aumenta a concentração de CO_2 e diminui o fluxo de gás do absorvedor.	Os estudos da NETL elevam o CO_2 de entrada capturado de 4,1 para 8,3 mol% com 50% de EGR.	A NETL constatou apenas uma modesta melhoria na relação custo/desempenho nos casos estudados.
Hidrogênio/gases de baixa emissão	Reduz ou remove o carbono que entra na câmara de combustão.	O H_2 puro não produz CO_2 diretamente.	O resultado do ciclo de vida depende da rota de produção; pode ser necessário redesenhar a câmara de combustão e o sistema de controle de NOx.
redução de metano a montante	Reduz a carga de gases de efeito estufa não relacionados ao CO_2 na cadeia de suprimento de gás.	Melhora diretamente o desempenho do ciclo de vida.	Requer medição, verificação e cobertura da cadeia de suprimentos.
Cogeração / calor útil	Desloca a produção de calor separada	Pode aumentar a eficiência energética total.	A alocação entre eletricidade e calor deve ser explícita.

Nota: *Síntese a partir de fontes da EIA, EPA, NETL, IEA e IPCC. [1][5][6][11][13][16]*

5.1 A eficiência é necessária, mas não suficiente.

A melhoria na eficiência produz uma redução quase proporcional nas emissões diretas de CO_2 por kWh, mantendo-se o mesmo combustível. Por exemplo, um aumento de 1% na eficiência resulta em uma redução de aproximadamente 1% na intensidade direta de CO_2 relacionada ao combustível. Essa afirmação decorre diretamente da fórmula $I_CO_2 = EF \times HR$; não se trata de uma alegação de que toda intervenção de manutenção resulta em uma melhoria de 1% na eficiência.

5.2 Captura e armazenamento pós-combustão

O escapamento do NGCC tem uma concentração de CO_2 relativamente baixa porque a turbina a gás opera com excesso de ar. A captura pós-combustão baseada em solventes, portanto, trata um grande volume de gases de combustão e requer regeneração do solvente e compressão de CO_2. Os casos das

classes F e H de 2024 do NETL mostram cerca de seis pontos percentuais de perda de eficiência HHV líquida com 90% de captura, com perdas ligeiramente maiores à medida que a captura aumenta para 95-97%. [5][11]

A recirculação de gases de escape pode aumentar a concentração de CO_2 na entrada e reduzir o fluxo do absorvedor. No estudo NETL citado, a transição de nenhuma recirculação para 50% de recirculação aumentou o CO_2 na entrada do sistema de captura de 4,1 para 8,3 mol%, enquanto as alterações calculadas na eficiência foram pequenas e o benefício em termos de custo nivelado foi modesto. A integração específica do local continua sendo necessária. [11]

5.3 A troca de combustível deve utilizar uma definição de ciclo de vida.

O hidrogênio puro não contém carbono e, portanto, não produz CO_2 na chaminé quando queimado. Isso não significa que todo fornecimento de hidrogênio seja de baixa emissão. A definição de hidrogênio de baixa emissão da AIE exige emissões a montante suficientemente baixas e, para hidrogênio derivado de combustíveis fósseis, alta captura em fluxos relevantes de CO_2 com armazenamento permanente. A mesma disciplina de limite se aplica ao biometano e ao metano sintético. [13]

6. Tecnologias de mitigação de NOx

6.1 Controles de combustão

Os controles de combustão previnem a formação de NOx alterando o ambiente local da chama. A pré-mistura pobre é a abordagem preferida para turbinas a gás modernas de grande porte, pois reduz a temperatura máxima e os pontos quentes sem a necessidade contínua de água, como ocorre com a injeção úmida. Ainda assim, é fundamental manter a operação estável durante as fases de ignição, aceleração, sincronização, carregamento e transferência de combustível.

Tecnologia	Mecanismo de controle de NOx	Desempenho típico da EPA	Principais restrições de engenharia
Injeção de água/vapor	O dissipador de calor reduz a temperatura máxima da chama.	25-42 ppm; 0,03-0,05 lb/MMBtu	Qualidade e consumo de água; eficiência e penalidade de CO_2; dinâmica.
DLN	A pré-mistura homogênea e pobre evita pontos quentes estequiométricos.	9-15 ppm; 0,01-0,018 lb/MMBtu	Combustível pobre, dinâmica, retrocesso de chama, redução de potência e variabilidade de combustível.
ULN	Pré-mistura aprimorada e estágios de combustão	Tão baixo quanto 5 ppm; 0,006 lb/MMBtu	Hardware específico do frame e envelope de operação
SCR após controle de combustão	NH_3 reage com NOx sobre um catalisador para produzir N_2 e H_2O.	Sistemas combinados com níveis de até 2 ppm; 0,002 lb/MMBtu	Temperatura do catalisador, escape de amônia, queda de pressão, espaço para adaptação

Nota: *Memorando de controle de NOx de turbina de combustão da EPA de 2022. Os valores de ppm são concentrações de volume seco nas condições de referência declaradas na fonte. [7]*

6.2 Conversão dos fatores de controle para g/kWh

Os limites de permissão são frequentemente expressos em ppmvd corrigidos para uma concentração de oxigênio de referência ou em lb/MMBtu. Para comparação com a intensidade de geração, um fator baseado na entrada pode ser convertido usando a eficiência da usina. Na eficiência de referência da

classe F da NETL de 6.363 Btu/kWh, os fatores da EPA acima correspondem aos seguintes valores de triagem:

Caso de controle	Fator EPA lb/MMBtu	Intensidade derivada em 6.363 Btu/kWh g NOx/kWh
Injeção de água/vapor	0,03-0,05	0,087-0,144
DLN	0,010-0,018	0,029-0,052
ULN	0,006	0,017
DLN/ULN + SCR	0,002	0,006

Nota: *Derivado como EF × heat rate × 453,592/10^6. Esta é uma conversão de triagem, não uma garantia de emissões; assume que o fator e o heat rate se aplicam à mesma condição operacional. [5][7]*

6.3 Redução catalítica seletiva

A SCR injeta amônia a montante de um catalisador. As principais reações convertem NO e NO_2 em N_2 e H_2O. A EPA fornece uma faixa típica de SCR para turbinas a gás de aproximadamente 600-750°F para as configurações em seu memorando de 2022, enquanto a discussão mais ampla do AP-42 relata operação dependente do catalisador em aproximadamente 450-850°F e eficiências de remoção de 65-90%. Em usinas NGCC, o catalisador está localizado dentro do HRSG, onde a temperatura do gás é adequada. [6][7][9]

O projeto deve equilibrar a conversão de NOx com o escape de amônia, a desativação do catalisador, a queda de pressão e a carga operacional mínima. Uma adaptação pode ser difícil quando o HRSG não foi projetado com espaço para a grade de injeção, comprimento de mistura e módulos de catalisador. [7]

6.4 Hidrogênio e outros combustíveis de baixo carbono

O hidrogênio introduz um desafio acoplado de CO_2-NOx. Para uma condição fixa de excesso de ar, o hidrogênio pode queimar a uma temperatura mais alta do que o gás natural, aumentando a tendência de NOx térmico. Sua alta velocidade de chama também altera o retrocesso de chama, a autoignição e as margens dinâmicas. A combustão de hidrogênio com baixo NOx requer, portanto, estágios projetados especificamente, injeção direta pobre ou conceitos de micromistura, em vez de assumir que um combustor DLN de gás natural pode aceitar qualquer mistura sem consequências. [12]

O hidrogênio também pode prolongar a estabilidade em misturas pobres em alguns projetos, permitindo a combustão em temperaturas mais baixas. O resultado é específico para cada combustor: a composição do combustível por si só não determina o NOx. As garantias de emissões devem estar vinculadas à mistura, à carga, às condições ambientais, à disponibilidade de diluente e ao pós-tratamento.

7. Implicações da engenharia integrada

7.1 Projeto de construção nova

1. Defina os limites de emissão e o ciclo de trabalho antes de selecionar a tecnologia. Os serviços de carga base, acompanhamento de carga e pico produzem diferentes taxas de calor e históricos de temperatura do sistema de controle.

2. Otimize a planta integrada, não apenas a turbina a gás. Selecione a classe da turbina, os níveis de pressão do HRSG (Caldeira de Recuperação de Calor), o ciclo de vapor, o sistema de resfriamento, a queima no duto e as cargas auxiliares com base no consumo líquido de MWh.
3. Especifique o desempenho de NOx tanto na saída da câmara de combustão quanto na chaminé. O controle da combustão reduz a formação de NOx; o SCR proporciona o polimento final e a margem de conformidade.
4. Reserve espaço físico e térmico para os sistemas de emissões. A localização do catalisador HRSG, o comprimento da mistura de amônia, a queda de pressão, o acesso e as futuras interfaces de captura são difíceis de adaptar posteriormente.
5. Avalie a captura de CO2 com base na eficiência líquida, nas emissões residuais do ciclo de vida, no uso da água, na qualidade do CO2, no transporte e no armazenamento verificado — e não apenas na porcentagem de captura.

7.2 Modernização de instalações existentes

Para um ativo existente, a sequência de menor custo geralmente começa com a verificação da recuperação da eficiência e o ajuste da combustão, e em seguida avalia o hardware e os controles pós-combustão em relação à lacuna restante. As adaptações DLN/ULN são específicas para cada estrutura e exigem integração de volume físico e controles. A viabilidade do SCR depende do espaço e da temperatura do HRSG. A captura de carbono é um projeto de integração de toda a planta, envolvendo extração de vapor, resfriamento, energia auxiliar, espaço no terreno e exportação de CO_2.

7.3 Operação e manutenção

O objetivo operacional não é um único ponto mínimo de emissões, mas sim uma faixa de conformidade em todas as condições de carga e ambientais. Um conjunto útil de monitoramento inclui eficiência líquida corrigida, composição do combustível, modo de combustão, NOx e CO, escape de amônia (quando aplicável), temperatura do catalisador, perda de pressão nos gases de escape, partidas, taxa de variação da potência e tempo abaixo da carga mínima de conformidade de emissões.

> Utilize CO_2 por MWh líquido para monitorar a eficiência de carbono, NOx na saída da câmara de combustão para diagnosticar a formação de gases de efeito estufa, NOx na chaminé para avaliar o sistema de controle integrado e CO_{2e} ao longo do ciclo de vida para avaliar o fornecimento de combustível e as vias de captura de CO_2. Nenhuma métrica isolada substitui as outras.

7.4 O que a comparação prova e o que ela não prova

Os dados suportam a conclusão de que a geração de energia a gás natural circulante (NGCC) reduz significativamente as emissões diretas de CO_2, NOx e SO_2 em comparação com a geração convencional a carvão e apresenta melhorias substanciais em relação às tecnologias a gás menos eficientes. Os dados não sustentam a classificação da NGCC sem controle de emissões como carbono zero, nem implicam que todas as usinas a gás superem todas as usinas a carvão controladas para todos os poluentes. A idade da usina, o combustível, os controles e a capacidade de geração são fatores importantes. Além disso, os

dados não resolvem questões sistêmicas como adequação, armazenamento, transmissão ou as consequências das emissões do balanceamento da geração variável.

8. Conclusões

- O ciclo combinado reduz a intensidade das emissões da geração de eletricidade por combustível fóssil por meio de duas vantagens independentes: menor teor de carbono por unidade de calor em comparação com o carvão e maior eficiência em comparação com a geração de ciclo simples ou somente a vapor.
- Os dados operacionais da EPA de 2023 mostram que as usinas de ciclo combinado a gás natural (NGCC) emitem aproximadamente 390 g de CO_2/kWh e 0,085 g de NOx/kWh na agregação documentada dos EUA, em comparação com cerca de 1.011 g de CO_2/kWh e 0,606 g de NOx/kWh para o parque gerador a carvão.
- As avaliações do ciclo de vida indicam que as centrais de ciclo combinado a gás natural (NGCC) sem mitigação emitem entre 403 e 513 g CO_{2e}/kWh, bem abaixo das emissões de carvão sem mitigação, mas bem acima das emissões de energia nuclear, eólica e da maioria das energias solares e hidrelétricas.
- O NOx térmico responde fortemente à temperatura máxima local da chama, ao oxigênio e ao tempo de residência. Altas temperaturas de entrada da turbina e baixos níveis de NOx podem coexistir quando a pré-mistura ar-combustível impede a formação de pontos quentes próximos da estequiometria.
  - A combustão DLN/ULN e a SCR são complementares. A injeção úmida continua sendo útil em aplicações selecionadas, mas apresenta desvantagens em termos de água, eficiência e emissões de CO_2.
- A redução profunda de CO_2 exige captura em alta taxa com armazenamento permanente ou combustível com emissões genuinamente baixas. A taxa de captura, as emissões residuais do ciclo de vida e a penalidade de eficiência devem ser relatadas.
- O hidrogênio elimina o CO_2 da chaminé apenas quando substitui o combustível que contém carbono; seu benefício ao longo do ciclo de vida depende da produção, e sua combustão pode intensificar os desafios de NOx e de operabilidade, a menos que a câmara de combustão seja projetada para isso.

Referências

As fontes foram selecionadas entre agências governamentais, organizações intergovernamentais e literatura técnica revisada por pares. Acesso em 27 de julho de 2026.

[1] Administração de Informação Energética dos EUA (EIA).*Qual a quantidade de dióxido de carbono produzida por quilowatt-hora de geração de eletricidade nos EUA?*Geração de CO2 em 2023 e fatores diretos de emissão por combustível; página atualizada em 11 de dezembro de 2024.Link da fonte

[2] Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA).*Dados detalhados do eGRID2023, revisão 2.*Dados sobre usinas, geradores e geração de eletricidade e emissões em nível nacional nos EUA para 2023; divulgados em 12 de junho de 2025.Link da fonte

[3] Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA).*Guia técnico do eGRID2023.*Definições, métodos, limites e descrições de elementos de dados para o eGRID2023.Link da fonte

[4] Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE).*Neutralidade de carbono na região da UNECE: Avaliação integrada do ciclo de vida das fontes de eletricidade.*Avaliação ambiental comparativa do ciclo de vida da eletricidade gerada a partir de carvão, gás natural, energia nuclear, hidrelétrica, eólica e solar.Link da fonte

[5] Laboratório Nacional de Tecnologia Energética (NETL).*Análise do Ciclo de Vida da Extração de Gás Natural e Geração de Energia: Perfil de Emissões dos EUA em 2020.*Relatório do DOE/NETL, dezembro de 2024; inclui cenários para as classes F e H, operação da frota e captura de carbono.Link da fonte

[6] Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA).*AP-42, Volume I, Seção 3.1: Turbinas a Gás Estacionárias.*Formação das emissões das turbinas a gás, efeitos operacionais, fatores de emissão e tecnologias de controle.Link da fonte

[7] Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA).*Memorando sobre tecnologias de controle de NOx em turbinas a gás.*Memorando técnico de janeiro de 2022 sobre injeção de água/vapor, DLN/ULN e desempenho de SCR.Link da fonte

[8] Departamento de Energia dos EUA (DOE).*Análise de custos de alternativas para o controle de NOx em turbinas a gás estacionárias.*Discussão técnica sobre NOx térmico, imediato e de combustível, temperatura de combustão, tempo de residência e alternativas de controle.Link da fonte

[9] Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA).*Manual de Custos do Controle da Poluição do Ar da EPA, Capítulo 2: Redução Catalítica Seletiva.*Química, desempenho e considerações de projeto do SCR.Link da fonte

[11] Laboratório Nacional de Tecnologia Energética (NETL).*Centrais elétricas de ciclo combinado a gás natural com captura de carbono e reciclagem de gases de escape.*Resultados de desempenho e custos para 2024 para captura de 90% e 95% com sensibilidades de recirculação de gases de escape.Link da fonte

[11] Laboratório Nacional de Tecnologia Energética (NETL).*Centrais elétricas de ciclo combinado a gás natural com captura de carbono e reciclagem de gases de escape.*Resultados de desempenho e custos para 2024 para captura de 90% e 95% com sensibilidades de recirculação de gases de escape.Link da fonte

[12] Departamento de Energia dos EUA (DOE), Escritório de Tecnologias de Hidrogênio e Células de Combustível.*Hora H2IQ: Abordando as emissões de NOx de turbinas a gás movidas a hidrogênio.*Apresentação técnica sobre a temperatura da chama de hidrogênio, projeto de câmara de combustão e implicações no controle de NOx.Link da fonte

[13] Agência Internacional de Energia (IEA).*Glossário: hidrogênio de baixa emissão, gases de baixa emissão e CCUS.*Definições que enfatizam o processo de produção, as emissões a montante, a taxa de captura e o armazenamento permanente.Link da fonte

[14] Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA).*Informações básicas sobre o NO2.*Efeitos do NO2 e de outros óxidos de nitrogênio na saúde e no meio ambiente.Link da fonte

[15] Organização Mundial da Saúde (OMS).*Poluição do ar ambiente (externo).*Efeitos na saúde das partículas em suspensão, do ozono e do dióxido de azoto.Link da fonte

[16] Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). *Grupo de Trabalho III do AR6, Capítulo 6: Sistemas de Energia.* Avaliação da literatura sobre mitigação e ciclo de vida de sistemas energéticos. Link da fonte

[17] Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL). *Emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida da geração de eletricidade: atualização.* Ficha informativa de 2021 comparando as emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida por fonte de eletricidade. Link da fonte

[18] Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA). *Visão geral dos gases de efeito estufa.* Fontes e papel climático do dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa. Link da fonte