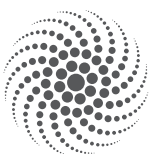


Série
TERMOELETRICIDADE
EM FOCO

Geração termoelétrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle



iema
Instituto de Energia
e Meio Ambiente

Série Termoeletricidade em Foco:
GERAÇÃO TERMOELÉTRICA
E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS:
POLUENTES E SISTEMAS DE CONTROLE

Diretor Presidente
André Luis Ferreira

Equipe Técnica
André Luís Ferreira
Ademilson Zamboni
Aline Fernandes da Silva
Gabriel de Freitas Viscondi
Kamyla Borges Cunha

Autores
Gabriel de Freitas Viscondi
Aline Fernandes da Silva
Kamyla Borges Cunha

Diagramação
Leandro Guima

Publicado por
IEMA - Instituto de Energia
e Meio Ambiente
energiaeambiente.org.br

São Paulo, novembro de 2016

Sumário

Apresentação	04
Introdução	06
1. Emissões em termoeletricas?	08
2. Quais poluentes são emitidos?	12
3. Qual a relação entre os combustíveis e os tipos de poluentes?	14
4. Qual o papel do ciclo termodinâmico?	16
5. Onde se localizam as usinas no Brasil?	18
6. Como controlar as emissões?	20
7. O que acontece no mundo?	28
8. Como performam as usinas <i>benchmark</i>?	30
Considerações finais	34
Referências	36

Apresentação

A matriz elétrica brasileira está passando por um período de transição, em que a expansão da capacidade instalada e da geração hidrelétricas deve ocorrer a taxas inferiores às observadas no passado, levando à necessidade de ampliar a oferta de outras fontes de geração para atender ao crescimento da demanda.

Se por um lado outras fontes renováveis, como a solar e a eólica, despontam como alternativas menos impactantes sob a perspectiva ambiental, por outro, o planejamento governamental e análises setoriais diversas têm apontado uma tendência de crescimento a termoeletricidade, particularmente a de origem fóssil, como a principal fonte a complementar a geração hidrelétrica no curto, médio e longo prazos no país.

Tendo em vista as implicações ambientais, sociais e econômicas da configuração futura da matriz elétrica para o Brasil, evidencia-se premente um diálogo aberto e transparente entre governo, segmentos do setor elétrico, academia e sociedade civil a respeito das questões de demanda e das opções energéticas em pauta.

De modo a dar sua contribuição a este deba-

te, o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) vem se dedicando a um conjunto de estudos e análises ambientais a respeito da geração termoeétrica no Brasil, a incluírem: o levantamento e sistematização de dados técnicos e ambientais das maiores usinas termoeletricas fósseis em operação e em processo de licenciamento em todo o território nacional, o desenvolvimento de indicadores de consumo de água e de emissões de poluentes atmosféricos e de gases de efeito estufa (GEE), a identificação dos empreendimentos que contam com financiamento público (BNDES) e a pesquisa sobre alternativas de redução do consumo de água e de emissões atmosféricas.

O resultado desse trabalho passa, agora, a ser divulgado por meio de uma série de cadernos técnicos e também de uma plataforma web. Dando continuidade a este trabalho, publicamos esta Nota Técnica, que possui como principais objetivos descrever a emissão de poluentes atmosféricos locais e gases de efeito estufa na geração termoeletrica, discutir alternativas de sistemas de controle para estes gases poluentes e, por fim, apresentar *benchmarks* internacionais de emissões relacionados a usinas em operação. Boa leitura!

André Luis Ferreira

Diretor-Executivo

Introdução

Os empreendimentos termoeletricos contribuem significativamente para o montante total de emissões na região em que estão operando, principalmente devido ao porte e consequente volume de combustíveis consumidos diariamente. Visto que estas unidades de geração tendem a concentrar-se proximamente aos centros de carga, ou seja, cidades e zonas industriais, as emissões de poluentes atmosféricos podem representar um agravante na qualidade do ar da região e, por conseguinte, causar efeitos na saúde da população do entorno.

Além de importantes fontes de poluição atmosférica, as térmicas fósseis também configuram a principal fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE) do setor elétrico brasileiro.

Conhecer mais a fundo as implicações da geração termoeletrica nas emissões de poluentes atmosféricos e de GEE revela-se, portanto, um primeiro passo na direção de um debate mais aprofundado não apenas sobre opções tecnológicas e locacionais de geração elétrica, como também sobre a necessária integração entre as

políticas energética e ambiental.

Esta Nota Técnica, tem, assim, como objetivo inaugurar a contribuição do IEMA para esse debate, trazendo como insumos:

- Uma explicação sobre as emissões de poluentes atmosféricos oriundas da termoeletricidade, destacando-se os principais poluentes e relacionando-os com os combustíveis e ciclos termodinâmicos comumente utilizados nesta modalidade de geração;
- A localização das maiores térmicas brasileiras e sua proximidade a centros urbanos;
- As melhores tecnologias disponíveis comercialmente no mundo para o controle de cada poluente. Ainda, é apresentado nesta seção um comparativo com usinas internacionais com foco em indicadores de emissão de poluentes das usinas em operação.

Ao final, são tecidas algumas considerações críticas.

1. Emissões em termoelétricas?

A geração termoelétrica consiste na conversão da energia química presente nos combustíveis, sejam eles líquidos, sólidos ou gasosos, em energia térmica, por meio de um processo de combustão. Por sua vez, esta energia térmica (calor) é convertida em trabalho em máquinas térmicas que, por estarem conectadas ao gerador elétrico, geram eletricidade.

A quase totalidade das emissões de poluentes ocorre por força da queima de combustíveis, ocorrendo no processo de geração elétrica em diferentes momentos, conforme a tecnologia de geração usada, ou ciclo termodinâmico, conforme explicado na **Figura 1**.

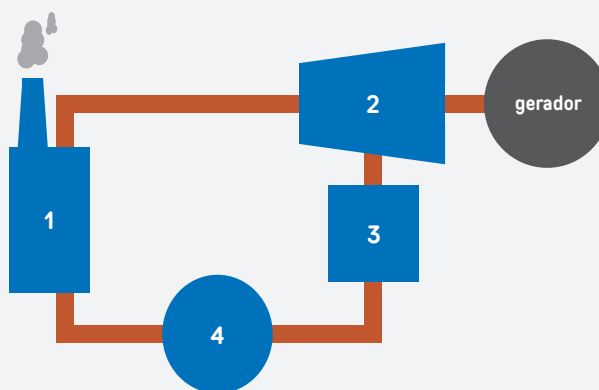
O tipo de combustível usado, portanto, é o principal elemento a determinar a natureza e a intensidade dos poluentes, conforme ilustram as **Figuras 2 e 3**, nas páginas seguintes.

Além do combustível, outros fatores também contribuem para as emissões. É o caso, por exemplo, dos ciclos termodinâmicos, os quais, por propiciarem diferentes eficiências na combustão, podem levar a maiores ou menores emissões específicas (emissão por unidade de energia gerada), conforme detalha a **Figura 4**.

A emissão dos poluentes também depende da vazão com que saem das unidades de geração. A vazão, por sua vez, tem relação direta com a configuração das tecnologias de geração, controle dos processos da usina (principalmente a combustão) e uso de sistemas de controle de poluição atmosférica.

Ciclo Rankine (Vapor)

Opera com vapor produzido em uma caldeira **(1)**, o qual é levado à turbina onde produzirá rotação nas pás e perderá pressão **(2)**. O calor necessário para transformar a água em vapor é suprido por um combustível que alimenta a caldeira e, neste ponto, originam-se as emissões. A rotação das pás da turbina é transmitida por um eixo até o gerador elétrico. O vapor, após perder pressão na turbina, passa por um condensador **(3)**, pois deve retornar ao estado líquido visando a voltar, por meio de uma bomba **(4)**, à caldeira para uma nova operação.



Ciclo Brayton (Aberto)

O ciclo utiliza turbinas a gás onde a adição de calor ocorre à pressão constante. Assim, o gás natural é injetado em uma câmara de combustão **(2)** junto com o ar que vem do compressor **(1)** e, após a queima desta mistura, os gases de combustão são direcionados para a turbina **(3)**, acionando o movimento giratório das pás. Novamente, a turbina é acoplada ao gerador para produção de eletricidade. Após passagem pela turbina, os gases são eliminados para a atmosfera, caracterizando as emissões atmosféricas do ciclo.

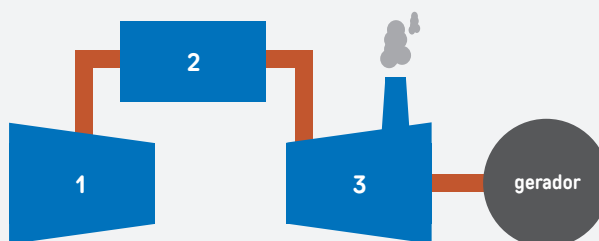
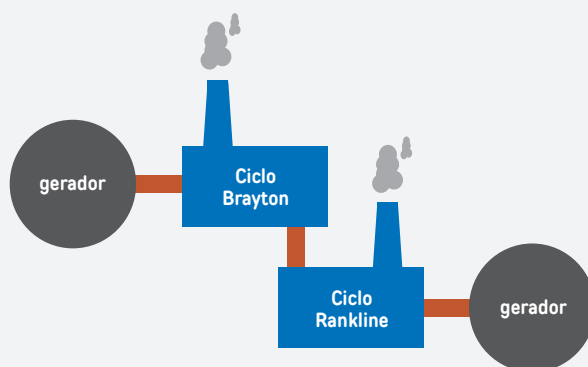
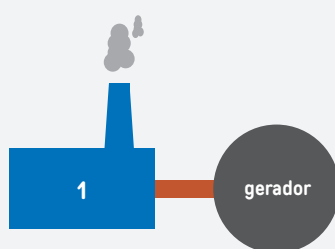


Figura 1: Ciclos termodinâmicos adotados na geração termoeletrica.



Ciclo Combinado

O ciclo combinado resulta da união entre o ciclo Brayton e o ciclo Rankine. Esta junção mostra-se vantajosa devido ao fato de que a temperatura dos gases de exaustão do ciclo Brayton (cerca de 500°C) apresenta a mesma ordem de grandeza da temperatura de entrada do ciclo Rankine. Para a combinação de ambos os ciclos, utiliza-se como elemento de junção uma caldeira de recuperação de calor, responsável por aproveitar a energia contida nos gases de exaustão da turbina a gás para gerar o vapor necessário no ciclo Rankine. Nesta caldeira, mais combustível pode ser adicionado, pós-queima, com o intuito de fornecer ainda mais calor ao vapor.



Motor de Combustão

Os motores são máquinas responsáveis pela conversão de energia em trabalho mecânico. Os motores a combustão **(1)** interna são aqueles em que o combustível é queimado dentro do equipamento em um mecanismo constituído por pistão, biela e virabrequim, onde o movimento alternativo do pistão dentro do cilindro é transformado em movimento rotativo. Este movimento rotativo é acoplado ao eixo de um gerador de energia elétrica, produzindo eletricidade. As emissões atmosféricas acontecem no próprio motor.

Figura 1: Ciclos termodinâmicos adotados na geração termoeletrônica.

2. Quais poluentes
são emitidos?



Gases do
Efeito Estufa

O **dióxido de carbono (CO_2)**, principal gás do efeito estufa, é um dos produtos da combustão nas usinas termoeletricas. Sua emissão está diretamente relacionada com o combustível utilizado, bem como com a eficiência de conversão de energia na geração.



Material
Particulado

Material particulado (MP) é o conjunto de sólidos ou líquidos de diâmetro muito pequeno que permanecem em suspensão nos gases exauridos pelas usinas termoeletricas e podem ser descartados para a atmosfera. Podem resultar de processos de combustão incompleta ou cinzas que não são combustíveis.



Óxidos de
Nitrogênio

Óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados sempre que um combustível é queimado na presença de ar. Sob o efeito de altas temperaturas, nitrogênio e oxigênio reagem formando NO e NO_2 . Óxidos de nitrogênio contribuem para a chuva ácida e, também, reagem com compostos orgânicos voláteis (COVs) na presença de luz solar, formando oxidantes fotoquímicos (poluentes secundários).



Óxidos de
Enxofre

Os **óxidos de enxofre** são originados da queima de qualquer material que possui enxofre. A geração termoeletrica é um dos maiores contribuintes para a emissão deste poluente. O dióxido de enxofre (SO_2) constitui a parcela principal de emissões, mas trióxido de enxofre (SO_3) também é emitido. Ambos podem formar ácidos quando hidrolisados, causando efeitos ambientais diversos.



Outros

Outros poluentes também podem ser emitidos pela geração termoeletrica. Emissões de monóxido de carbono (CO) aparecem como consequência da combustão incompleta e podem ser remediadas com um bom design da caldeira e controle do processo. Metais pesados (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, V, Zn) também podem ser emitidos de acordo com a característica do combustível utilizado. Normalmente, as emissões estão associadas ao material particulado e, portanto, para seu controle, deve-se utilizar bons sistemas de controle de material particulado.

Figura 2: Principais poluentes emitidos na geração termoeletrica Fonte: Cooper, 2011

3. Qual a relação
entre os combustíveis
e os tipos de poluentes?

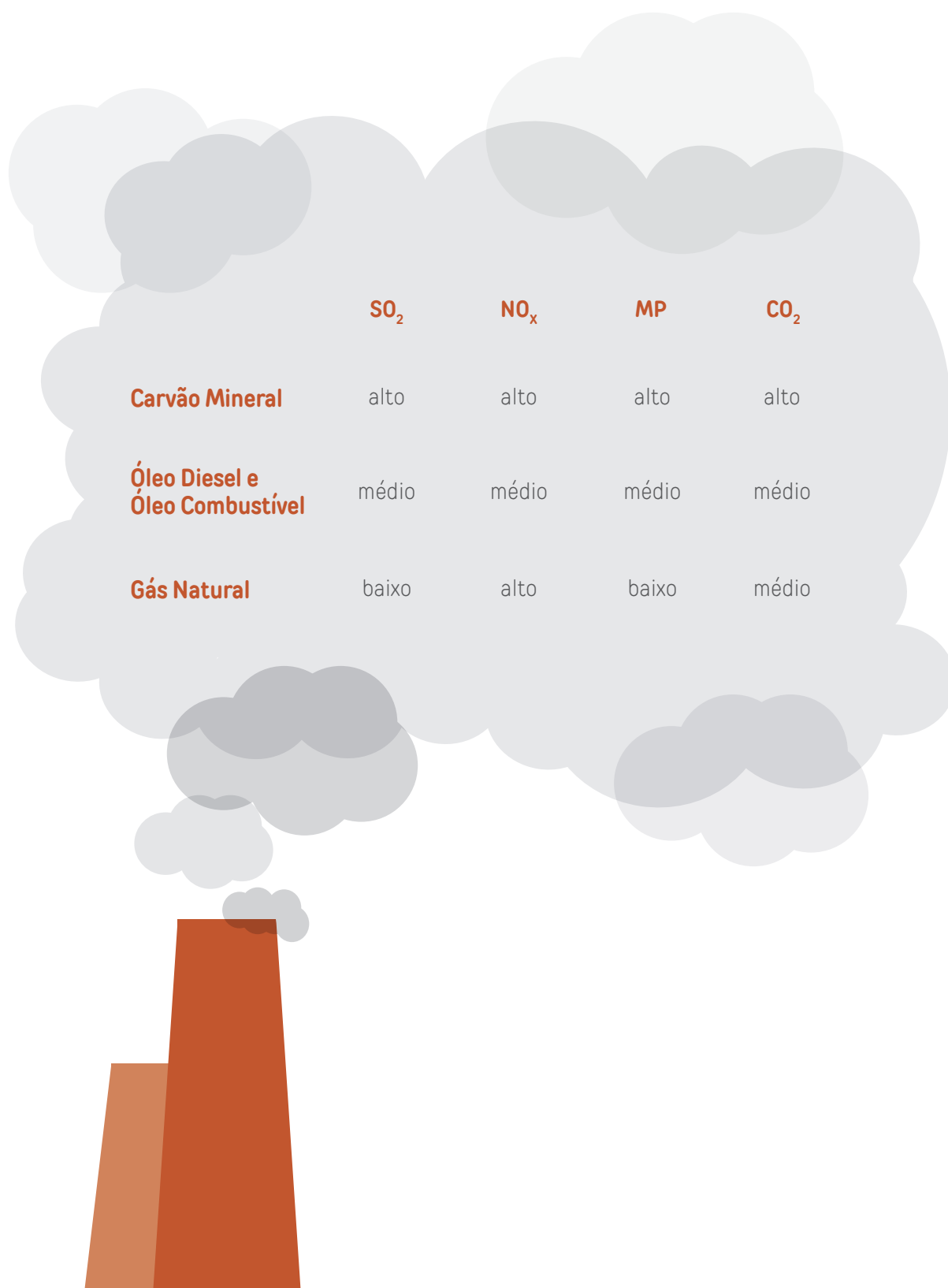


Figura 3: Relação entre os poluentes emitidos e os principais combustíveis fósseis utilizados na geração termoeleétrica

4. Qual o papel do ciclo termodinâmico?

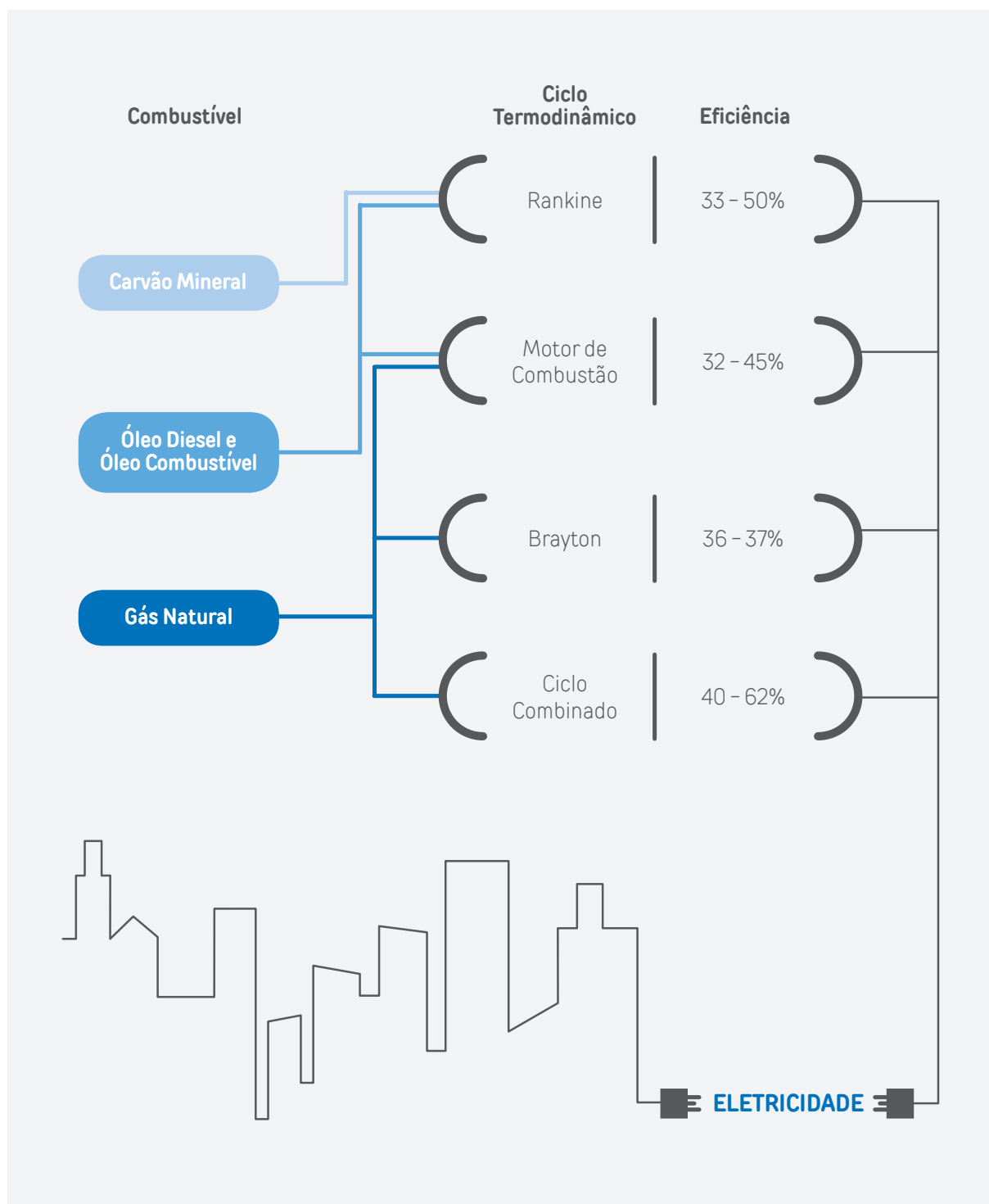


Figura 4: Relação entre os combustíveis e os ciclos termodinâmicos utilizados na geração termoeétrica. Fonte: Bajay, Lora

5. Onde se localizam
as usinas no Brasil?

O Brasil possui uma matriz hidrotérmica de geração de eletricidade, desta forma, as usinas hidroelétricas e termoeleétricas são responsáveis pela maior parte do suprimento de eletricidade nacional. Segundo o Balanço Nacional Energético, em 2014, 63,2% da demanda total de eletricidade (590 TWh) foi suprida por hidroeletricidade seguido pela termoeletricidade de origem fóssil com 24,2% (4,5% por carvão mineral, 6% óleos diesel e combustível e 13,7% por gás natural).

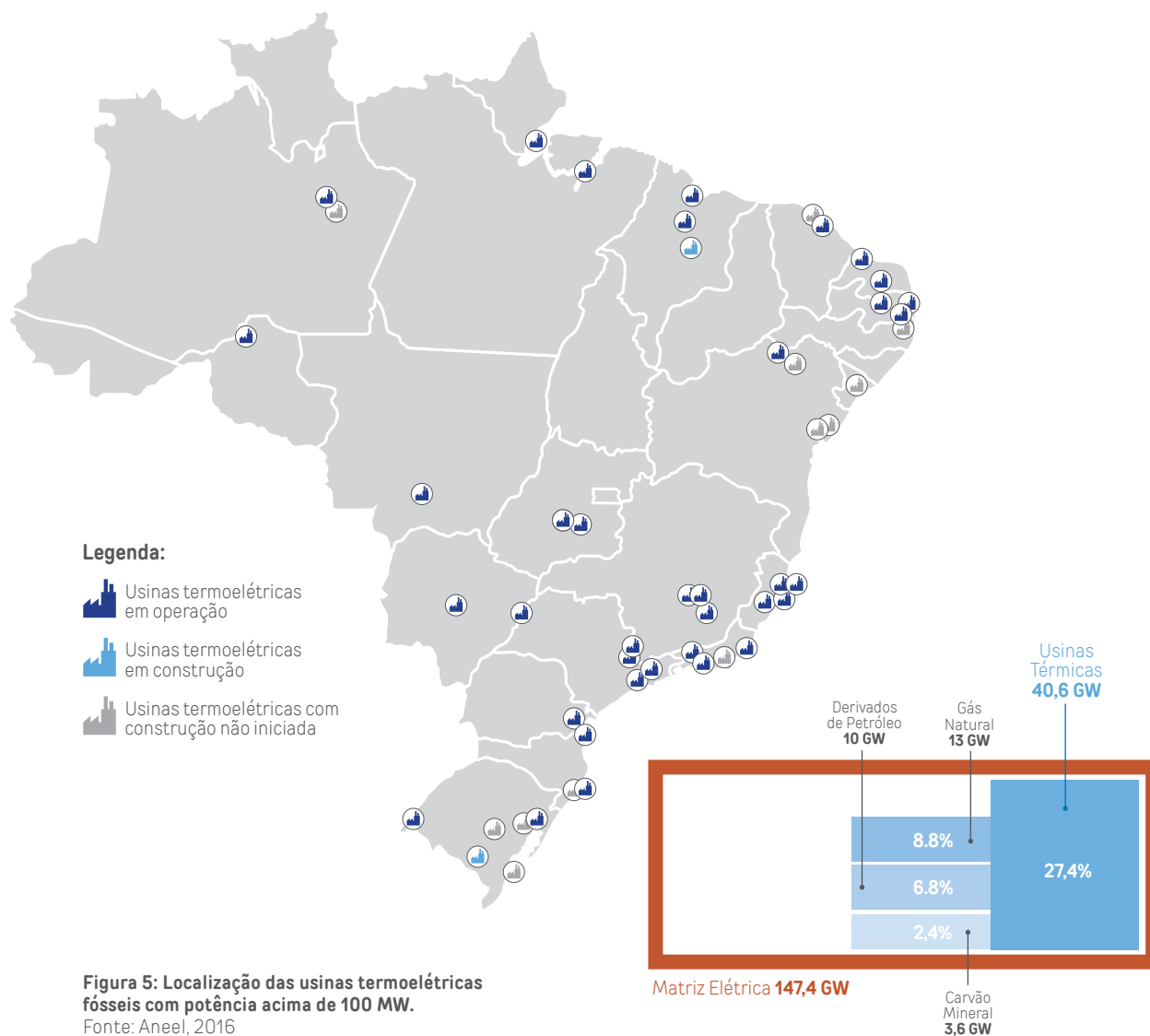
Estas termoeleétricas possuem, atualmente, importante papel no Sistema Interligado Nacional (SIN). Sua flexibilidade operacional ajuda a garantir eletricidade para sistema em momentos de instabilidade hídrica.

Por outro lado, visto este papel flexível de geração, estas usinas localizam-se próximas aos centros urbanos (centros de carga), visando, também, reduzir os custos de transmissão e facilitar o

atendimento à demanda. Entretanto, estas usinas podem contribuir consideravelmente para a carga de poluentes locais e, quando somadas às outras fontes pontuais e móveis, agravam os problemas ambientais e de saúde pública.

Como apresentado pela **Figura 5**, as usinas brasileiras de grande porte encontram-se, principalmente, distribuídas na região sul/sudeste e no extremo nordeste do país, tendência observada, também, na expansão do parque termoeletrico nacional (usinas em construção e com construção não iniciada).

O gás natural é o combustível predominante na geração termoeletrica no país, com usinas distribuídas em todo território nacional. Por outro lado, as usinas que utilizam carvão mineral distribuem-se em três principais polos no estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Ceará, devido à disponibilidade do combustível.



8. Como controlar
as emissões?

Visto que os empreendimentos termoeletrônicos são intensivos em emissões atmosféricas, a correta avaliação das tecnologias de controle de emissões no projeto torna-se essencial para reduzir os impactos advindos desses empreendimentos. A seguir, descreve-se brevemente as tecnologias de controle para material particulado, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio, em operação comercial, salientando-se as melhores tecnologias disponíveis (que apresentam melhor eficiência de remoção).

PRECIPITADORES ELETROESTÁTICOS

Melhor Tecnologia Disponível



MP

Os precipitadores eletrostáticos aplicam cargas elétricas para separar partículas dos fluxos de gás. Uma elevada queda de pressão é estabelecida entre os eletrodos, fazendo com que as partículas que passam por este campo elétrico adquiram carga. As partículas eletricamente carregadas são atraídas e coletadas nas placas eletrificadas com cargas opostas e o gás limpo flui pelo equipamento. Periodicamente, as placas devem ser limpas sacudindo as placas para que a camada de poeira acumulada seja removida. A poeira é coletada em containers no fundo do dispositivo [2].

Os parâmetros de operação que influenciam no desempenho destes equipamentos incluem a carga mássica das cinzas, distribuição granulométrica, resistividade elétrica das cinzas, além da voltagem e da corrente aplicadas. Outros fatores que determinam a eficiência de remoção dos precipitadores são a área da placa coletora e a velocidade do gás.

Eficiência de remoção (%): 94,8 a 99,5 dependendo das especificidades do material particulado [3].

FILTROS DE MANGAS

Melhor Tecnologia Disponível



Os filtros de manga operam considerando-se os mesmos princípios dos aspiradores de pó residenciais. O fluxo de ar carregado com partículas de poeira é forçado por uma bolsa de pano. Com a passagem do fluxo através do pano, a poeira acumula neste pano, criando um fluxo de ar limpo. A poeira é periodicamente removida do pano sacudindo-o ou aplicando uma corrente de ar no sentido reverso do anteriormente aplicado [2].

A eficiência de remoção de particulados através de filtros de manga depende das características das partículas (distribuição granulométrica e propriedades físicas) e do regime de operação (perda de carga, relação ar/pano, sequência de limpezas, intervalos entre limpezas, métodos e intensidade de limpeza). Esses filtros podem ser de diversos materiais (algodão, poliéster, papel, etc.), os quais são selecionados de acordo com a aplicação [2].

Eficiência de remoção (%): 99,8 a 99,9 dependendo das especificidades do material particulado [3].

CICLONES



Geralmente, os ciclones por si só não são eficientes ao ponto de atenderem às regulações de qualidade do ar. Muitas vezes, são instalados como pré-coletores e antes dos precipitadores, filtros de manga e lavadores, a fim de reduzir a carga de particulados e os custos de instalação e operação. A eficiência dos coletores mecânicos depende fortemente da massa e do diâmetro aerodinâmico da partícula [2].

Os ciclones removem partículas fazendo com que o fluxo de gases flua em um padrão espiral dentro de uma tubulação. Devido à força centrífuga, as partículas maiores se movem para fora do fluxo e colidem com as paredes do tubo. As partículas escorregam pela parede do tubo e caem no fundo do ciclone, sendo posteriormente removidas. O gás limpo sai por cima do equipamento [2].

Eficiência de remoção (%): 84,6-93,9 para pó grosso; 65,3-84,2 para pó fino e 22,4-52,3 para pó superfino [3].

Tabela 1 – Estimativas de emissão de material particulado utilizando as melhores tecnologias disponíveis. Fonte: adaptado de BAT

Capacidade Instalada (MW)	Emissões de Material Particulado (mg/Nm³)				Tecnologias necessárias para atingir estes níveis
	Carvão Mineral		Combustíveis líquidos para caldeiras		
	Novas Usinas	Usinas Existentes	Novas Usinas	Usinas Existentes	
50 - 100	5 - 20	5 - 30	5 - 20	5 - 30	Precipitador eletroestático ou Filtro Manga
100 - 300	5 - 20	5 - 25	5 - 20	5 - 25	Precipitador eletroestático ou Filtro Manga, em combinação com Separador (úmido, semi-seco ou seco)
> 300	5 - 10	5 - 20	5 - 10	5 - 20	

SEPARADORES ÚMIDOS WET SCRUBBERS

Melhor Tecnologia Disponível



SO_x

O scrubber emprega os princípios de impacto e interceptação das partículas de poeira por parte de gotículas de água. As maiores e mais pesadas gotículas de água são facilmente separadas do gás pela ação da gravidade. As partículas sólidas podem então ser independentemente separadas da água ou a água pode ser tratada antes de reuso ou descarga em algum corpo hídrico [2].

A eficiência dos lavadores depende da distribuição granulométrica das partículas, da perda de carga do gás através do lavador e da pressão da água [2].

A vantagem dos separadores úmidos é que este equipamento também controla as emissões de HCl, HF, material particulado e metais pesados. Entretanto, devido ao custo elevado, estes separadores não são considerados a melhor tecnologia disponível para usinas com capacidade inferior a 100 MW [7].

Eficiência de remoção (%): Cerca de 92-98 [7].

SEPARADORES SEMI-SECOS SPRAY SEMI-DRY SCRUBBER



Depois dos separadores úmidos, os semi-secos são considerados a melhor tecnologia de des-sulfurização disponível no mercado. Nos últimos anos, esta tecnologia amadureceu bastante, evoluindo a eficiência de remoção. Geralmente, são utilizados em usinas de pequeno e médio porte e são caracterizados por menores custos de instalação mas maiores custos de operação [7].

Estes sistemas possuem funcionamento semelhante aos sistemas úmidos, porém com maior concentração de adsorvente. Assim que os gases de exaustão se misturam com a solução adsorvente, a água da solução evapora, aumentando a concentração. A água que resta no adsorvente sólido aumenta a reação com o SO₂ e, desta forma, o processo gera um resíduo sólido seco o qual deve ser coletado pelo sistema de controle de material particulado [4].

A performance destes sistemas é mais sensível às condições de operação como temperatura e pressão. Gases de exaustão com elevadas concentrações de SO₂ ou altas temperaturas reduzem a performance destes separadores.

Eficiência de remoção (%): Entre 80 e 90% [4].

SEPARADORES SECOS DRY SORBENT INJECTION SCRUBBERS



Este sistema injeta pneumáticamente o adsorvente diretamente dentro da caldeira, no economizador ou na tubulação. O resíduo seco é então removido utilizando um sistema de controle de material particulado como filtros de mangas ou precipitadores eletroestáticos. Os gases de exaustão são geralmente resfriados antes de entrar no sistema de controle de material particulado. Ainda, a água pode ser adicionada antes da inserção do material adsorvente para aumentar a eficiência de remoção de SO_x . Reagentes alcali-

nos com cálcio ou sódio são os mais utilizados [4].

Para uma maior eficiência, o adsorvente deve ser distribuído uniformemente durante sua inserção, bem como o tempo e temperatura de contato devem ser ideais. Separadores secos são vistos como uma tecnologia emergente de controle para médias e pequenas instalações industriais.

Eficiência de remoção (%): Adsorventes de cálcio: 50-60. Adsorventes de sódio: cerca de 80. As eficiências destes equipamentos estão crescendo, visto aumento da maturidade tecnológica [4].

Tabela 2 – Estimativas de emissão de óxidos de enxofre utilizando as melhores tecnologias disponíveis. Fonte: adaptado de BAT

Capacidade Instalada (MW)	Emissões de óxidos de enxofre (mg/Nm³)				Tecnologias necessárias para atingir estes níveis
	Carvão Mineral		Combustíveis líquidos para caldeiras		
	Novas Usinas	Usinas Existentes	Novas Usinas	Usinas Existentes	
50 – 100	200 – 400 150 – 400*	200 – 400 150 – 400*	100 – 350	100 – 350	Combustível com baixo teor de enxofre. Separadores úmidos, semi-secos ou secos dependendo do tamanho da usina. Tecnologias combinadas de redução de NO _x e SO ₂ como injeção de adsorventes.
100 – 300	100 – 200	100 – 250	100 – 200	100 – 250	
> 300	20 – 150 100 – 200**	20 – 200 100 – 200**	50 – 150	50 – 200	

* FBC – Combustão em leito fluidizado. ** CFBC/PFBC – Combustão em leito fluidizado circulante/Combustão em leito fluidizado pressurizado

Cerca de 95% de todo o NO_x advindo de fontes estacionárias, como a termoelectricidade, é emitido como óxido nítrico (NO). Esse elemento se dá de duas diferentes maneiras: NO_x térmico ou NO_x do combustível. O térmico é o NO_x formado por reações entre o nitrogênio e o oxigênio presentes no ar e utilizados na combustão. A taxa de formação deste tipo de NO_x é altamente sensível à temperatura e sua formação torna-se rápida a partir de $1600\text{--}2000^\circ\text{C}$. O NO_x do combustível resulta da utilização de combustíveis que contêm nitrogênio orgânico em sua composição, principalmente carvão e óleos de petróleo [2]. As emissões de NO_x variam dependendo do tipo de combustível e tecnologia de combustão.

REDUÇÃO CATALÍTICA SELETIVA (SCR)

Melhor Tecnologia Disponível



Tecnologias de tratamento dos gases de exaustão são necessárias quando uma alta eficiência de remoção é necessária por parte dos equipamentos de controle. A tecnologia mais avançada de tratamento de gases é redução catalítica seletiva (SCR). Nela, as espécies de NO_x são reduzidas por fim em N_2 gasoso [2].

No catalisador, amônia, ureia, hidrogênio, monóxido de carbono e até mesmo ácido sulfídrico podem ser utilizados como gás de redução. Amônia anidra é o mais utilizado e mais efetivo para plantas de grande escala. Entretanto, devido sua alta toxicidade, recomenda-se o uso de amônia aquosa ou ureia em regiões de maior densidade populacional [2].

Neste sistema, o gás redutor é injetado na saída do economizador e, ao entrar em contato com os gases de escape, reage com o NO produzindo nitrogênio (N_2) e água. A temperatura ideal de operação é entre 300 e 400°C [2].

Eficiência de remoção (%): Entre 80 e 90% [2].

QUEIMADORES DE BAIXA EMISSÃO DE NO_x - TECNOLOGIAS LOW- NO_x

Melhor Tecnologia Disponível

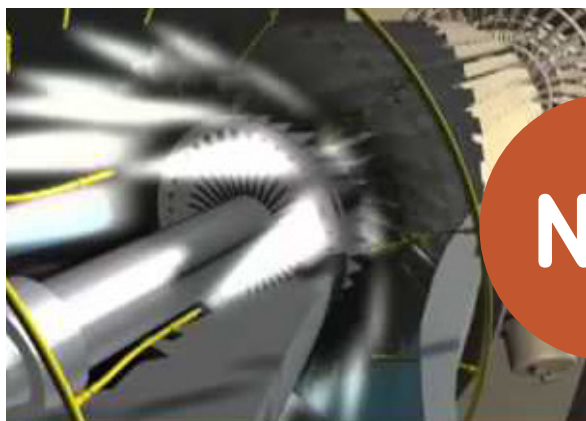


Os queimadores Low- NO_x são a tecnologia mais comum de controle de NO_x , podendo não só serem aplicados em usinas novas de geração como também são facilmente adaptáveis em usinas existentes independente do combustível utilizado.

Basicamente, estes novos queimadores inibem a formação de NO_x por meio do controle da mistura de ar e combustível. Estes novos queimadores possuem um bico para injetar a mistura ar/combustível e outros dois injetores para o ar, dando ao operador a possibilidade ajustar a proporção de ar e combustível de maneira sub-estequiométrica na primeira zona de queima e fornecer excesso de oxigênio nas outras zonas. Desta forma, menos NO_x é formado visto que maiores e mais ramificadas chamas são criadas e menores temperaturas de pico são atingidas [2].

Eficiência de remoção (%): entre 40–60 se comparado com queimadores antigos. Queimadores ultra-low NO_x chegam a reduzir 70% [2].

MUDANÇAS DOS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO E INJEÇÃO DE ÁGUA



NO_x

Como citado anteriormente, diversos fatores contribuem para a formação de NO_x. O controle devido do processo de combustão reduz a formação deste poluente de três possíveis maneiras: (1) redução da temperatura na zona de combustão, (2) redução do tempo de residência do gás na zona de combustão, (3) redução da concentração de oxigênio na zona de combustão [2].

Para permitir tal controle, a usina termoeletrica pode modificar as condições de operação na

caldeira existente ou instalar uma nova caldeira projetada com novas tecnologias de combustão (tecnologias low-NO_x) [2].

Ainda, injeção de água ou até mesmo vapor pode se tornar uma maneira efetiva de reduzir a temperatura da chama e, desta forma, diminuir a formação de NO_x térmico.

Eficiência de remoção (%): Injeção de água: cerca de 80. A perda de energia para uma turbina a gás é de cerca de 1% em termos de saída nominal [2].

Tabela 3 – Estimativas de emissão de óxidos de nitrogênio utilizando as melhores tecnologias disponíveis – Combustíveis líquidos. Fonte: adaptado de BAT

Capacidade Instalada (MW)	Emissões de óxidos de nitrogênio (mg/Nm³)		Tecnologias necessárias para atingir estes níveis
	Combustíveis líquidos para caldeiras		
	Novas Usinas	Usinas Existentes	
50 – 100	150-300	15-450	Combinação de redução catalítica seletiva (SCR) e mudanças de parâmetros de operação.
100 – 300	50-150	50-200	
>300	5 – 100	50-150	

Tabela 4 – Estimativas de emissão de óxidos de nitrogênio utilizando as melhores tecnologias disponíveis – Carvão Mineral. Fonte: adaptado de BAT

Capacidade Instalada (MW)	Capacidade Instalada (MW)	Emissões de óxidos de nitrogênio (mg/Nm³)		Tecnologias necessárias para atingir estes níveis
		Novas Usinas	Usinas Existentes	
50 – 100	Grelha	200-300	200-300	Combinação de ajustes de parâmetros de processo e/ou SNCR
	PC	90-300	90-300	Combinação de ajustes de parâmetros de processo e/ou SNCR/SCR
	CFBC e PFBC	200-300	200-300	Combinação de ajustes de parâmetros de processo
100 – 300	PC	90-200	90-200	Combinação de ajustes de parâmetros de processo e SCR
	BFBC, CFBC e PFBC	100-200	100-200	Combinação de ajustes de parâmetros de processo e SNCR
>300	PC	90-150	90-200	Combinação de ajustes de parâmetros de processo e SCR
	50-BFBC, CFBC e PFBC	50-150	50-200	Combinação de ajustes de parâmetros de processo
PC Combustão pulverizada BFBC Combustão em leito fluidizado borbulhante		CFBC PFBC	Combustão em leito fluidizado circulante Combustão em leito fluidizado pressurizado	SCR SNCR Redução catalítica seletiva Redução seletiva não catalítica

Tabela 5 – Estimativas de emissão de óxidos de nitrogênio utilizando as melhores tecnologias disponíveis – Gás Natural. Fonte: adaptado de BAT

Tipo de Usina	Emissões de óxidos de nitrogênio (mg/Nm³)		Nível de Oxigênio (%)	Tecnologias necessárias para atingir estes níveis
	Gás Natural			
	NO _x	CO		
Turbinas a gás				
Novas turbinas	20-50	5-100	15	Queimadores de baixa emissão de NOx (DLN) ou SCR
DLN turbinas existentes	20-75	5-100	15	Queimadores de baixa emissão de NOx (DLN) quando disponíveis pacotes de retrofit
Turbinas existentes	50-90	30-100	15	Injeção de água ou SCR
Motores a gás				
Novos motores	20-75	30-100	15	Conceito de Lean-burn ou SCR ou catalizador de oxidação para CO
Motores existentes	20-100	30-100	15	Ajustes de baixa emissão de NOx
Caldeiras a gás				
Novas caldeiras	50-100	30-100	3	Queimadores de baixa emissão de NOx (DLN) ou SCR ou SNCR
Caldeiras existentes	50-100	30-100	3	Queimadores de baixa emissão de NOx (DLN) ou SCR ou SNCR
Ciclo Combinado (CC)				
Novos CC sem queima suplementar de combustível	20-50	5-100	15	Queimadores de baixa emissão de NOx (DLN) ou SCR
CC existentes sem queima suplementar de combustível	20-90	5-100	15	Queimadores de baixa emissão de NOx (DLN) ou SCR ou injeção de água/vapor
Novos CC com queima suplementar de combustível	20-50	30-100	Específico da usina	Queimadores de baixa emissão de NOx (DLN) ou SCR ou SNCR
CC existentes com queima suplementar de combustível	20-90	30-100	Específico da usina	Queimadores de baixa emissão de NOx (DLN) ou SCR ou injeção de água/vapor ou SCR ou SNCR
SCR Redução catalítica seletiva	SNCR Redução seletiva não catalítica	DLN Dry low NO _x		

9. O que acontece
no mundo?

A discussão sobre termoeletricidade torna-se ainda mais relevante no âmbito mundial. Em 2014, a termoeletricidade fóssil foi responsável por 66% da geração de eletricidade mundial, distribuída em 3.638,4 GW de capacidade instalada [5]. Diferentemente do Brasil, o carvão mineral é a fonte mais participativa mundialmente, produzindo quase 40% de toda a eletricidade em 2014 (8.726 TWh). Ganhando participação nos últimos anos, o gás natural atingiu, para o mesmo ano, 22% da geração (4.933 TWh). Já os óleos diesel e combustível produziram 5% da eletricidade, sendo o combustível fóssil de menor relevância mundial [5].

Apesar do avanço das tecnologias de geração renovável como a solar e eólica, ainda é prepon-

derante a participação dos combustíveis fósseis na matriz elétrica mundial, razão pela qual se torna essencial o desenvolvimento de projetos de usinas que não só atendam os requisitos ambientais legais mas que busquem o avanço tecnológico no controle de emissões atmosféricas.

A seguir, apresenta-se usinas termoeletricas e seus indicadores de emissão por unidade de energia para os poluentes atmosféricos mais relevantes. Estas usinas, mesmo utilizando os combustíveis fósseis convencionais, adotam as melhores tecnologias disponíveis de geração e controle, permitindo umas das melhores performances atuais e servindo como referência para a avaliação de projetos no âmbito mundial.

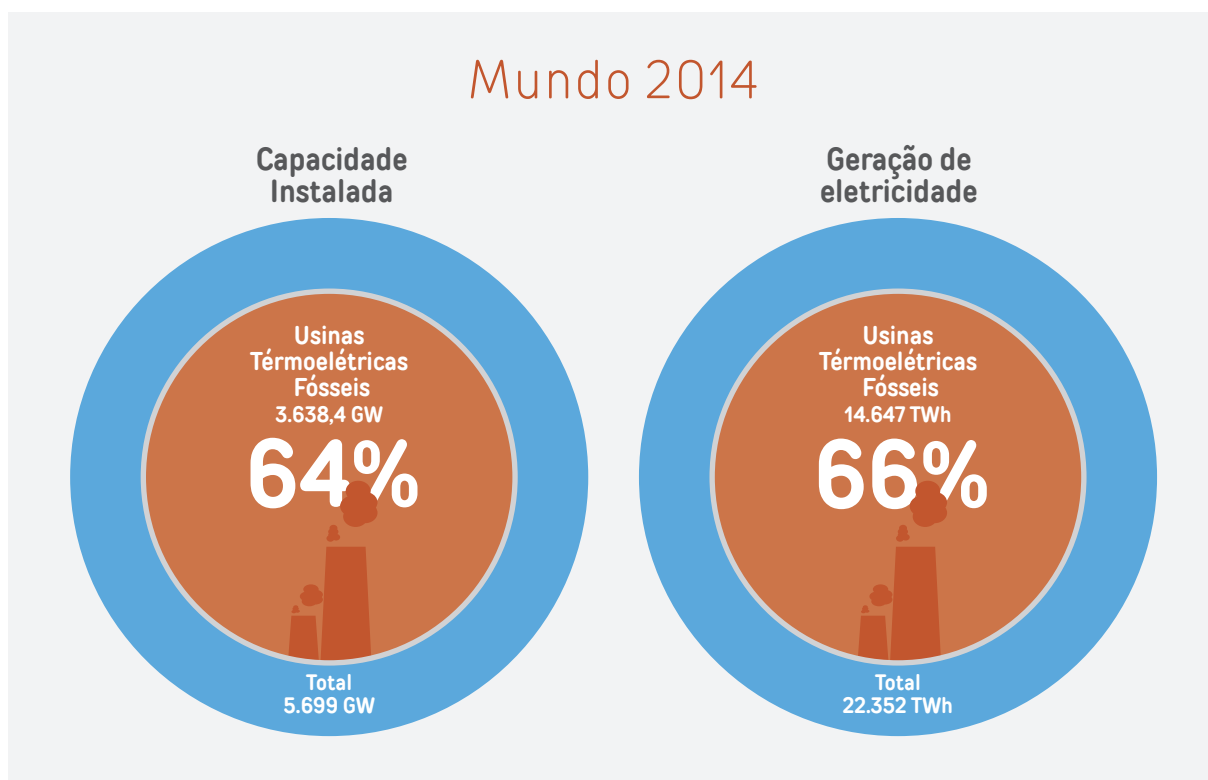


Figura 6: Capacidade Instalada e Geração de eletricidade por termoeletricidade fóssil no mundo. Fonte: US Energy Information Administration, 2016

10. Como performam
usinas *benchmark*?

Carvão Mineral

Fonte: CEC.org – North American Power Plant Air Emissions

MP



BALDWIN ENERGY COMPLEX

Capacidade Instalada:

1892,1 MW

Localização:

Randolph – Illinois – EUA
(38.205 – 89.855)

Ciclo Termodinâmico:

Rankine

Sistemas de Controle:

Injeção de ar complementar de combustão, redução catalítica seletiva e queimadores de baixa emissão de NO_x

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 931,50

NO_x – 0,350

SO_x – 1,726

MP10 – 0,196

SO_x



CLOVER

Capacidade Instalada:

848 MW

Localização:

Halifax – Virginia – EUA
(36.8667 – 78.7)

Ciclo Termodinâmico:

Rankine

Sistemas de Controle:

Separadores úmidos e redução catalítica seletiva

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 972,77

NO_x – 1,334

SO_x – 0,249

NO_x



POLK

Capacidade Instalada:

1029,5 MW

Localização:

Polk – Florida – EUA
(27.7286 – 81.9897)

Ciclo Termodinâmico:

Ciclo Combinado – IGCC

Sistemas de Controle:

Queimadores de baixa emissão de NO_x

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 897,52

NO_x – 0,218

SO_x – 0,538

Óleo Diesel e Óleo Combustível

Fonte: LARALA DATABASEASE e CEC.org – North American Power Plant Air Emissions

MP



RIVIERA

Capacidade Instalada:

620,8 MW

Localização:

Palm Beach – Florida – EUA
(26,7653 – 80,0528)

Ciclo Termodinâmico:

Rankine

Sistemas de Controle:

Queimadores de baixa emissão de NO_x

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 783,97

NO_x – 1,863

SO_x – 4,506

MP10 – 0,301

SO_x



LINCOLN COMBUSTION

Capacidade Instalada:

1753,6 MW

Localização:

Lincoln – North Carolina – EUA
(35,4317 – 81,0347)

Ciclo Termodinâmico:

Brayton

Sistemas de Controle:

Injeção de água

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 1193,73

NO_x – 1,120

SO_x – 0,277

CO₂



CANAL POWER PLANT

Capacidade Instalada:

1165 MW

Localização:

Barnstable – Massachusetts – EUA
(41,7694 – 70,5097)

Ciclo Termodinâmico:

Rankine

Sistemas de Controle:

Injeção de ar complementar de combustão e queimadores de baixa emissão de NO_x

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 779,78

NO_x – 0,635

SO_x – 5,013

Gas Natural

Fonte: CEC.org – North American Power Plant Air Emissions

CO₂



GREGORY POWER FACILITY

Capacidade Instalada:

432 MW

Localização:

San Patricio – Texas – EUA
(27.8881 – 97.2572)

Sistemas de Controle:

Queimadores de baixa emissão de NO_x

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 225,24

NO_x – 0,1766

SO_x – 0,0031

SO_x



SANTAN POWER STATION

Capacidade Instalada:

1326 MW

Localização:

Maricopa – Arizona – EUA
(33.3333 – 111.751)

Sistemas de Controle:

Queimadores de baixa emissão de NO_x
e redução catalítica seletiva

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 363,82

NO_x – 0,296

SO_x – 0,0018

NO_x



LA PALLOMA GENERATING

Capacidade Instalada:

1200 MW

Localização:

Kern – Califórnia – EUA
(35.2956 – 119.5919)

Sistemas de Controle:

Queimadores de baixa emissão de NO_x
e redução catalítica seletiva

Fatores de Emissão [kg/MWh]:

CO₂ – 384,38

NO_x – 0,0197

SO_x – 0,0019

Considerações Finais

Esta Nota Técnica buscou explicitar aspectos técnicos essenciais para se compreender a relação entre a geração termoeletrica e as emissões de poluentes atmosféricas. Demonstrou, por exemplo, que o tipo de combustível usado é determinante para a natureza dos poluentes e sua intensidade. Também mostrou que outros fatores, tais como os ciclos termodinâmicos e os sistemas de controle de emissões influenciam as vazões e a intensidade das emissões. A Nota avança e detalha quais as principais tecnologias de controle de emissões, bem como traz exemplos de *benchmarks* já adotados em outros países.

Ainda que se mostre bastante técnico, todo o conteúdo e as informações apresentados podem ser úteis para a discussão em torno dos impactos ambientais da termoeletricidade.

Em primeiro lugar, trazem dados básicos sobre a relação entre a geração termoeletrica e a poluição do ar, servindo ao leitor mais leigo.

Em segundo lugar, podem contribuir para as abordagens sobre alternativas tecnológicas, não só porque decompõem as principais tecnologias de geração termoeletrica e de controle de emissões, como também listam *benchmarks*. A esse respeito, não é demais lembrar que, se, por um lado, a análise de alternativas tecnológicas (assim como de alternativas locais) revela-se como uma das principais finalidades dos estudos de impacto ambiental (EIA), por outro, tal tipo de análise tem-se dado de forma insuficiente e superficial. Trata-se, portanto, de uma contribuição importante do IEMA.

Referências

- [1] BAJAY, S. V. Termoeletricidade com combustíveis Fósseis. Comissão de Serviços de Infraestrutura – Audiência Pública: “Investimento e gestão: desatando o nó logístico do País”. Disponível em: http://www.senado.leg.br/comissoes/ci/ap/AP20130327_SergioBajay.pdf
- [2] COOPER, C. David., and F. Alley C. Air Pollution Control: A Design Approach. Prospect Heights, IL: Waveland, 2002
- [3] LORA, Electo E. S., NASCIMENTO, M. A. R. Geração Termelétrica – Planejamento, Projeto e Operação. Volumes 1 e 2. Rio de Janeiro
- [4] EPE, 2015. Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014. Rio de Janeiro
- [5] The Shift Project Data Portal. Breakdown of Electricity by Energy Source. www.tsp-data-portal.org. Acesso em: 15 de setembro de 2016
- [6] Environmental Protection Agency – EPA, 2015. Air Pollution Control Technology – Fact Sheet. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttn/catc1/dir1/ffdg.pdf>
- [7] Comissão Europeia, 2006. Best Available Techniques for Large Combustion Plants. Disponível em: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/lcp_bref_0706.pdf
- [8] ANEEL, 2016. Banco de Informações de Geração. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>
- [9] Commission for Environmental Cooperation – CEC, 2004. North American Power Plant Air Emissions. Disponível em: <http://www3.cec.org/islandora/en/item/2165-north-american-power-plant-air-emissions-en.pdf>

Para mais informações, acesse:

energiaambiente.org.br/publicacoes

Contato

Kamyla Borges – Coordenadora de Energia

kamyla@energiaambiente.org.br