



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Emissões atmosféricas na combustão de biomassa

Prof. Dr. Waldir A. Bizzo

**Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Mecânica**



UNICAMP

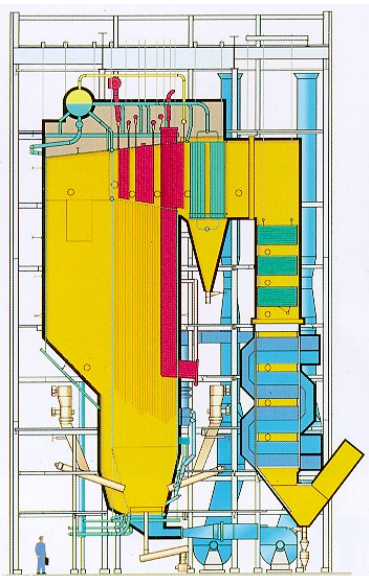


REDE NACIONAL DE  
**COMBUSTÃO**

## Poluentes atmosféricos principais na combustão de biomassa

- Material Particulado Sólido
- CO
- NO<sub>x</sub>
- SO<sub>x</sub>
- Compostos orgânicos voláteis

- Emissões atmosféricas de processos térmicos com biomassa dependem do combustível e da tecnologia utilizada
  - Combustão → energia
  - Gaseificação → combustão → energia
  - Pirólise → combustão → energia



- A combustão é tipicamente a etapa final da conversão térmica de biomassa
- Dados de emissões dos processos de gaseificação e pirólise são pouco disponíveis e pouco representativos
- A combustão da biomassa em geradores de vapor é a tecnologia mais tradicional e consolidada para geração de energia, e com maior disponibilidade de dados
- Em comparação com a pirólise e gaseificação, a combustão é o processo mais crítico em relação à emissão de poluentes atmosféricos

## Composição da biomassa

Biomassa	Composição Elementar (% massa)						
	C	H	O	N	S	Cl	cinzas
Pinus	49,2	5,9	44,3	0,06	0,03	0,19	0,3
Eucalipto	49,0	5,8	43,9	0,030	0,01		0,72
Casca de arroz	40,9	4,3	35,8	0,40	0,02	0,12	18,3
Bagaço de cana	44,8	5,3	42,3	0,38	0,01	0,03	1,5
Casca de coco	48,2	5,2	33,1	2,98	0,12		10,25
Sabugo de milho	46,5	5,8	45,4	0,47	0,01		1,40
Ramas de algodão	47,0	5,3	40,7	0,65	0,21		5,89

## Formação e emissão de poluentes

- CO (monóxido de carbono)
  - Produto intermediário da oxidação de C em  $\text{CO}_2$
  - não representa alto risco e impacto ambiental quando emitido para a atmosfera em ambientes abertos, por fontes fixas.
  - Tem grande importância nas reações intermediárias de combustão
  - Utilizado como indicador de combustão incompleta

## Formação e emissão de poluentes

- Material particulado sólido
  - Partículas arrastadas pelos gases de combustão, compostas por:
    - Cinzas volantes
    - Carbono não queimado
  - Taxa de emissão depende da tecnologia de combustão e dos equipamentos de controle de poluição atmosférica

## Formação e emissão de poluentes

- SO<sub>x</sub> (óxidos de enxôfre)
  - SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub> formados pela oxidação do S contido no combustível
  - Precursores de chuva ácida
  - Biomassa tem baixos teores de enxôfre, produzem baixíssimos teores de SO<sub>x</sub>



## Formação e emissão de poluentes

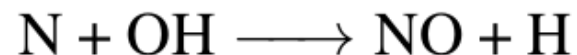
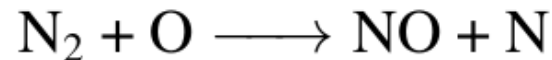
- NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrogênio)
  - NO (da ordem de 90%), N<sub>2</sub>O e NO<sub>2</sub>
  - 2 rotas principais de formação:
    - NO térmico
      - Altas temperaturas propiciam a formação de NO a partir do N<sub>2</sub> do ar de combustão
    - NO “combustível”
      - Formado a partir do N que compõe o combustível
      - Biomassa sempre tem N em sua composição: esta é a rota principal de formação de NO

## Formação e emissão de poluentes

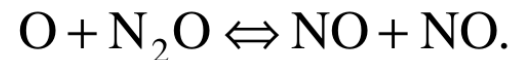
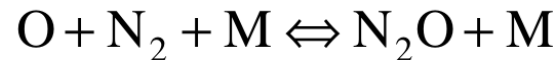
- NO
  - Prevenção da formação de NO na combustão de sólidos não é trivial
  - Controle de NO pós-combustão exige tecnologia e alto investimento
- NO
  - Precursor de chuva ácida
  - Precursor na formação de Ozônio troposférico
  - Grande desafio nos processos de combustão de biomassa

## NO térmico

Mecanismo de Zeldovich:  
- altas temperaturas locais



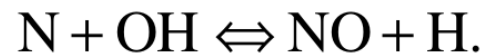
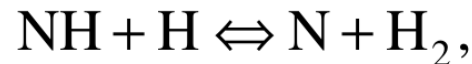
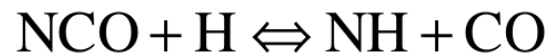
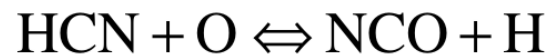
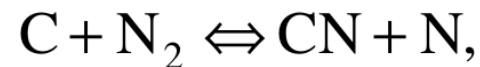
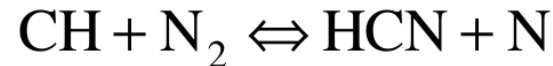
Mecanismo  $\text{N}_2\text{O}$  intermediário:  
- baixas temperaturas  
- excesso de ar



## NO imediato (“prompt NO”)

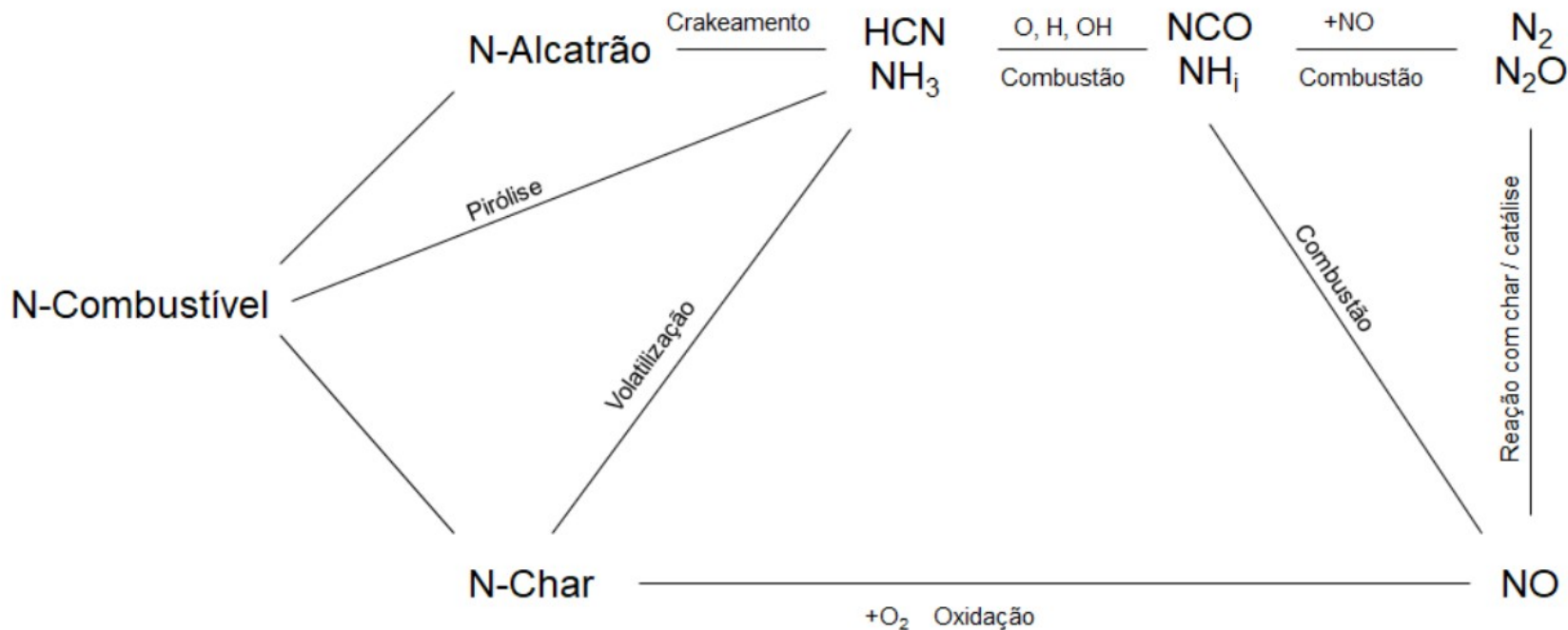
Mecanismo de Fenimore:

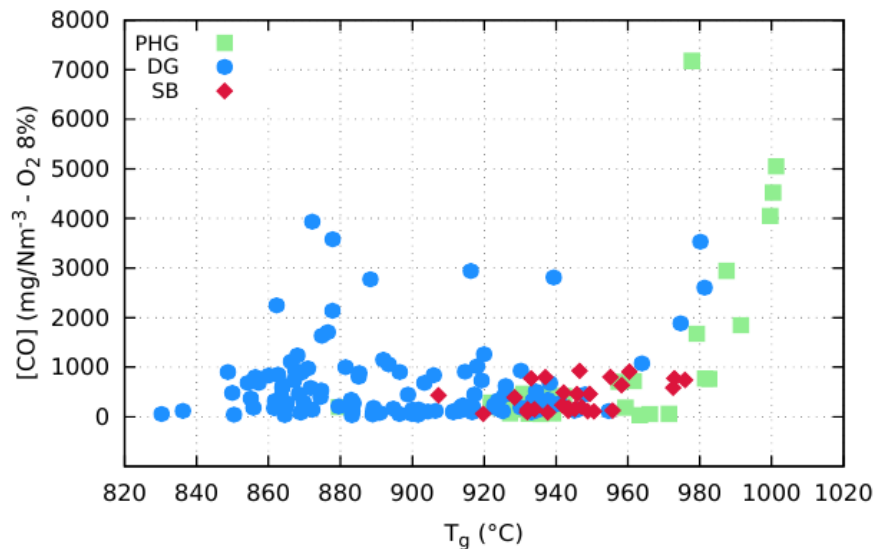
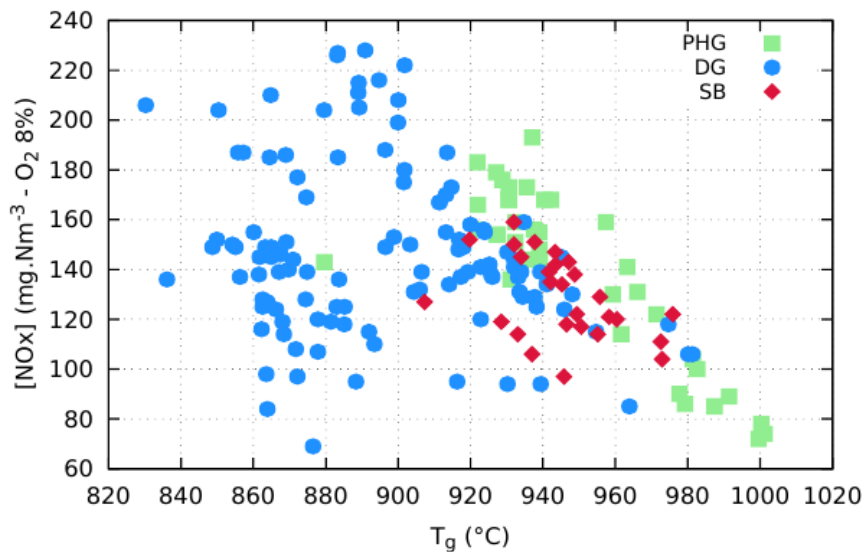
- no início da chama, forma radicais aminas e cianos
- HCN é convertido para NO



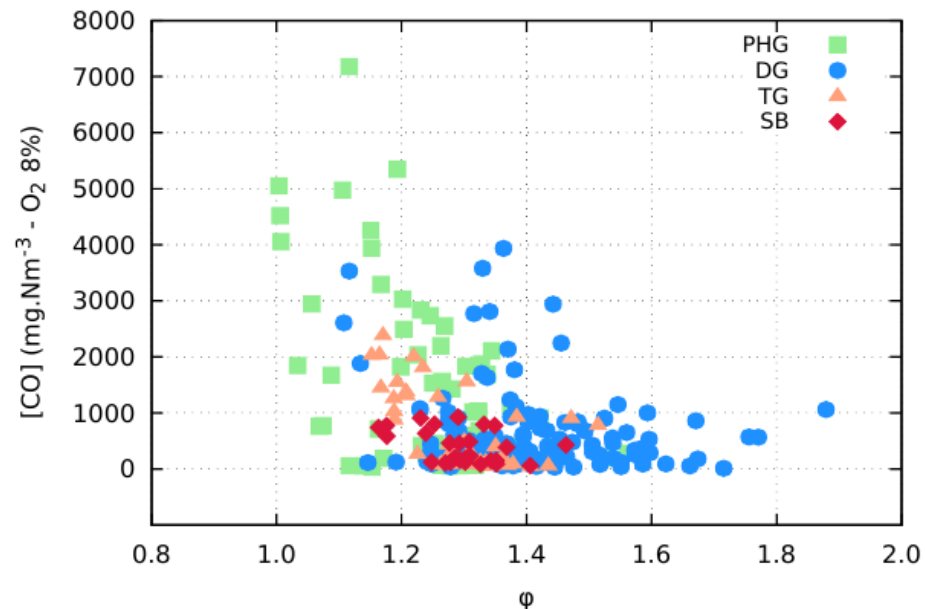
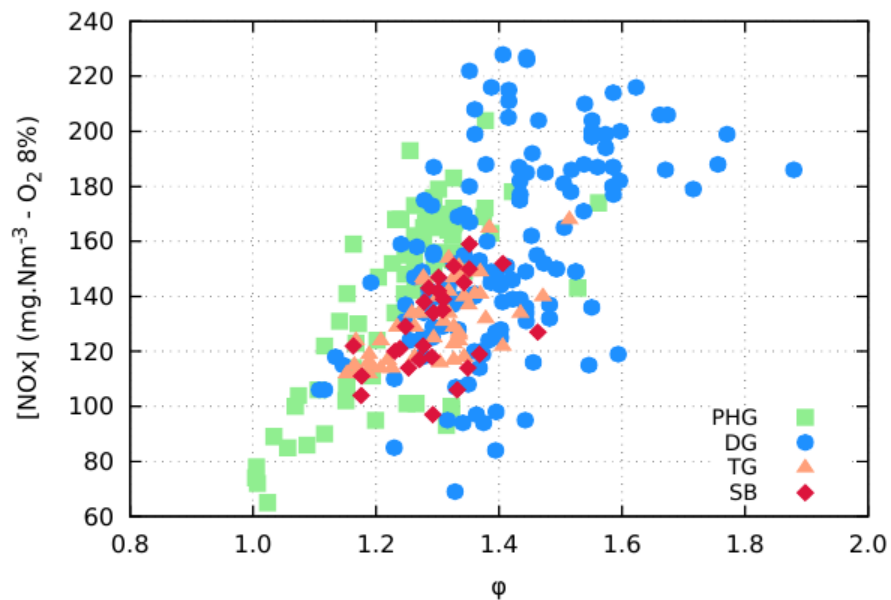
# NO combustível

- NO é formado a partir do N que compõe o combustível
- biomassa usualmente contém N





Emissão de NOx e CO em caldeiras de bagaço em função da temperatura média da fornalha



Emissão de NOx e CO em caldeiras de bagaço em função do coeficiente de excesso de ar

## Formação e emissão de poluentes

- Compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis
  - Hidrocarbonetos não queimados
  - Alcatrão e similares
  - Hidrocarbonetos Poli-aromáticos
  - Dioxinas e Furanos
- Produtos intermediários das reações de combustão, não oxidados completamente



## Formação e emissão de poluentes

- Hidrocarbonetos Poli-Aromáticos

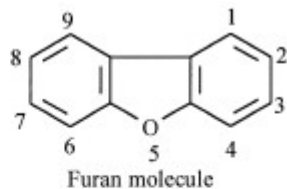
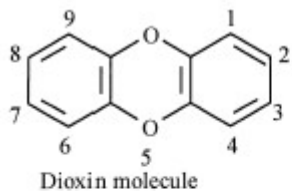
- Produzidos a partir compostos de devolatilização (etino) acoplados ao processo de formação de fuligem
- Acetileno → benzeno → HPA



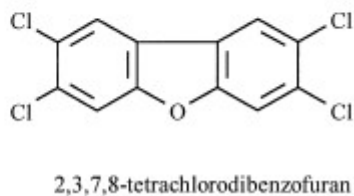
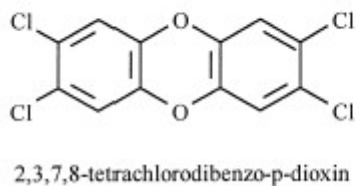
## Formação e emissão de poluentes

- Dioxinas e Furanos
- 2 rotas possíveis:
  - Síntese de moléculas de dioxina clorada a partir de uma fonte de C, Cl e O, por catálise heterogênea na janela 300 – 325 °C (*De Novo synthesis*)
  - Reações multi-etapas na região de pós-combustão:
    - Aromatização de alifáticos
    - Cloração por Cl molecular formado nas regiões mais frias do combustor (equilíbrio HCl / O)

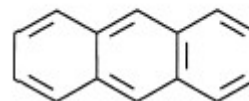
## Compostos voláteis e semi-voláteis



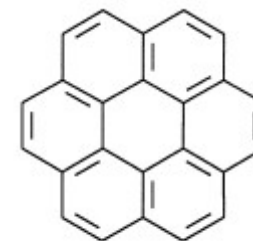
Dioxinas e  
Furanos



Hidrocarbonetos  
Poli-Aromáticos



Anthracene



Coronene

### Taxas de emissões típicas

<b>Combustível</b>	<b>Condições de operação</b>	<b>Dioxinas TEQa (ng/kg comb.)</b>	<b>Furanos TEQa (ng/kg comb.)</b>
<b>Lenha</b>	Contínuo	6.9	12.4
<b>Palha</b>	Contínuo	35.0	80.5
<b>Lixo Municipal</b>	Fogo baixo/ fogo alto	<b>115 / 46.4</b>	<b>616 / 196</b>
<b>Lodo de esgoto</b>	ESP	6.2	13.8
<b>Carvão Mineral</b>	Fogo baixo/ fogo alto	23.8 / 23.8	77.8 / 85.2

TEQa: toxicidade equivalente

ESP: com Precipitador Eletrostático

## Taxas de emissões típicas

	Biomassa	Petróleo	Carvão Mineral
NOx (mg/m <sup>3</sup> )	200 – 500	300 – 700	300 – 1200
Material Particulado (mg/m <sup>3</sup> )	50 – 1000	50 – 300	50 - 300
CO (ppm)	200 – 1500	30 – 300	30 – 300
SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	< 30	300 – 2000	300 - 2000

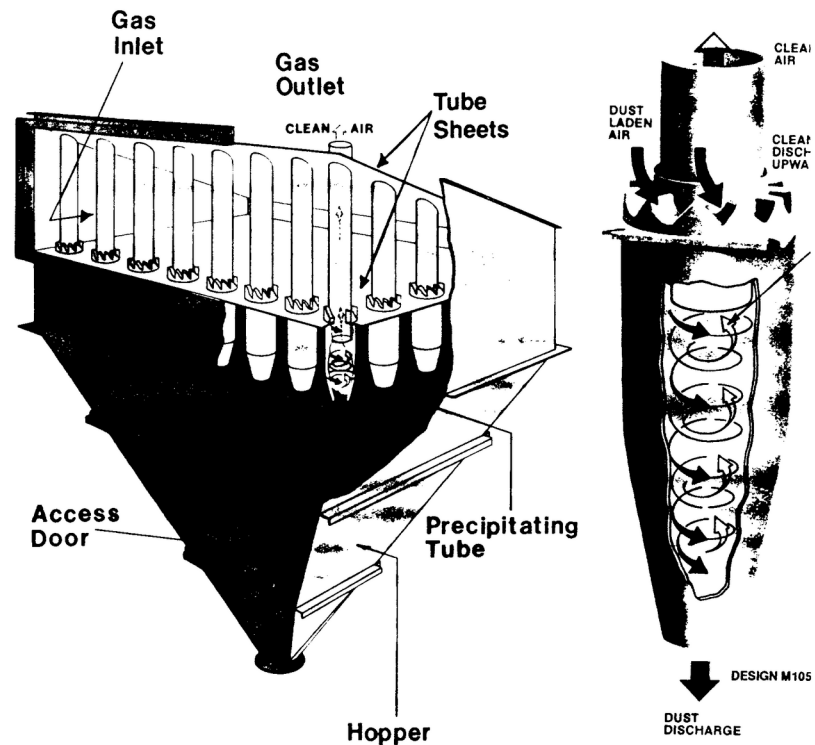
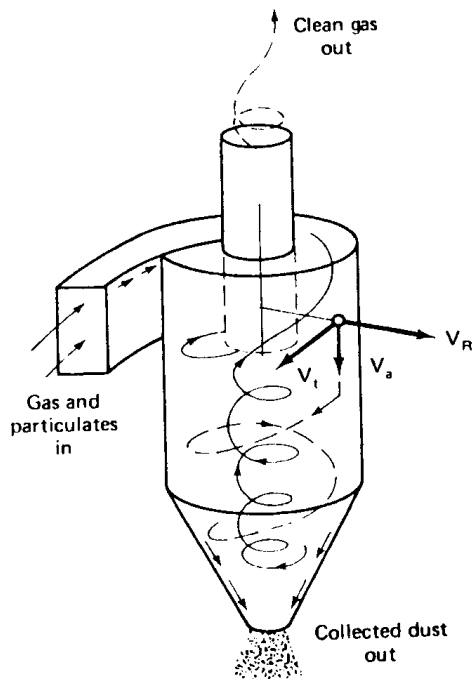
Emissões de MP, SO<sub>2</sub> e NO podem ser controladas por equipamentos pós-combustão

## Tecnologias para controle de emissões da combustão de biomassa

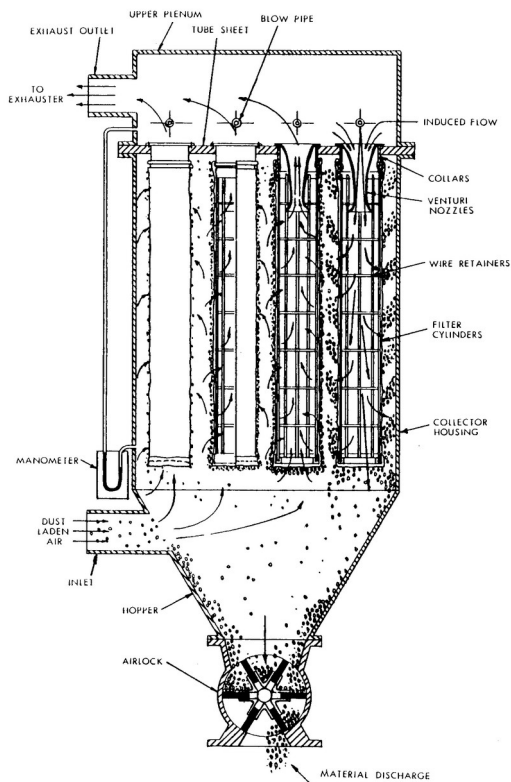
- a redução da formação de poluentes pode ser feita por melhoria do projeto do equipamento e da operação, porém nem sempre é suficiente para atingir níveis de emissões aceitáveis
  - a prática usual é o controle de emissões nos gases de exaustão das caldeiras
  - na combustão de biomassa as emissões mais críticas são material particulado sólido e óxidos de nitrogênio
- 
- para o controle de material particulado os equipamentos típicos incluem ciclones, filtros de manga, precipitadores eletrostáticos e lavadores de gás;
  - para o controle de NO<sub>x</sub>, quando aplicado, geralmente se utiliza a tecnologia de redução seletiva não catalítica.

## Coleta de material particulado sólido - Ciclones

- adequado para partículas maiores que 50~100  $\mu\text{m}$
- alta perda de carga, da ordem de  $\sim 150 \text{ mm H}_2\text{O}$
- às vezes é utilizado como pré-limpeza de um filtro de mangas, coletando as partículas de maior tamanho



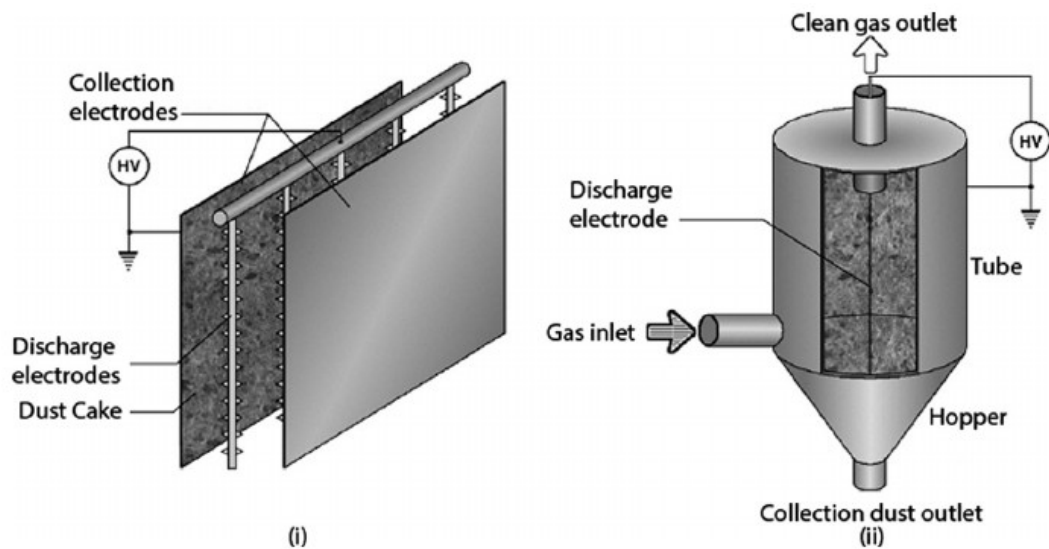
## Coleta de material particulado sólido – Filtro de mangas



- material dos elementos filtrantes limitam a temperatura de operação
- usualmente máxima temperatura 150 °C, podendo chegar a 250 °C com magas de materiais especiais (por ex. Teflon)
- tem alta eficiência de coleta, da ordem de 97%

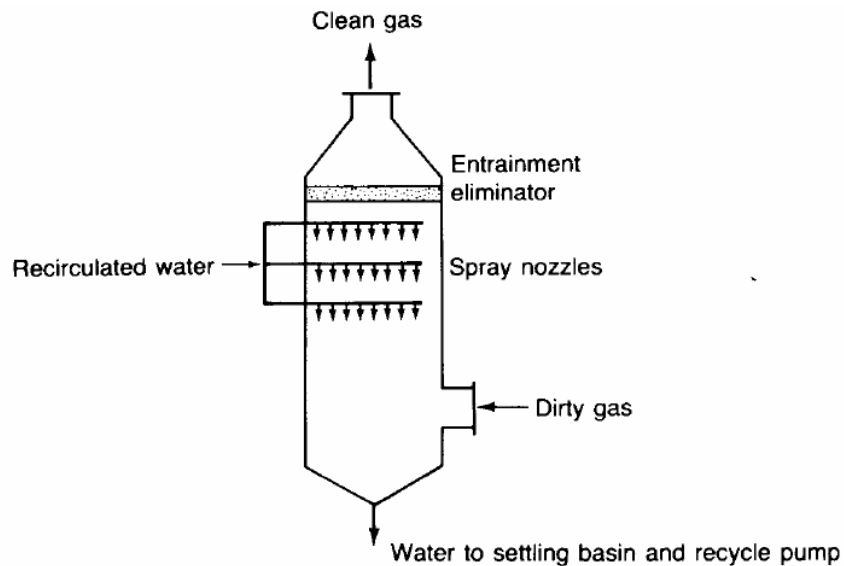


## Coleta de material particulado sólido – Precipitador eletrostático



- coleta é feita induzindo uma carga eletrotática nas partículas
- alta eficiência de coleta ~99%
- pode coletar partículas até menores que  $1 \mu\text{m}$
- pode suportar maiores temperaturas, até da ordem de  $350\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$

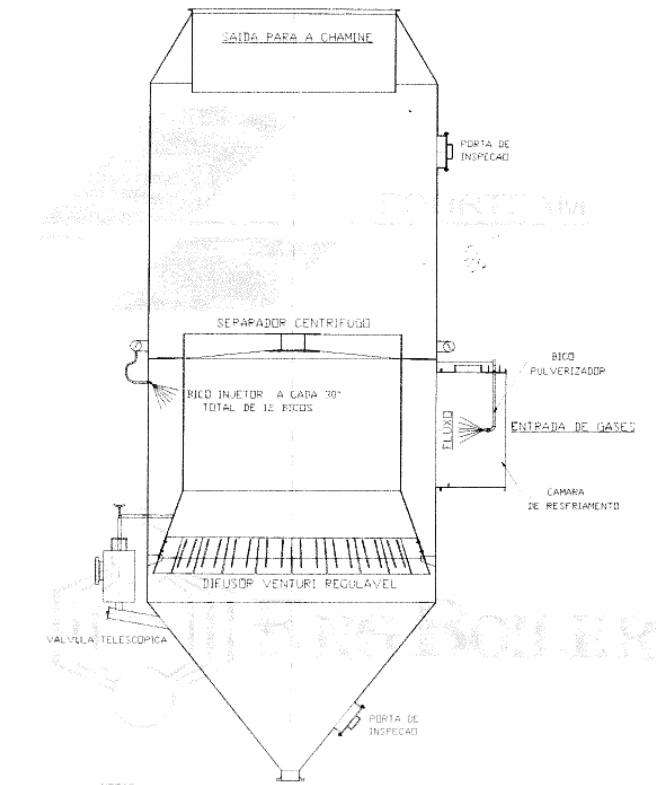
## Coleta de material particulado sólido – Lavador de gás



(a) Vertical spray chamber (countercurrent flow)

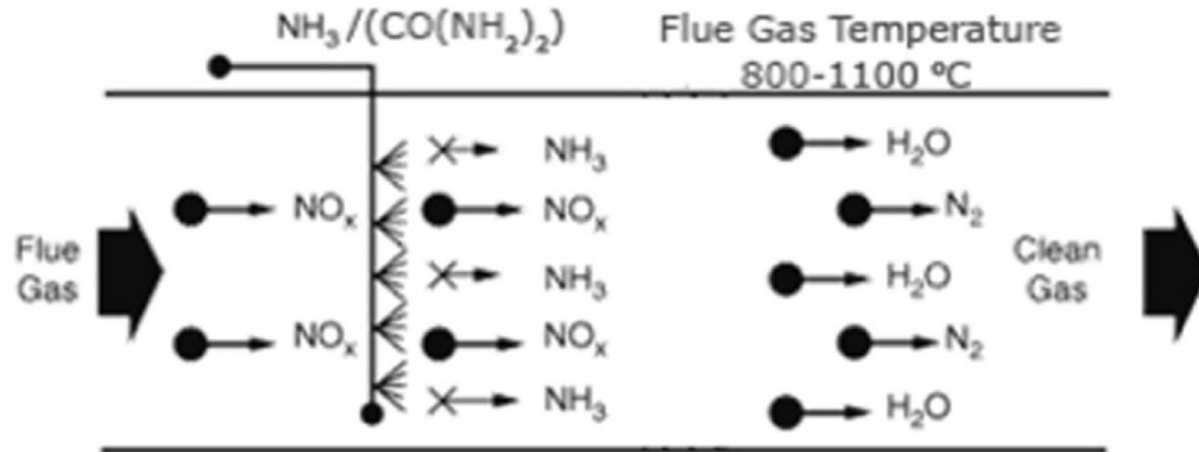
- diversas geometrias e configurações
- limitado a instalações com disponibilidade de água
- eficiência depende muito da perda de carga e consumo de água
- podem coletar partículas na faixa de 0,1 a 20  $\mu\text{m}$
- eficiência pode da ordem de 80 a 95%

## Coleta de material particulado sólido – Lavador de gás



Lavador de gases típico em  
caldeiras de bagaço

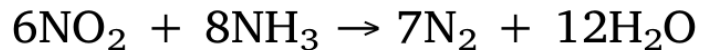
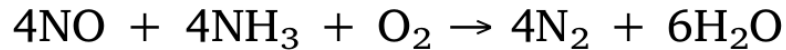
## Redução da emissão de NO<sub>x</sub> – Redução seletiva não catalítica



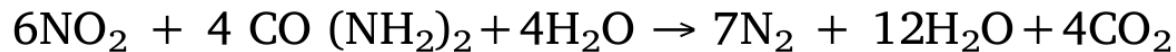
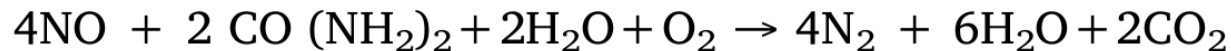
- adição de reagentes em faixa restrita de temperatura
- reagentes: amônia ou uréia
- necessita maior controle de processo
- eficiência limitada, pode reduzir as emissões em 30 a 70%

## Redução da emissão de NOx – Redução seletiva não catalítica

com amônia:



com uréia:



- Emissões atmosféricas da biomassa são comparativamente menores que as emissões de combustíveis fósseis
- Minimização de emissões é possível com o desenvolvimento de tecnologias de combustão mais apropriadas e com equipamentos de controle adequados à biomassa
- Maiores desafios são os controles de emissões de Material Particulado e Óxidos de Nitrogênio