



# PHA3556 - Tecnologias de Tratamento de Resíduos Sólidos

**Aulas 8:** Incineração e Recuperação de Energia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Definição:**

- São processos de tratamento, que através da elevação da temperatura dos resíduos promovem a sua esterilização ou oxidação, que poderá ser completa ou parcial, com ou sem presença de oxigênio.

- **Tipos de Tratamentos Térmicos:**

- Incineração;
- Co-processamento;
- Pirólise;
- Gaseificação;
- Plasma;
- Autoclavagem;
- Micro-ondas, etc.

# Incineração

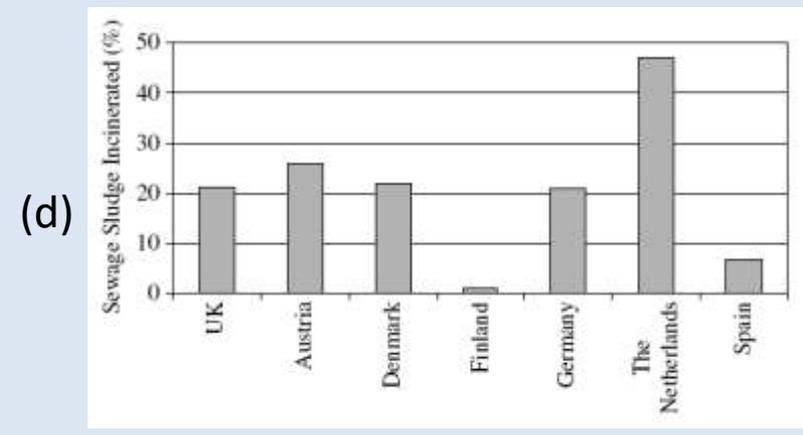
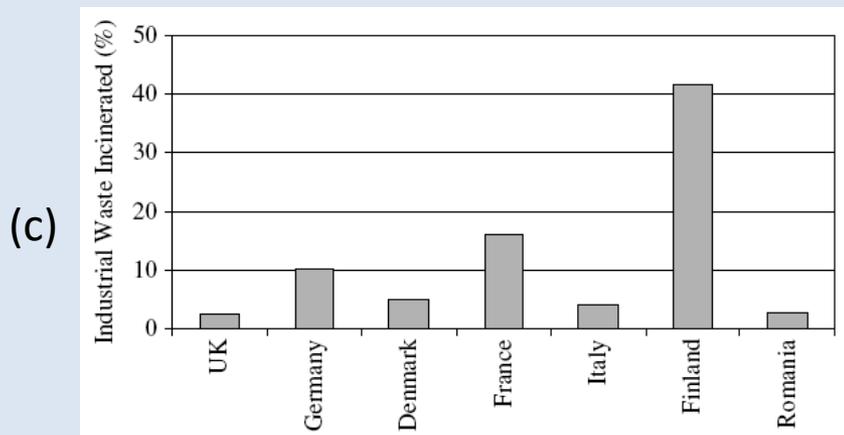
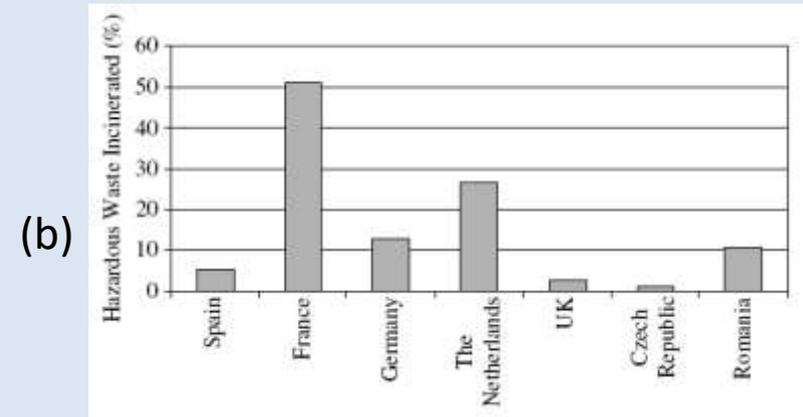
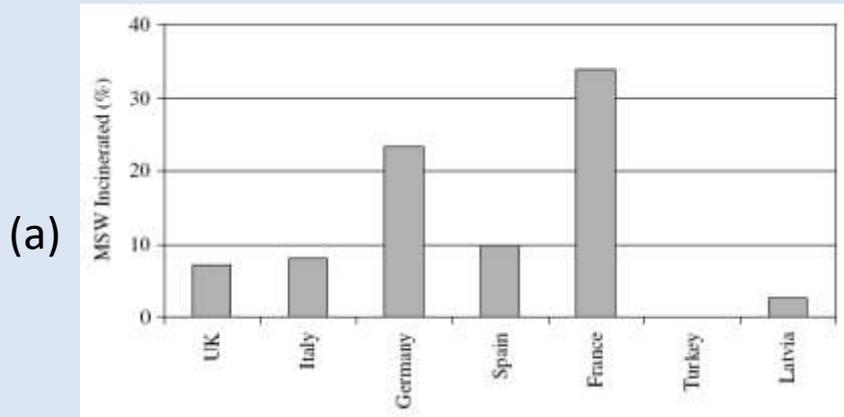
- **Definição:**

- A incineração é a oxidação dos materiais combustíveis presentes nos resíduos, em condições controladas, com objetivo de seu tratamento, produzindo calor, vapor d'água, nitrogênio, dióxido de carbono e oxigênio. Dependendo da composição dos resíduos, outras emissões podem ser formadas, incluindo, monóxido de carbono, cloreto de hidrogênio, fluoreto de hidrogênio, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, carbono orgânico volátil, dioxinas e furanos, bifenilas policloradas, metais pesados, etc..
- Atualmente a incineração é a segunda maior forma de destinação/tratamento de resíduos em muitos países em todo o mundo.
- Além do tratamento dos resíduos, os incineradores modernos tem como função secundária, a recuperação e geração de energia, como uma necessidade econômica (auxilia sua viabilização).

# Incineração

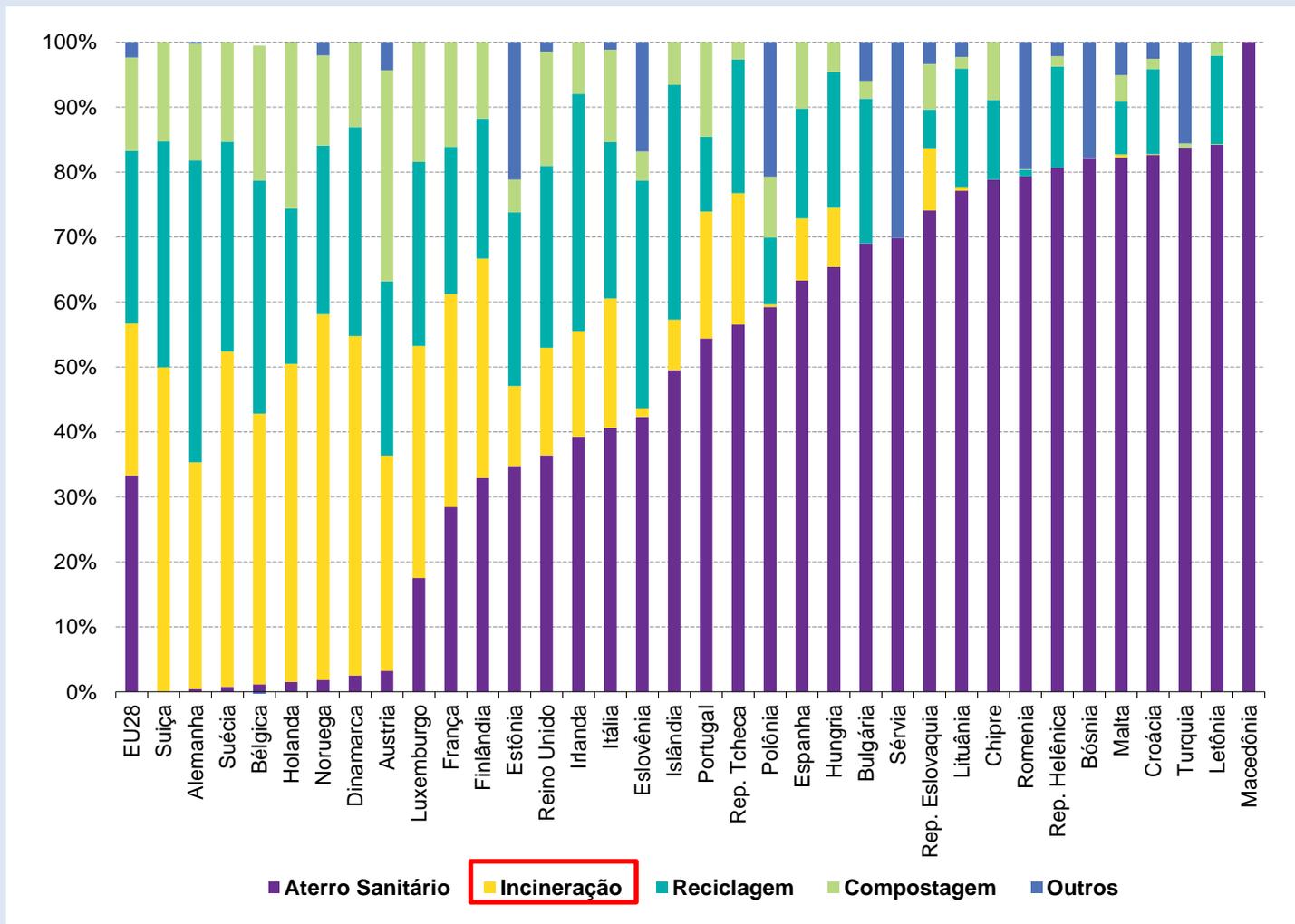
- **Aplicação:**

- Incineração de resíduos sólidos **municipais (a)**, **perigosos (b)**, **industriais (c)** e **lodos de ETE (d)** em alguns países europeus.



# Incineração

- Destinação de Resíduos Sólidos na União Europeia:



# Incineração

- **Vantagens:**

- É uma forma de tratamento e pode ser realizada nas proximidades dos pontos de coleta de resíduos (área urbana), ao contrário de aterros sanitários, que se localizam em áreas cada vez mais distantes.
- Os resíduos são reduzidos a cinzas que são biologicamente estéreis e com cerca de 10% do volume, ou 33% do peso inicial.
- A incineração de resíduos pode ser uma fonte de baixo custo para produzir vapor para geração de energia elétrica, para aquecimento em processos industriais ou ainda de água quente para sistemas de aquecimento, e assim preservar outros combustíveis mais nobres.

# Incineração

- **Vantagens:**

- Incineradores ocupam uma área relativamente pequena.
- A incineração não produz metano, ao contrário dos aterros sanitários.
- Das cinzas do fundo do incinerador podem ser recuperados alguns materiais (metais) e elas podem até serem utilizadas como agregados secundários em construções .
- A incineração é a melhor opção, inclusive do ponto de vista ambiental, para tratamento de muitos **resíduos perigosos** tais como, resíduos altamente inflamáveis, voláteis, tóxicos e infectocontagiosos.

# Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Desvantagens:**

- Alto investimento inicial e retorno demorado do investimento.
- Os incineradores são concebidos com base em um certo poder calorífico dos resíduos, que na prática pode variar muito.
- A remoção de materiais, tais como papel e plástico para reciclagem pode reduzir o poder calórico total dos resíduos e, conseqüentemente, pode afetar o desempenho do incinerador.
- Embora os incineradores modernos atendam às legislações de emissões, ainda existe preocupação por parte do público de que os níveis emitidos ainda podem ter algum efeito adverso sobre a saúde.
- O processo de incineração ainda produz um resíduo sólido, que exige tratamento ou disposição final.

# Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

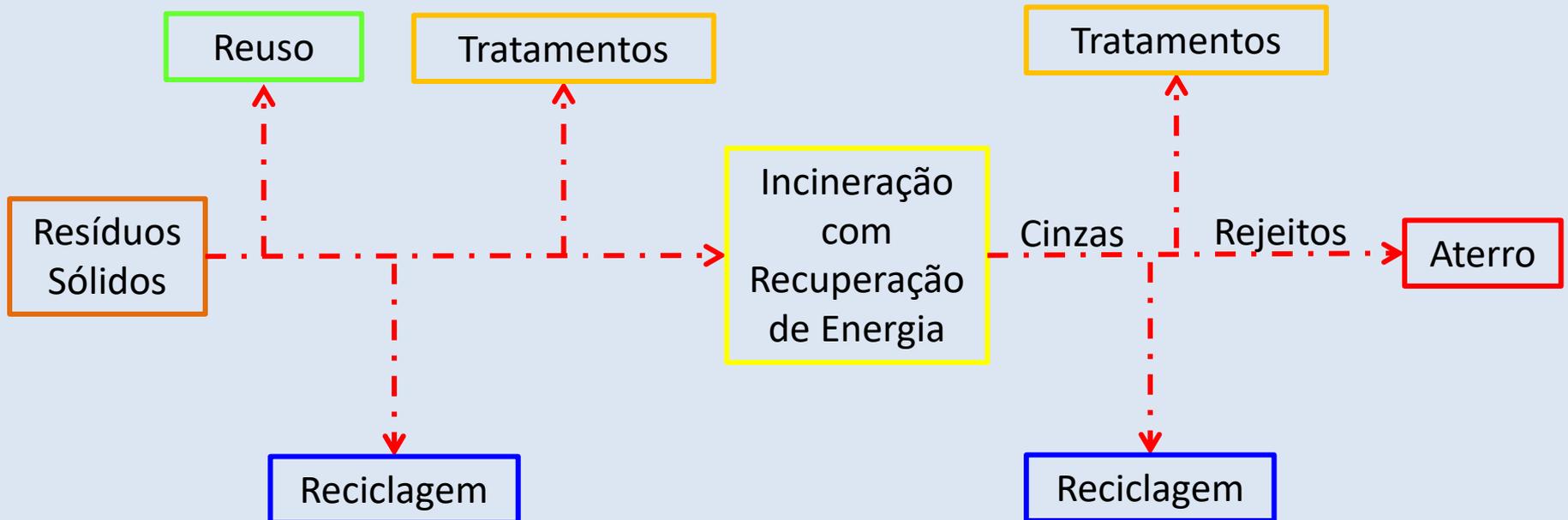
- **Viabilidade:**

- Tende a ser viável para cidades de médio a grande porte.
- Pode ser até viável no caso de uso consorciado em cidades de pequeno a médio porte, dependendo dos volumes gerados e das distâncias de transporte.
- Quando não existem áreas nas proximidades que comportem a instalação de outras formas de tratamento de resíduos.
- Quando já existe na localidade quantidades de resíduos tóxicos, inflamáveis ou infecciosos que necessariamente deveriam ser incinerados.
- Se houver aproveitamento ou recuperação energética do calor liberado no processo, quer seja para produção de energia elétrica, ou vapor e água quente para usos industriais.

# Incineração

- **Resíduos que Podem ser Incinerados:**

- Embora muitos resíduos possam ser incinerados, **deve-se seguir a ordem de prioridades estabelecida pela PNRS:**



# Legislação

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS) Lei nº 12.305, de 2010, regulamentada pelo Decreto nº 7.404 de 2010;
- POLÍTICA ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PERS) Lei Estadual nº 12.300, de 2006, regulamentada pelo Decreto nº 54.645 de 2009.
- RESOLUÇÃO CONAMA Nº 316, de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.
- RESOLUÇÃO CONAMA Nº 386, de 2006. Altera o art. 18 da Resolução CONAMA Nº 316, de 2002.
- Verificar planos de resíduos e legislações municipais específicos de cada localidade.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**

- O incinerador moderno é um eficiente sistema de combustão com um sofisticado sistema de limpeza de gases, que produz energia e reduz os resíduos sólidos a um resíduo inerte com um mínimo de poluição.
- As instalações de incineração podem ser classificadas de acordo com vários critérios, como por exemplo, a sua capacidade, a natureza dos resíduos a serem incinerados, o tipo de sistema, etc., no entanto, de forma simplificada, pode ser feita uma classificação abrangente entre:
  - 1) **incineradores de massa e**
  - 2) **outros tipos.**

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**

- Incineradores de Massa:
- Incineração de resíduos sólidos urbanos em grande escala em uma única câmara de combustão completa ou oxidação. Processamentos típicos de resíduos da ordem de 10 a 50 toneladas por hora.
- Outros tipos de Incineradores:
- Os outros tipos de incineração envolvem menor escala, com capacidades de processamento entre 1 e 2 toneladas por hora de resíduos, tais como os resíduos hospitalares, lodo de esgoto e resíduos perigosos. Exemplos típicos de tais sistemas incluem incineradores de leito fluidizado, ciclônicos, fornos pirolíticos, rotativos, fornos de balanço, fornos de cimento e incineradores de resíduos líquidos e gasosos.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- É o tipo de incineração utilizada para incineração de resíduos sólidos municipais em muitos países no mundo.
- O número de incineradores e a capacidade deles muda bastante de um país para outro.
- A viabilidade econômica deste tipo de incineração depende da recuperação energética.
- A composição e as características dos resíduos influenciam na combustão realizada e também nas emissões produzidas pelo sistema.
- Um poder calorífico típico para os resíduos sólidos municipais é aproximadamente 9.000 kJ/kg (em países desenvolvidos).

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Número de incineradores de resíduos sólidos municipais e a capacidade média das instalações de alguns países europeus:

Country	Number of incinerators	Average plant capacity (1000 tonnes/year)
Austria	3	178
Belgium	17	141
Denmark	32	114
France	210	132
Germany	59	257
Italy	32	91
Norway	11	60
Portugal	3	390
Spain	9	166
Sweden	30	136
The Netherlands	11	488
UK	17	246

*Source: European Commission 2004.*

Fonte: Williams (2005)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Propriedades típicas dos resíduos sólidos municipais (EUA-UE):

<b>Composition</b>	<b>Wt%</b>	<b>Elemental analysis</b>	<b>Wt%</b>
Paper/board	33.0	Carbon	21.5
Plastics	7.0	Hydrogen	3.0
Glass	10.0	Oxygen	16.9
Metals	8.0	Nitrogen	0.5
Food/garden	20.0	Sulphur	0.2
Textiles	4.0	Chlorine	0.4
Other	18.0		
		<b>Metals</b>	<b>mg/kg</b>
<b>Proximate analysis</b>	<b>Wt%</b>	Copper	200–700
Combustibles	42.1	Chromium	40–200
Moisture	31.0	Mercury	1–50
Ash	26.9	Cobalt	3–10
		Arsenic	2–5
<b>Calorific value</b>	<b>kJ/kg</b>	Cadmium	1–150
CV	9000	Lead	100–2000
		Zinc	400–1400
<b>Trace organics</b>	<b>µg/kg</b>	Vanadium	4–11
PCB	200–400	Nickel	30–50
PCDD/PCDF	0.050–0.150	Manganese	250
		Thallium	<0.1

Cuidado!

Sources: Waste Management Paper 28, 1992; Buekens and Patrick 1985; European Commission 2004.

Fonte: Williams (2005)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- São muito importantes as propriedades combustíveis do resíduo, ou seja, as proporções entre **material combustível**, **umidade** e **materiais inertes** e também a análise elementar, que pode ser utilizado para avaliar como a queima dos resíduos no incinerador pode afetar as emissões gasosas.
- O teor de humidade é muito importante uma vez que, obviamente, a ignição não ocorrerá se o material estiver molhado e além disso, a humidade diminui também o poder calorífico do combustível.
- Os materiais orgânicos são a fração combustível dos resíduos.
- O teor de inertes é importante uma vez que uma alta percentagem de inertes irá diminuir o poder calorífico dos resíduos e formarão as cinzas que terão de ser removidas e descartadas depois da combustão.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

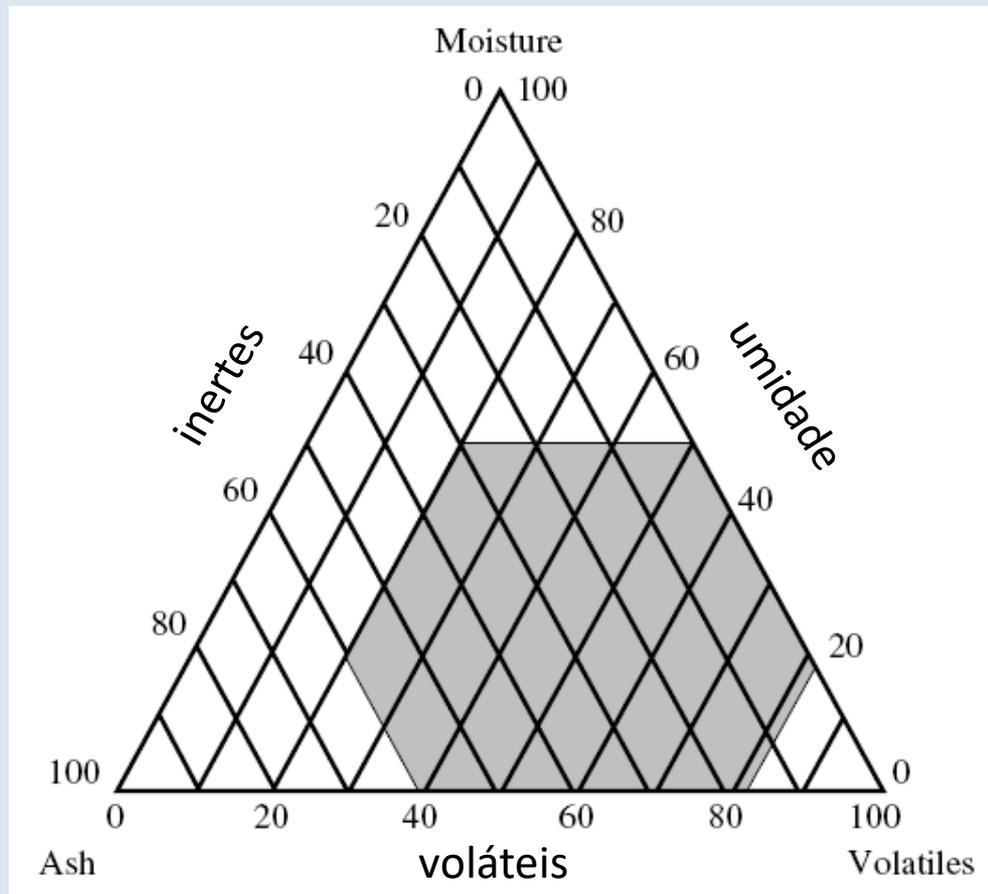
- **Incineração de Massa:**

- As cinzas são altamente heterogêneas e contém materiais inertes não queimados, tais como vidro e latas metálicas.
- Os resíduos sólidos municipais, contém metais pesados, tais como o cádmio, o chumbo, zinco e cromo que irão influenciar as emissões gasosas de tais metais. O teor de enxofre e cloro irá produzir emissões de dióxido de enxofre e cloreto de hidrogênio.
- A composição dos resíduos podem ser representada num diagrama ternário, que apresenta as composições aceitáveis de cada fração (inerte, umidade, voláteis).
- A área sombreada representa a composição típica de resíduos sólidos urbanos, **que pode sustentar a combustão sem a necessidade de combustível auxiliar.** A área abrange o poder calorífico mínimo aceitável e o teor máximo permitido de umidade.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**
  - Diagrama: inertes/umidade/voláteis.



Fonte: Williams (2005)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- A coleta seletiva ou a triagem de resíduos antes da chegada ao incinerador também podem alterar a composição do resíduo a ser incinerado e propriedades tais como o teor de metal e do poder calorífico.
- A remoção de metais e vidro para reciclagem seria uma forma de aumentar o poder calorífico dos resíduos e reduzir a emissão de metais, tanto para os gases de combustão quanto para as cinzas inferiores.
- Recuperação de papel, papelão e plástico tende a diminuir o poder calórico do resíduo na entrada.
- Reciclagem de resíduos orgânicos e de jardinagem, por exemplo, para a compostagem, tende a reduzir o teor de umidade dos resíduos sólidos urbanos, aumentando assim o poder calorífico líquido.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Uma planta típica moderna para incineração de resíduos municipais com recuperação de energia pode ser dividida em cinco áreas principais:

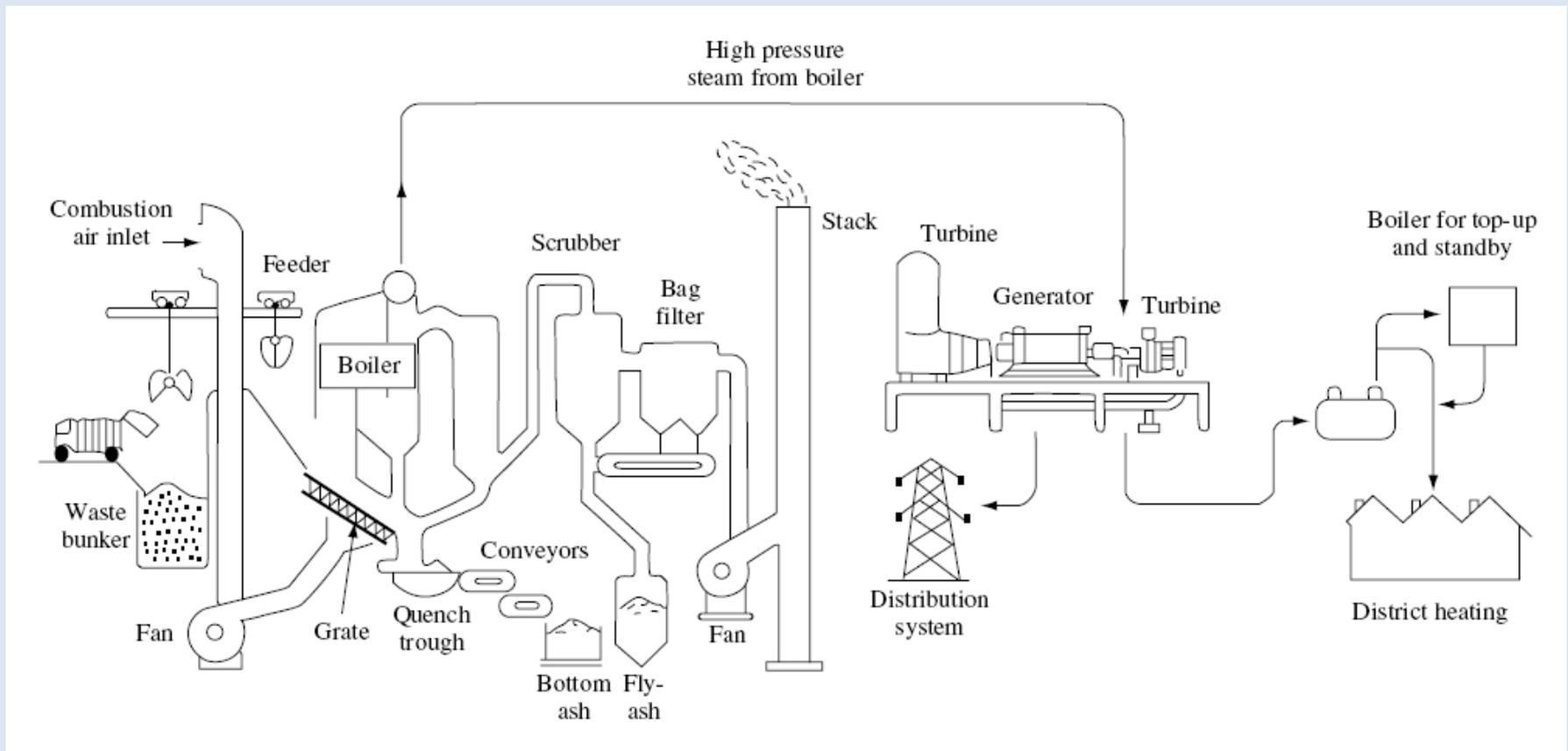
- 1) Área de recebimento de resíduos, depósito e sistema de alimentação do incinerador;
- 2) Fornalha ou forno;
- 3) Sistema de recuperação de calor;
- 4) Sistema de controle de emissões;
- 5) Sistema de geração de energia através do aquecimento e geração de eletricidade.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

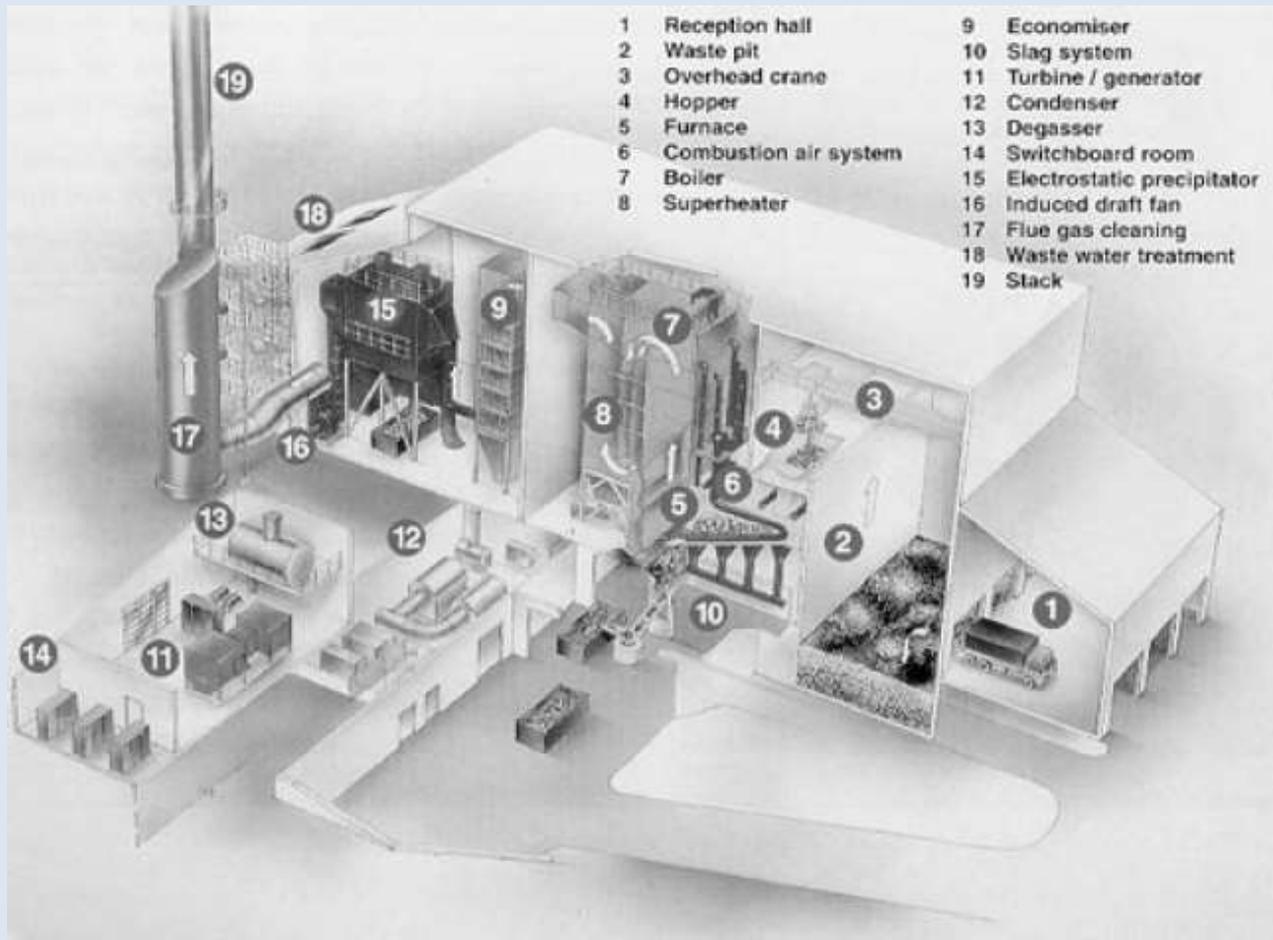
- Diagrama esquemático de um incinerador moderno com recuperação de energia e controle de emissões.



# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

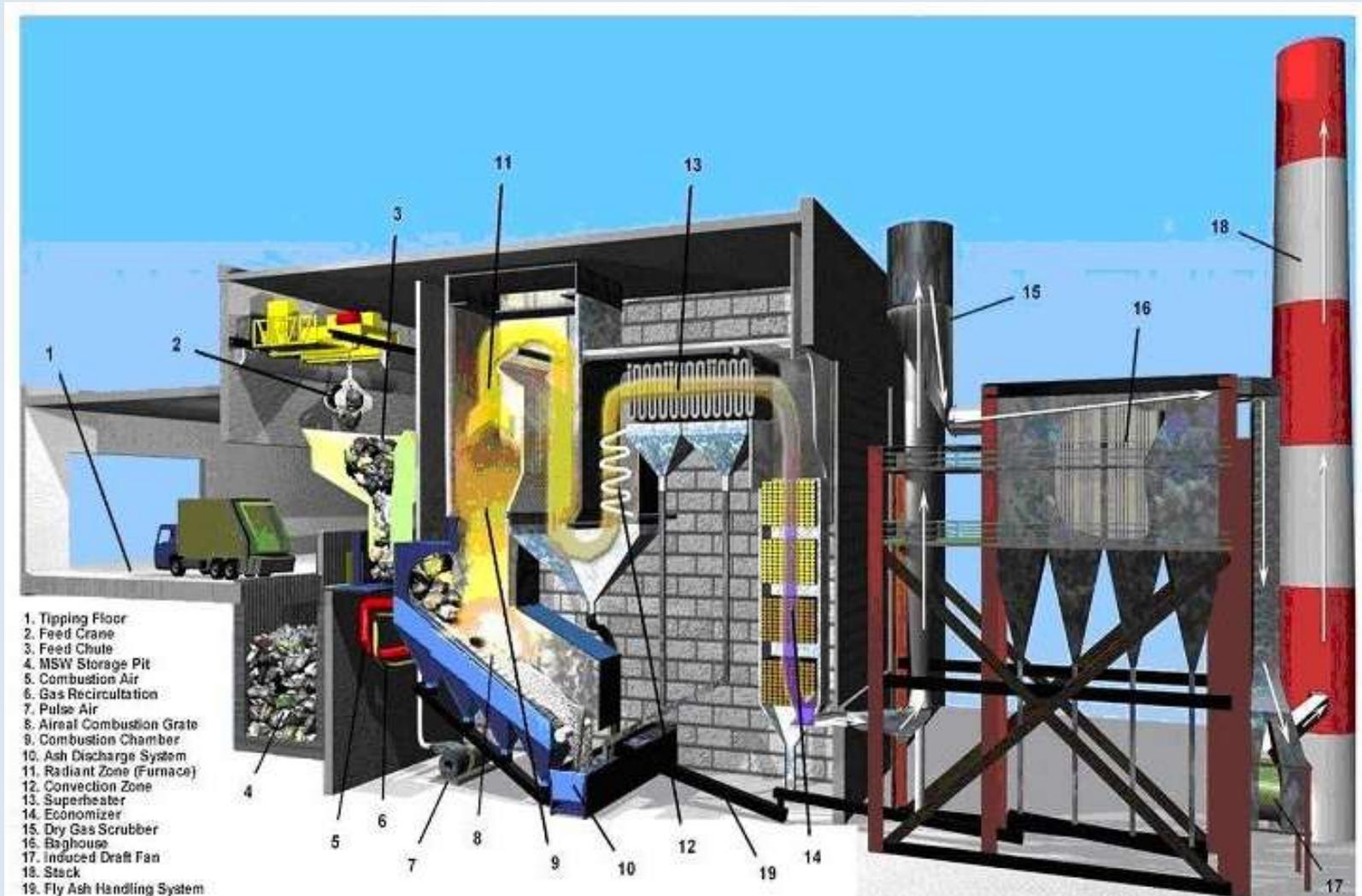
- **Incineração de Massa:**
  - Perspectiva de um incinerador moderno.



# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Incineração de Massa:



*This facility design utilizes the patented Barlow Aireal™ Combustion System and a Water-Wall Boiler*

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recebimento de resíduos, depósito e sistema de alimentação:
- O resíduo normalmente chega através de veículos de coleta, embora em alguns incineradores europeus, podem ser utilizadas barcaças ou trens.
- Os veículos de coleta são pesados na chegada e saída para se determinar os pesos exatos dos resíduos e as tarifas a serem cobradas para o descarte e controle operacional do incinerador.
- O incinerador pode lidar com uma variedade de resíduos provenientes de residências, comércios e industriais, e estes devem ser monitorados não só para se diferenciar as tarifas cobradas, mas também porque eles podem ter propriedades muito diferentes de combustão, que podem influenciar o desempenho do incinerador.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recebimento de resíduos, depósito e sistema de alimentação:
- Os resíduos recebidos podem liberar maus odores devido à biodegradação e manipulação, assim as plantas devem ser normalmente mantidas sob uma ligeira pressão negativa, e o ar de combustão é obtido a partir da área de armazenagem dos resíduos, o que impede a fuga de odores.
- O depósito deve ser suficientemente grande para permitir o armazenamento dos resíduos para assegurar um equilíbrio entre as variações na chegada e a operação contínua da instalação.
- O depósito deve ser projetado para armazenar uma quantidade de cerca de 2 a 3 dias de resíduos que seria tipicamente 1000 a 3000 toneladas de resíduos.
- Longos períodos de armazenamento são indesejáveis devido à decomposição dos resíduos e consequente geração de maus odores.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recebimento de resíduos, depósito e sistema de alimentação:
- O depósito de resíduos pode ser dividido em diferentes compartimentos de descarga para os veículos.
- Essa separação permite a mistura dos resíduos de diferentes propriedades de combustão e poderes caloríficos por parte do operador do guindaste para alimentação do forno.
- Um guindaste de até 6 m<sup>3</sup> pode se deslocar e o operador, além misturar os resíduos para melhorar a incineração, pode também extrair quaisquer objetos volumosos ou perigosos para tratamento em separado.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

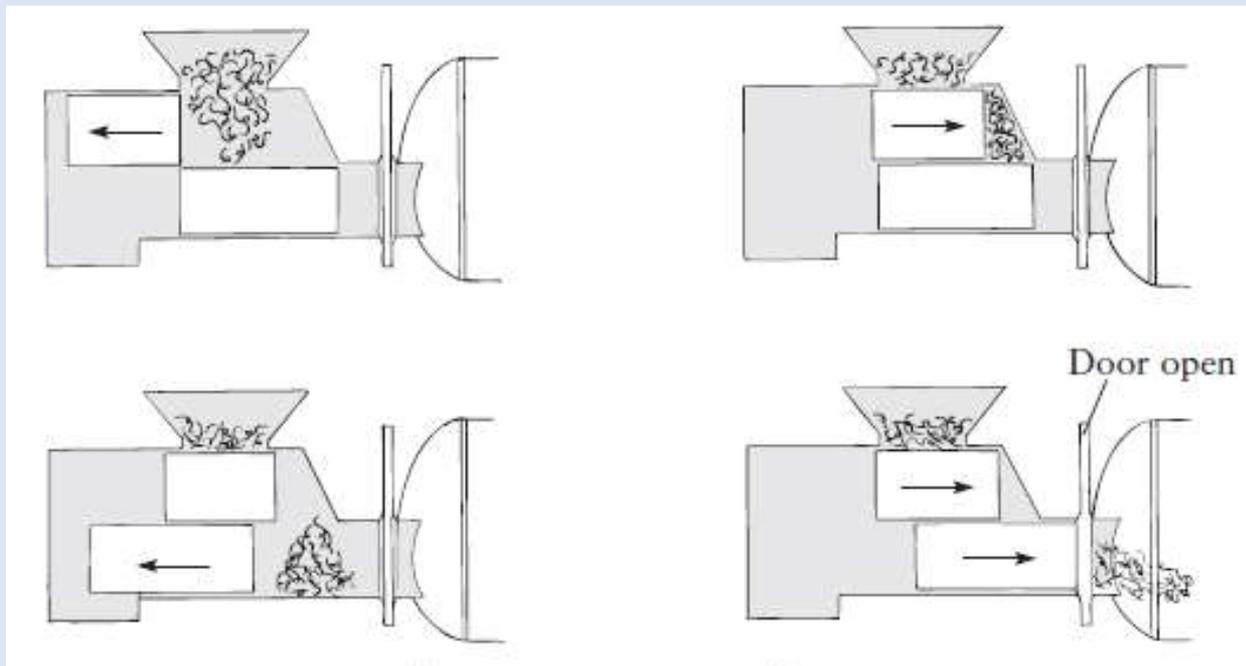
- Recebimento de resíduos, depósito e sistema de alimentação:
- O sistema de alimentação do forno é constituído por uma tremonha (funil) de aço de onde o lixo flui para o incinerador sob ação de seu peso próprio. Deste ponto é alimentado para dentro do sistema de grelha por um êmbolo hidráulico ou outro sistema de transmissão sem bloqueio.
- Os funis são mantidos parcialmente cheios com resíduos para minimizar as fugas de ar para dentro do forno e para garantir que não ocorra interrupção da alimentação da grelha. Sistemas de monitoramento são usados para medir o nível de resíduos no funil.
- Para evitar que o fogo da fornalha volte para dentro do funil de alimentação, cortinas hidráulicas são usados para selar o funil na entrada do forno. A calha de alimentação também pode ser refrigerada com água ou ser forrada com material refratário para se evitar incêndios.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recebimento de resíduos, depósito e sistema de alimentação:



Fonte: Worrel and Vesilind (2012)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:

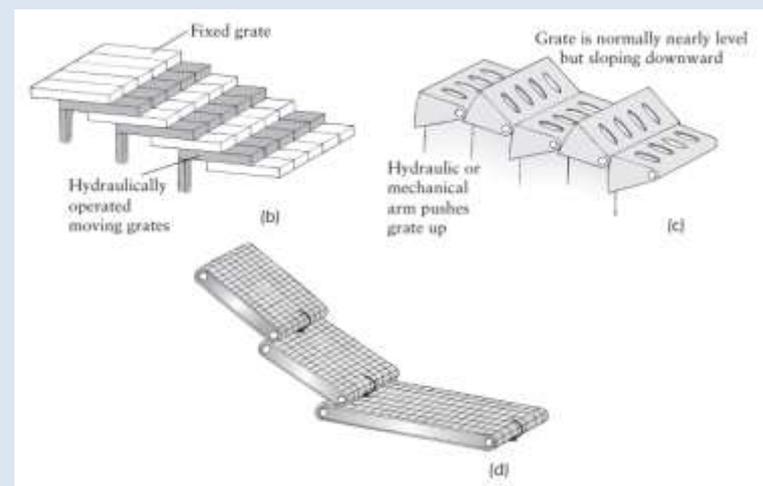
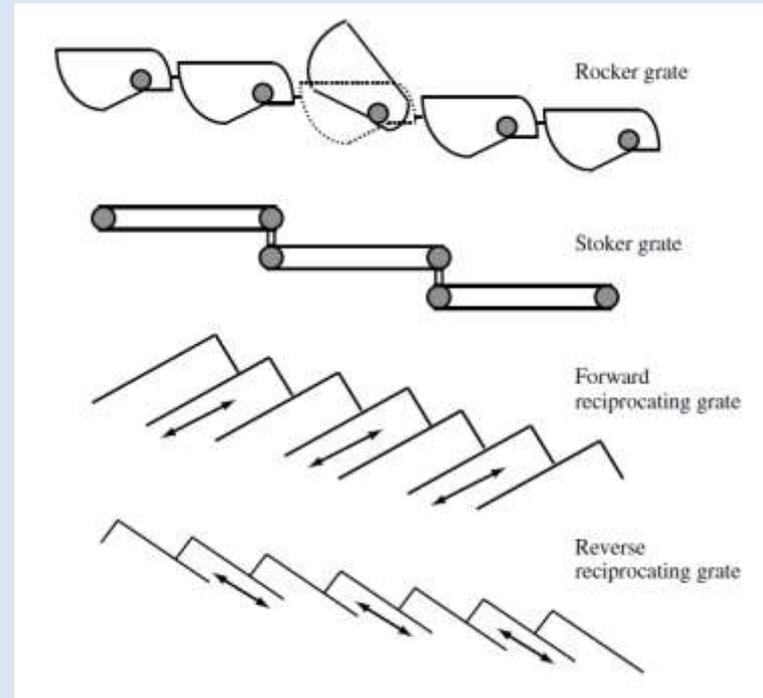
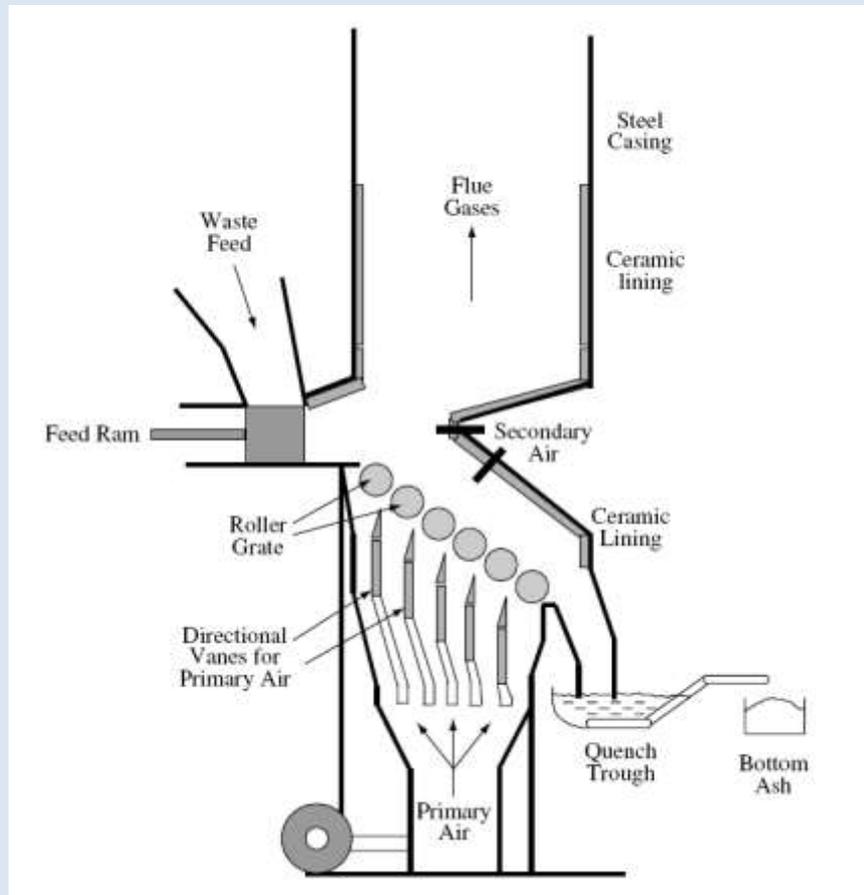
- Cada incinerador pode ter vários fornos alimentados pelo operador a partir do depósito de resíduos. Um típico incinerador de 50 t/h pode ter cinco fornos de 10 t/h separados.
- O uso de vários fornos permite a parada de um forno por um tempo para a reparação e manutenção regular.
- Queimadores auxiliares são utilizados para elevar a temperatura dos gases de combustão dos resíduos no início da operação.
- No forno os resíduos passam por três fases de incineração:
  - 1) Secagem e eliminação de voláteis;
  - 2) Combustão de compostos voláteis e de fuligem;
  - 3) Combustão do resíduo sólido carbonáceo.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:



Fonte: Williams (2005)

Fonte: Worrel and Vesilind (2012)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:

- Quando os resíduos entram no forno quente, são aquecidos através do contato com os gases quentes da combustão, ar pré-aquecido, ou calor irradiado das paredes da incineração, e, inicialmente, a umidade é expulsa no intervalo de temperatura de 50 a 100 ° C.
- O teor de água dos resíduos é muito importante uma vez que uma boa parte do poder calorífico do resíduo é perdido para se evaporar a água, sobrando portanto menos energia disponível.
- A taxa de aquecimento dos resíduos e, portanto, a taxa de decomposição térmica, também é afetada pelo teor de água dos resíduos. Os teores de água dos resíduos sólidos urbanos, podem variar entre 25 e 50%.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:

- A combustão de voláteis e geração de chamas ocorre imediatamente acima da superfície do resíduo sobre a grelha.
- A combustão completa dos gases e vapores requer temperatura suficientemente elevada, tempo de residência adequado e **ar turbulento em excesso** para garantir uma boa mistura.
- A normatização europeia estabelece que os gases resultantes da incineração dos resíduos devem ser elevados a uma temperatura de 850 °C durante 2 s para assegurar completa oxidação dos hidrocarbonetos voláteis.
- Os gases e vapores voláteis libertados, queimam imediatamente no forno já que a temperatura dos gases no forno chega tipicamente entre 750 e 1000 °C, podendo ocorrer a temperaturas acima de 1600 °C.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:

- O carbono volátil contido nos resíduos orgânicos pode necessitar entre **30 e 60 min** para o completo esgotamento.
- Após a queima, o resíduo que sobra no final é composto por um material contendo um pequeno residual de carvão e inertes. Este carvão residual é definido como o carbono fixo.
- As cinzas, vidros e metais que restaram são descarregados continuamente, no final da última seção de grelha em uma calha contendo água e ar refrigerado.
- O equipamento em contato com este material está sujeito a um forte desgaste, devido à natureza abrasiva e à humidade do material.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:

- O resíduo de cinzas deve estar completamente queimado e biologicamente estéril. A diretiva europeia define um teor de TOC (carbono) para cinza, de menos de 3%, para garantir o completo esgotamento dos resíduos.
- As cinzas de fundo em geral representam apenas cerca de 30% da massa inicial de resíduos.
- O coração do incinerador é a **grelha**, e existem diferentes tipos de grelhas para a incineração dos resíduos municipais.
- As grelhas possuem velocidade variável para permitir ajustes no tempo de residência dos resíduos na câmara de combustão, dependendo das variações na composição dos resíduos.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:

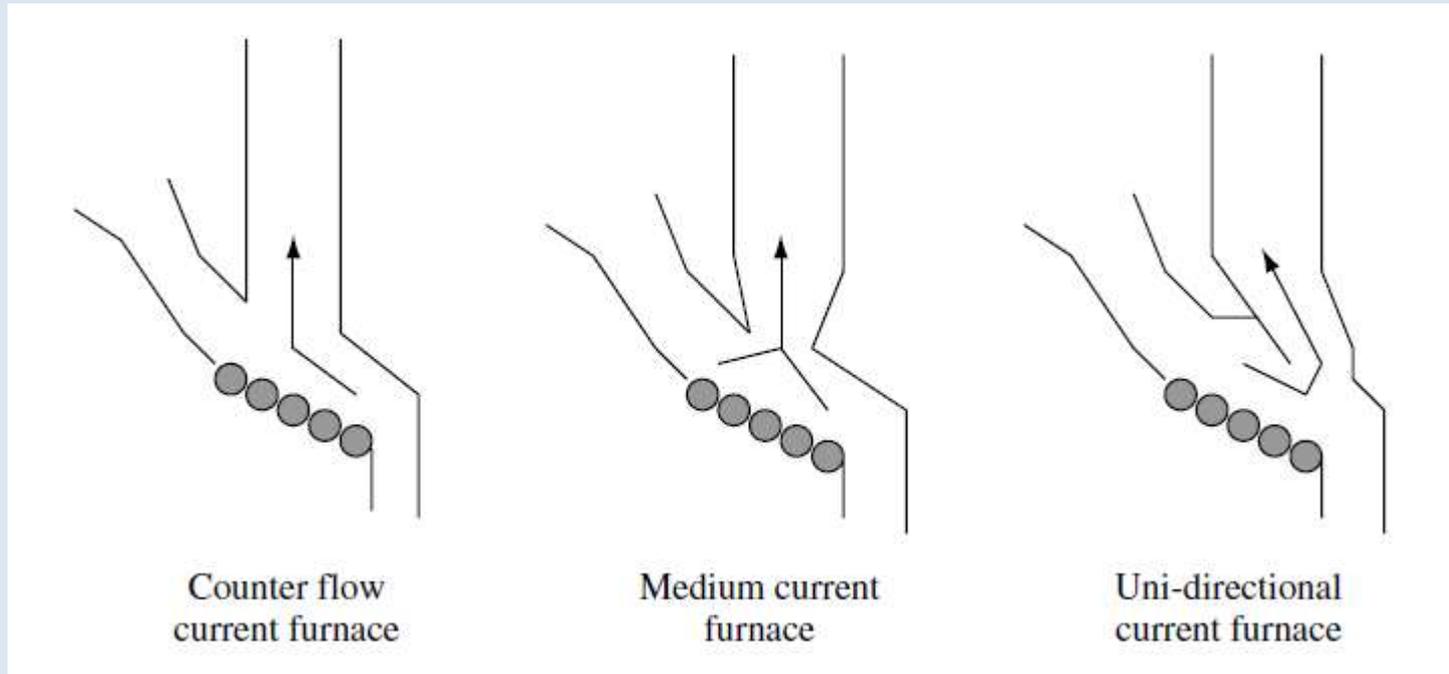
- O tamanho e forma da câmara de combustão são importantes na determinação da eficiência de combustão e podem ser de vários tipos.
- O tamanho determina o tempo médio de residência dos compostos voláteis e o seu esgotamento.
- A forma determina o padrão de aquecimento dos resíduos através da entrada de gases quentes provenientes da combustão e irradiação do calor proveniente das paredes do forno, o que afeta o tempo de secagem, o tempo de ignição e tempo de queima (esgotamento).
- A forma também influencia os padrões de fluxo de ar e gases (unidirecional, contrafluxo, etc.) no interior da câmara de recirculação, favorecendo a mistura, o que por sua vez influencia a combustão.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:



Fonte: Williams (2005)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Forno ou Fornalha:

- As cinzas volantes (fuligem) são transportadas através do sistema como material particulado que também adsorverem metais e material orgânico à medida que se resfriam por meio do sistema de recuperação de calor do incinerador e também do sistema de limpeza de gases.
- As cinzas volantes são coletadas nos ciclones, precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas do sistema de limpeza de gás.
- Como estas cinzas volantes contém metais pesados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e dioxinas e furanos elas não são recicláveis, e são consideradas **resíduo perigoso** e, portanto, são depositados em aterros industriais.
- A fuligem residual compreende apenas uma pequena percentagem da entrada de massa de resíduos.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recuperação do Calor:

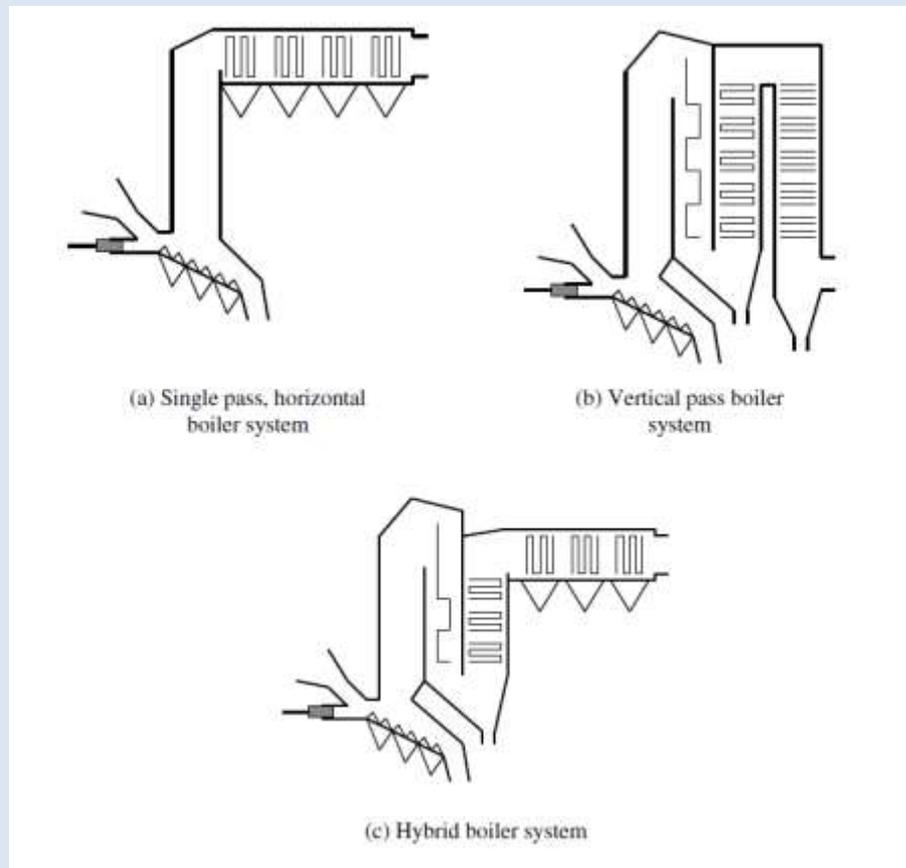
- O potencial para a recuperação de calor se deve ao fato de que os gases de combustão, **devem ser resfriados** antes de serem encaminhados ao sistema de tratamento dos gases de combustão.
- A temperatura dos gases que saem da zona de combustão, estão tipicamente entre 750 e 1000 °C, o que é demasiado elevado para entrada direta uma vez que temperaturas abaixo de 250 a 300 ° C, são necessários para a limpeza do gás de em equipamentos, tais como precipitadores eletrostáticos, purificadores e filtros manga.
- O resfriamento é realizado pela caldeira em incineradores modernos de resíduos urbanos.
- O calor dos gases de combustão é transferido para a água nos tubos da caldeira para produzir vapor. A caldeira é constituído por bancos de tubos de aço por onde passa água corrente.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recuperação do Calor:



# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recuperação do Calor:

- Num incinerador os resíduos são queimados a uma velocidade mais ou menos constante, geralmente perto da capacidade de projeto, e portanto a geração de energia não pode ser variar para satisfazer as flutuações de consumo. Desta forma, sistemas desta natureza, devem estar interligados ao sistema elétrico para seu maior aproveitamento.
- Um fator importante para o funcionamento eficiente da caldeira é o entupimento externo dos tubos com os depósitos de materiais provenientes dos gases de combustão que contenham cinzas volantes, fuligem, compostos de metais volatilizados, etc.
- Os depósitos ocorrem sobre os tubos da caldeira reduzindo a transferência de calor dos gases de combustão quentes para a água nos tubos de aço e, conseqüentemente, reduzindo a geração de vapor e de recuperação de energia.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recuperação do Calor:

- A taxa com que as incrustações ocorrem sobre os tubos depende da carga de pó dos gases de combustão, da viscosidade do cinzas volantes, o que, por sua vez depende da temperatura, da velocidade do gás de combustão e da geometria do banco de tubos.
- Os tubos da caldeira devem ser dispostos **paralelamente ao fluxo de gás** para minimizar incrustações e corrosão.
- A aderência de cinzas volantes aos tubos de caldeira é determinada principalmente pela presença de sais fundidos, tais como cálcio, magnésio e sódio, sulfatos, óxidos, bissulfatos, cloretos, pirossulfatos, etc., no cinzas volantes, e da presença de  $\text{SO}_3$  e  $\text{HCl}$ .

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Recuperação do Calor:

- A corrosão é outra consideração primordial na concepção e operação de caldeiras de incineradores.
- A formação de HCl pela combustão de resíduos contendo cloro, tais como papel e papelão e plástico (PVC), podem provocar a corrosão de tubos por ácido a temperaturas mais baixas.
- Corrosões a alta temperatura envolvem uma série de interações químicas entre os tubos de metal, as incrustações e os gases de combustão.
- A erosão dos tubos de caldeira também deve ser considerada. Os gases de combustão provenientes da incineração de resíduos são de alta concentração de partículas ou em pó e estas partículas podem ser muito duras, causando a erosão dos tubos por abrasão.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Controle de Emissões:

- O material particulado é o primeiro a ser removido por um precipitador eletrostático, e pré-coletor, em seguida, os gases ácidos são removidos por meio um lavador de cal que pode ser do tipo cal seca, ou cal húmida.
- Em seguida é feita a aplicação de um aditivo tal como carvão ativado e cal, para adsorver o mercúrio e dioxinas e furanos.
- Na sequencia um filtro de tecido é utilizado para remover o material particulado e carvão ativado com os poluentes adsorvidos.
- Finalmente, os óxidos de nitrogênio são removidos pela adição de amônia para formar nitrogênio inerte.
- Os principais equipamentos de controle de emissões utilizados na incineração de resíduos são: 1) ciclones; 2) precipitadores eletrostáticos; 3) filtros de tecido (filtro manga); 4) lavadores úmidos; 5) lavadores secos; 6) lavadores de semi-secos, e 7) sistemas de-NOx.

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Controle de Emissões:

- Faixas de concentrações típicas de emissões antes do sistema de tratamento de gases.

Emission	Units	Range
Total dust	mg/m <sup>3</sup>	1000–5000
TOC	mg/m <sup>3</sup>	1–10
Hydrogen chloride	mg/m <sup>3</sup>	500–2000
Hydrogen fluoride	mg/m <sup>3</sup>	5–20
Carbon monoxide	mg/m <sup>3</sup>	5–50
Sulphur oxides	mg/m <sup>3</sup>	200–1000
Nitrogen oxides	mg/m <sup>3</sup>	250–500
Cadmium + thallium	mg/m <sup>3</sup>	<3
Mercury	mg/m <sup>3</sup>	0.05–0.50
Other heavy metals Pb, Sb, As, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	mg/m <sup>3</sup>	<50
Dioxins and furans (PCDD/PCDF)	ngTEQ/m <sup>3</sup>	0.5–10

Source: European Commission 2004.

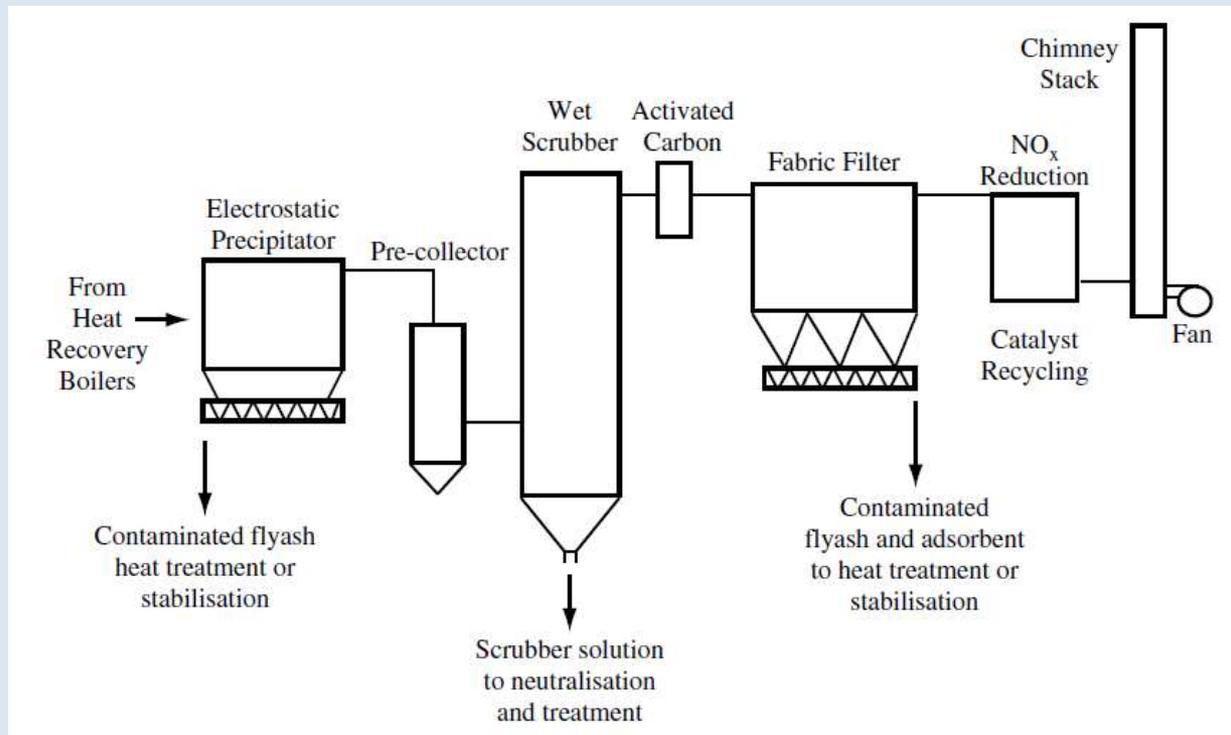
# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**

- Controle de Emissões:

- Esquema hipotético de um sistema avançado de tratamento de gases.

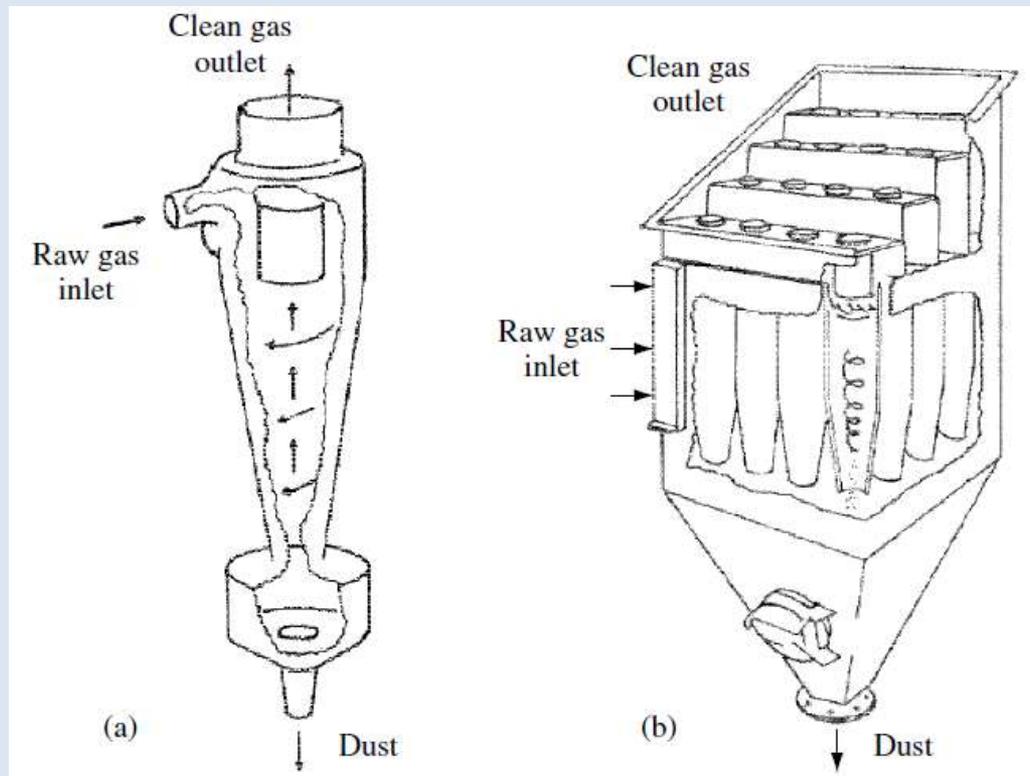


Fonte: Williams (2005)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Incineração de Massa:
  - Controle de Emissões:
  - Ciclones.

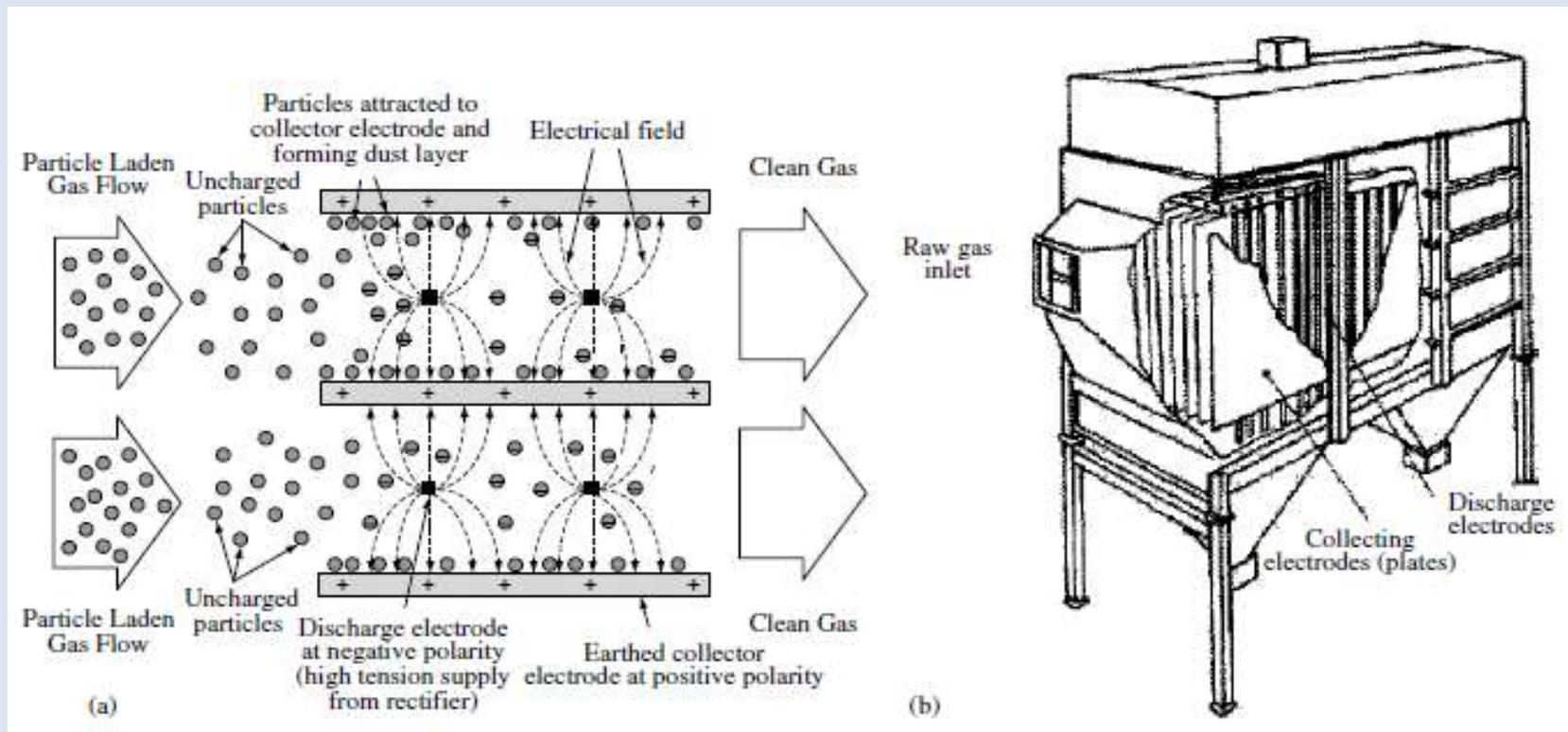


Fonte: Williams (2005)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

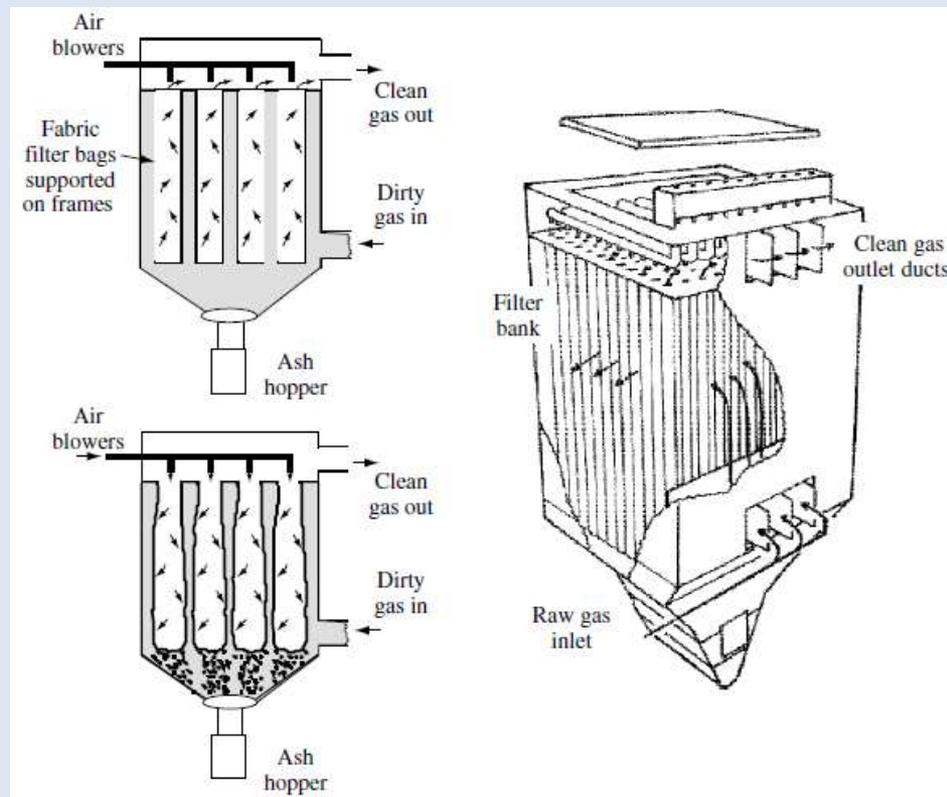
- **Incineração de Massa:**
  - Controle de Emissões:
    - Precipitadores eletrostáticos.



# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

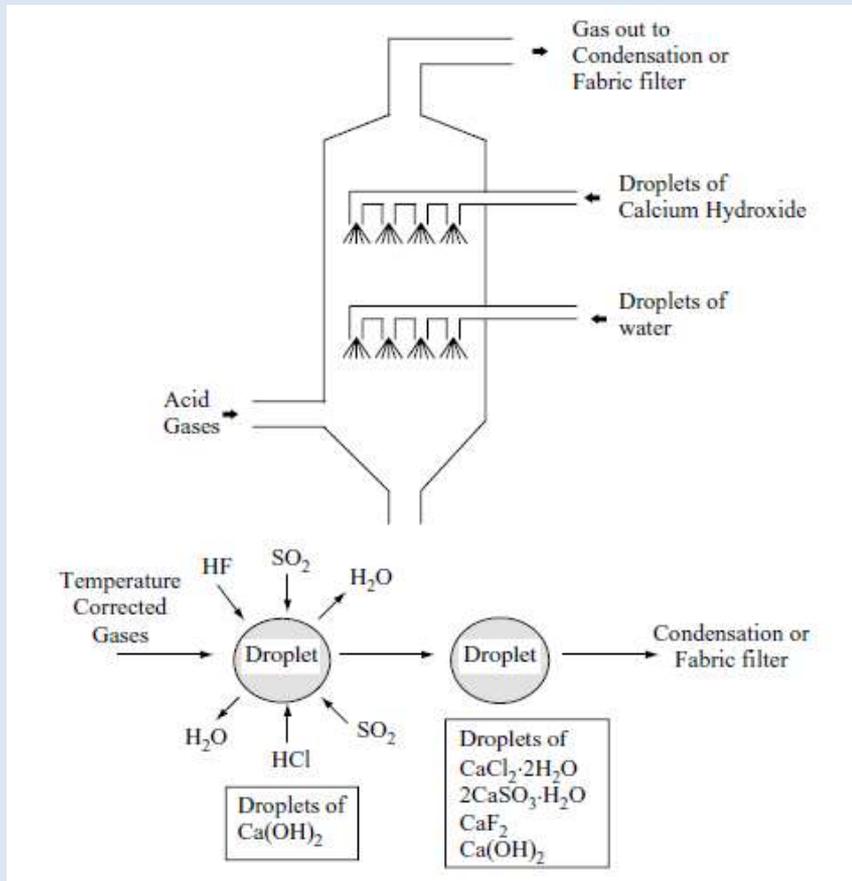
- **Incineração de Massa:**
  - Controle de Emissões:
  - Filtros de tecidos (filtros manga).



# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**
  - Controle de Emissões:
  - Lavadores úmidos.

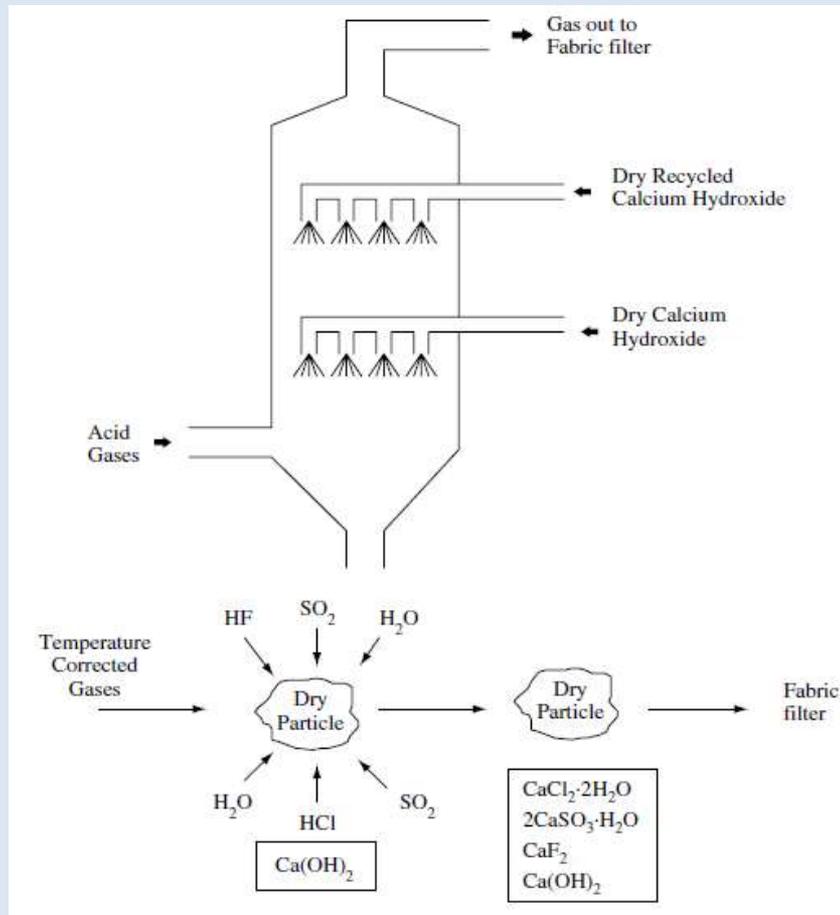


Fonte: Williams (2005)

# Sistemas de Incineração

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

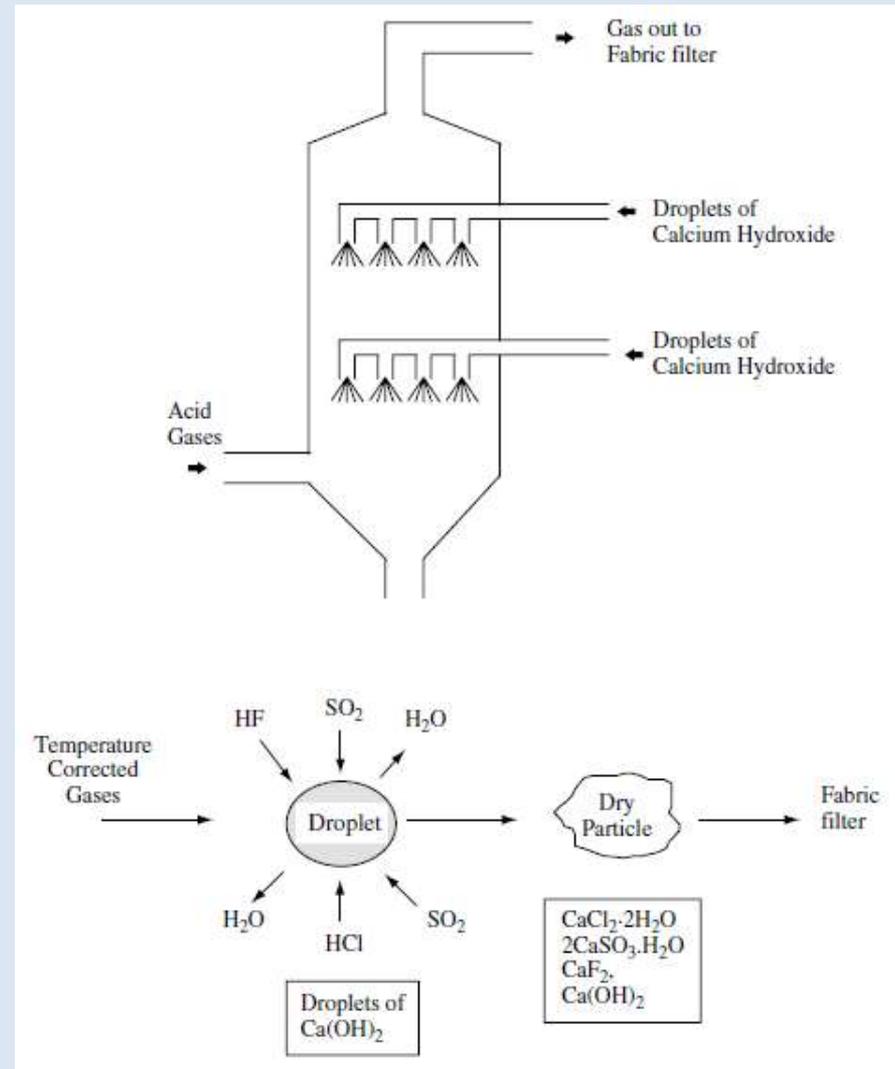
- **Incineração de Massa:**
  - Controle de Emissões:
  - Lavadores secos.



# Sistemas de Incineração

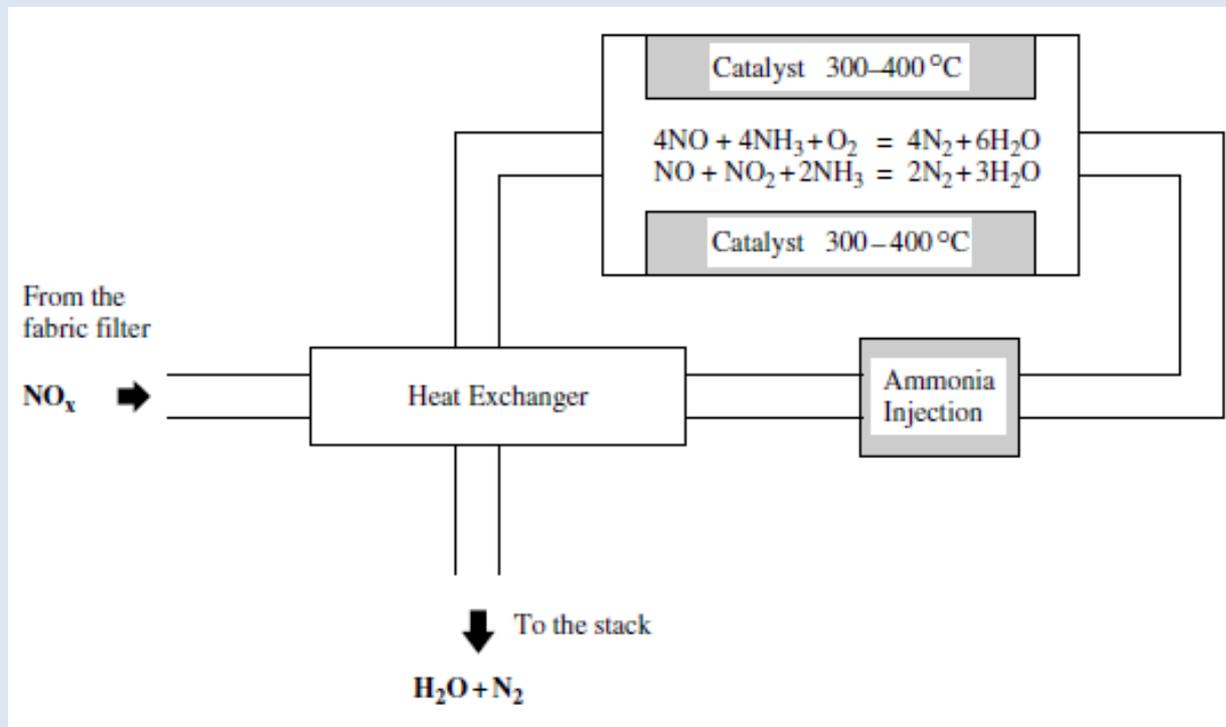
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineração de Massa:**
  - Controle de Emissões:
  - Lavadores semi-secos.



# Sistemas de Incineração

- Incineração de Massa:
  - Controle de Emissões:
  - Sistemas de- $\text{NO}_x$ .



# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Outros Tipos de Incineradores**

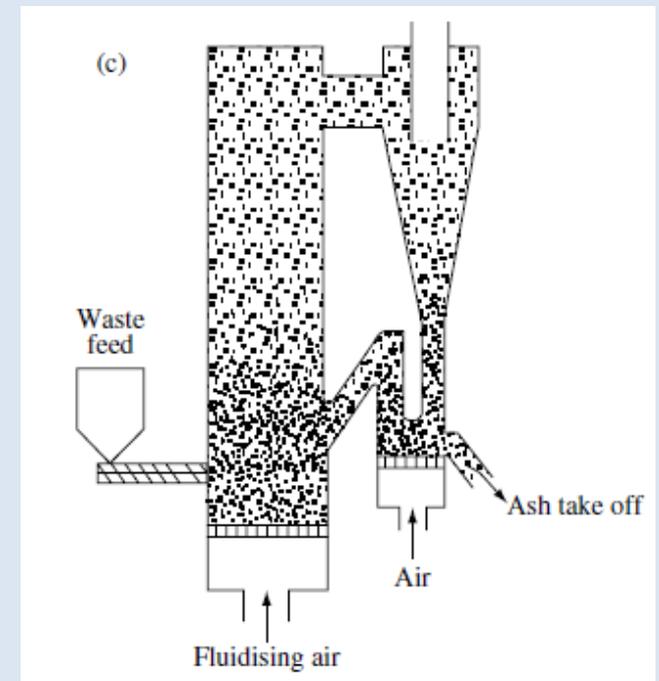
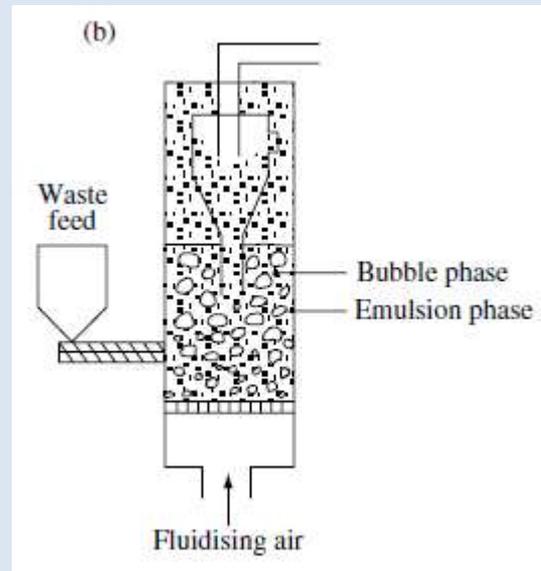
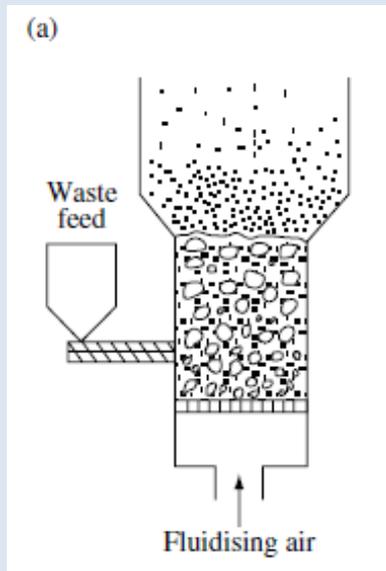
- Há uma grande variedade de tipos de incineradores utilizados para incinerar uma grande variedade de resíduos e dentre os quais pode-se destacar:
  - Incineradores de leito fluidizado;
  - Incineradores de baixo fluxo de ar;
  - Incineradores de forno rotativo;
  - Incineradores de resíduos líquidos e gasosos.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Leito Fluidizado**

- Incineradores de leito fluidizado são utilizados para uma grande variedade de resíduos, incluindo resíduos sólidos urbanos, lodo de tratamento de esgoto, resíduos perigosos, resíduos líquidos e gasosos e resíduos de difíceis combustão. Os leitos fluidizados são principalmente do tipo: leito borbulhante (a) , leito turbulento (b) ou leito circulante (c).



# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Leito Fluidizado**
  - Leitões fluidizados consistem de um leito de partículas de areia contidas em uma câmara vertical revestida com material refratário, através do qual o ar de combustão primária é soprado por baixo. As partículas de areia formam, portanto, o leito fluidizado, ajustando o fluxo de ar.
  - O leito de areia é aquecido por ar pré-aquecido ou por gás ou óleo em combustão para se aumentar a temperatura, de tal modo que os resíduos de entrada entram em combustão de forma muito eficiente.
  - Os resíduos processados, na forma de resíduos sólidos urbanos picados, ou combustíveis derivados de resíduos, ou mesmo outros resíduos, como lodo de esgoto, resíduos industriais ou de serviços de saúde, são alimentados continuamente no leito de areia quente.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

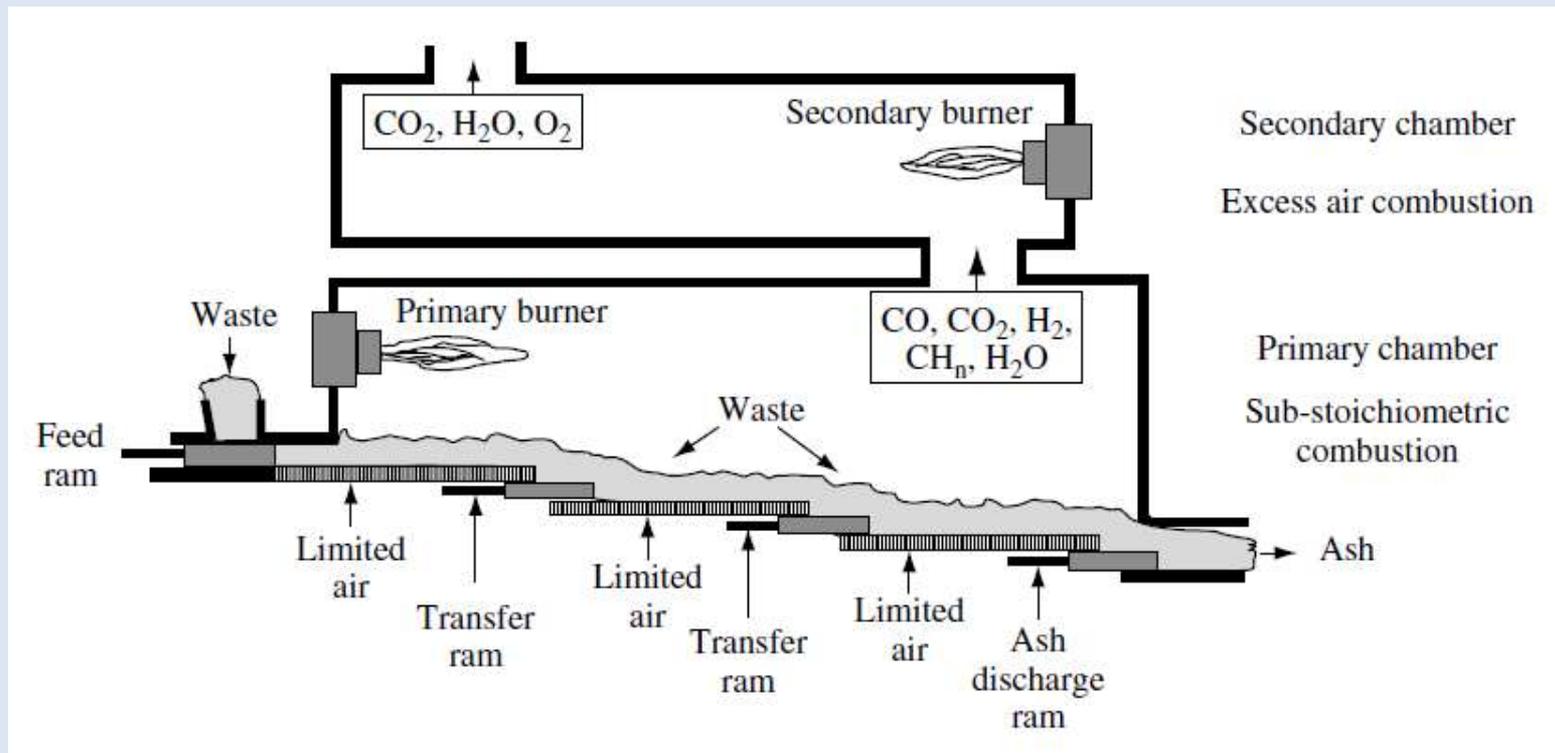
- **Incineradores de Leito Fluidizado**
  - Uma característica adicional dos leitos fluidizados são as suas temperaturas máximas de operação mais baixas, tipicamente cerca de 850 a 950 °C, o que, por conseguinte, produzem níveis mais baixos de NOx.
  - O reator de leito fluidizado aumenta significativamente a taxa de queima de resíduos, uma vez que a taxa de pirólise do material de resíduos sólidos é aumentada através do contato direto com o material de leito inerte quente.
  - Além disso, a superfície de queima do material sólido é continuamente desgastada pelo material do leito, aumentando a taxa de formação de carvão e a taxa de oxidação do carvão.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Baixo Fluxo de Ar**

- Incineradores com entrada de ar controlada (baixo fluxo) ou de pirólise são incineradores de dois estágios de combustão, que são amplamente utilizados para a incineração de resíduos hospitalares e também para alguns resíduos industriais.



# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Baixo Fluxo de Ar**
  - As duas fases consistem numa fase de pirólise e numa fase de combustão. O sistema é usado principalmente para resíduos sólidos.
  - As vantagens desse tipo de incinerador são um processo de combustão mais controlada levando a emissões mais baixas de compostos orgânicos voláteis e monóxido de carbono. Além disso, tem baixo arraste de partículas nos gases de combustão, o que também reduz a emissão de poluentes particulados, tais como metais pesados, dioxinas e furanos.
  - A pirólise é definida como a decomposição química dos resíduos pela ação do calor na ausência de oxigênio.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Baixo Fluxo de Ar**
  - O aquecimento do resíduo em uma atmosfera inerte produz um gás que, quando inflamado, é auto-portante no ar. Na prática a câmara de combustão em duas fases depende de semi-pirólise, em que o calor para a decomposição térmica ou a gaseificação dos resíduos é produzido por combustão sub-estequiométrica do resíduo.
  - O processo em duas etapas assegura que as velocidades dos gases são relativamente baixas e o material particulado é, em grande parte mantida no primeiro estágio. No entanto, com as exigências legais rigorosas sobre as emissões, toda a gama de sistemas de limpeza de gás é necessária para controlar as emissões de outros gases, tais como ácidos, metais pesados, dioxinas e furanos.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

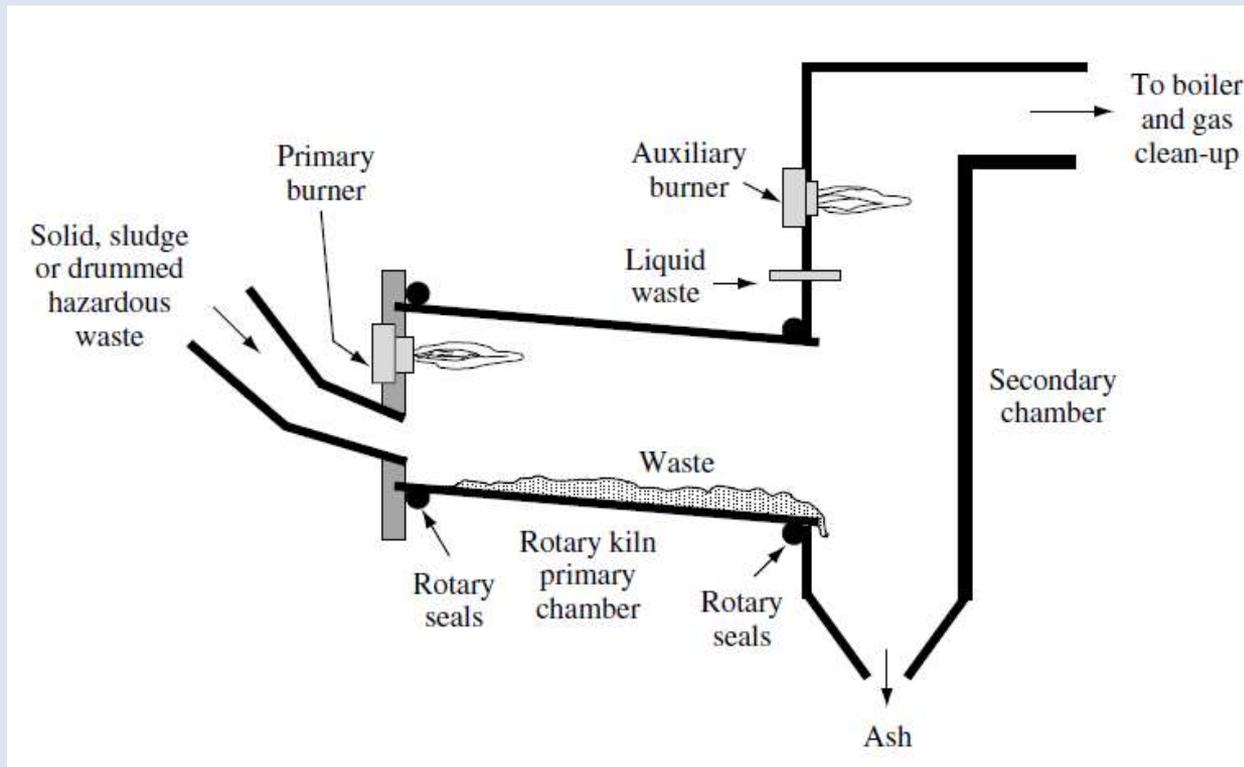
- **Incineradores de Baixo Fluxo de Ar**
  - A temperatura dos gases que saem da câmara de pirólise são da ordem de 700-800 °C, uma vez que uma grande proporção do calor gerado é consumido no processo pirolítico endotérmico.
  - Estes gases vão em seguida para câmara secundária, em que um excesso (estequiométrico) de ar de aproximadamente 200% é adicionado, o que resulta em temperaturas de 1000-1200 °C, o que completa o processo de combustão do hidrogênio, monóxido de carbono e hidrocarbonetos. O processo de combustão em duas fases, inibe a formação de NOx.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Forno Rotativo**

- O forno rotativo é um tipo de incineração em duas fases, onde a primeira fase é normalmente operada de modo oxidante, ou seja, com cerca de 50 a 200% de excesso de ar, ao contrário do modo semi-pirolítico encontrado nos incineradores de baixo fluxo de ar.



# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Forno Rotativo**
  - Fornos rotativos têm sido usados para uma grande variedade de resíduos, incluindo resíduos sólidos urbanos, lodo de esgoto, resíduos industriais e resíduos perigosos e para limpeza de solos contaminados, no entanto, eles são mais comuns para o tratamento de resíduos perigosos, clínicos e industriais, em que, em alguns casos tambores integrais de resíduo são alimentados para o forno rotativo para serem completamente destruídos.
  - O forno rotativo é a câmara primária, que consiste de um cilindro inclinado revestidas com um material cerâmico, que gira em torno de rolos em taxas que podem variar entre duas rotações por minuto a seis rotações por hora, dependendo do tipo de resíduo e do tipo de forno rotativo.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Forno Rotativo**
  - O tamanho do forno rotativo pode ser 1 a 6 m de diâmetro e 4 a 20 m de comprimento. Os resíduos são alimentados pela extremidade dianteira e inflamados por um queimador.
  - Os resíduos da combustão são agitados pela rotação do forno e se movem para baixo no cilindro para atingir sua extremidade inferior já em forma de cinzas. O tempo de residência dos resíduos no forno rotativo são geralmente superiores a 30 minutos.
  - Defletores internos podem ser utilizados para aumentar a mistura dos resíduos. O forno normalmente opera em temperaturas em torno de 1200 °C para incineração de resíduos perigosos.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

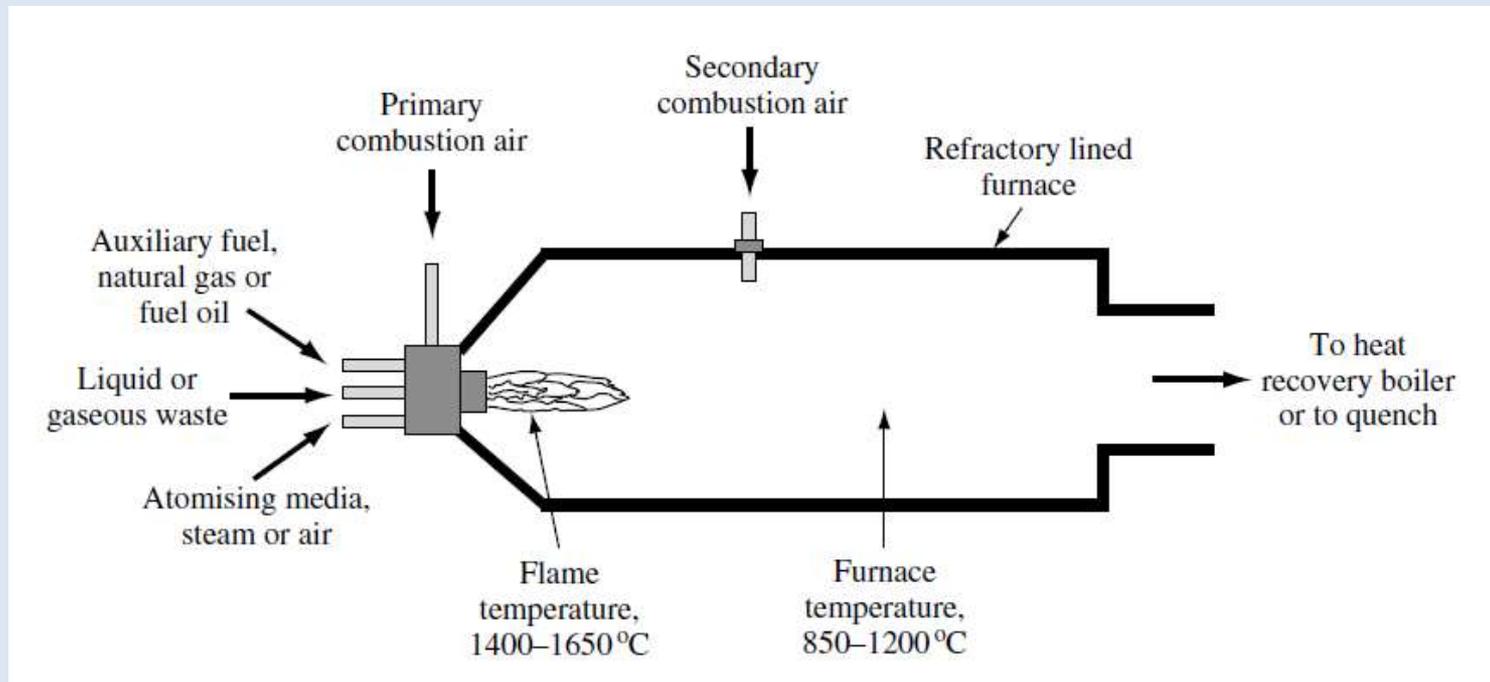
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Forno Rotativo**
  - As temperaturas típicas da câmara secundária são de até 1400 °C, com tempos de residência entre 1 e 3 s e até 200% de excesso de níveis de ar.
  - O forno rotativo combina um longo tempo de residência acrescido de temperatura elevada, o que permite a completa combustão de resíduos perigosos complexos.
  - Para proteger o forno rotativo e a câmara secundária de altas temperaturas de combustão, as paredes são revestidas com um material cerâmico refratário.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Resíduos Líquidos e Gasosos**
  - Nos incineradores de resíduos líquidos e gasosos os resíduos passam por um queimador que mistura os resíduos (combustíveis) com o ar para formar uma zona de chama que queima os resíduos.
  - São usados extensivamente para a combustão de resíduos perigosos.



# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Resíduos Líquidos e Gasosos**
  - Combustível suplementar pode ser necessário, dependendo do poder calorífico dos resíduos, ou então o resíduo líquido é bombeado diretamente para uma chama gerada pelo queimador, acionado por um combustível convencional.
  - O combustível convencional, tal como o gás natural ou o óleo combustível, ajuda a manter as condições de combustão estáveis.
  - A chama é projetada em uma câmara de combustão com forrado com material refratário cerâmico que irradia calor de volta para os gases de escape, proporcionando, assim, uma zona quente estendida para queimar completamente os produtos da combustão dos resíduos.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Resíduos Líquidos e Gasosos**
  - Temperaturas muito altas ocorrem na chama, da ordem de 1400 a 1650 °C e as temperaturas na câmara do forno se situam entre 820 e 1200 °C. A câmara pode ser horizontal ou vertical.
  - A parte mais importante do incinerador é o queimador, que serve, essencialmente, para pulverizar o resíduo (gotículas entre 10 e 150  $\mu\text{m}$ ) de modo a formar uma névoa de finas gotículas, e o vapor que se inflama de modo a formar a chama. Quanto menor o tamanho das gotas, mais fácil se torna a vaporização e, por conseguinte, o esgotamento de cada gotícula leva um tempo muito mais curto.
  - Existem vários projetos diferentes de bico queimador para lidar com a ampla gama de propriedades encontradas em resíduos líquidos e lodos.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Incineradores de Resíduos Líquidos e Gasosos**
  - Incineradores de resíduos gasosos operam em um sistema semelhante ao incineradores de resíduos líquidos, mas as dificuldades de produzir um spray fino ou vapor para a combustão já estão superadas.
  - Efluentes gasosos consistem geralmente em hidrocarbonetos orgânicos que são inflamáveis. Os gases ou vapores podem ser de baixa concentração e, conseqüentemente, não serem auto térmicos, passam por um queimador com gás combustível suplementar e ar para combustão.
  - A câmara de combustão fornece um longo tempo de residência para queima completa dos resíduos gasosos.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Outras Tecnologias de Tratamento Térmico**

- Além das tecnologias de incineração existem outros tipos de tratamentos térmicos de resíduos que inclusive podem não consumir os resíduos. Dentre estas tecnologias pode-se destacar :
  - Pirólise de resíduos;
  - Gaseificação de resíduos;
  - Tratamento por plasma;
  - Co-processamento em fornos de cimento;
  - Tratamento por autoclave;
  - Tratamento por micro-ondas;
  - Etc..

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Pirólise e Gaseificação**

- A pirólise é um processo de destilação destrutiva na ausência de oxigênio onde se fornece calor ao material orgânico complexo, que se decompõe. Os produtos de pirólise incluem um material sólido, um líquido e um gasoso.
- Uma modificação da pirólise é a gaseificação, na qual uma quantidade limitada de oxigênio é introduzida na forma de oxigênio puro ou ar, e a oxidação resultante produz calor suficiente para que o processo seja autossustentável. Assim, a reação pode ser exotérmica (gaseificação) ou endotérmica (pirólise), dependendo da quantidade de calor e da adição ou não de oxigênio.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Pirólise e Gaseificação**

- O processo de pirólise pode ser modificado, a fim de alcançar um produto final desejado. Quatro formas gerais de operação podem ser consideradas:

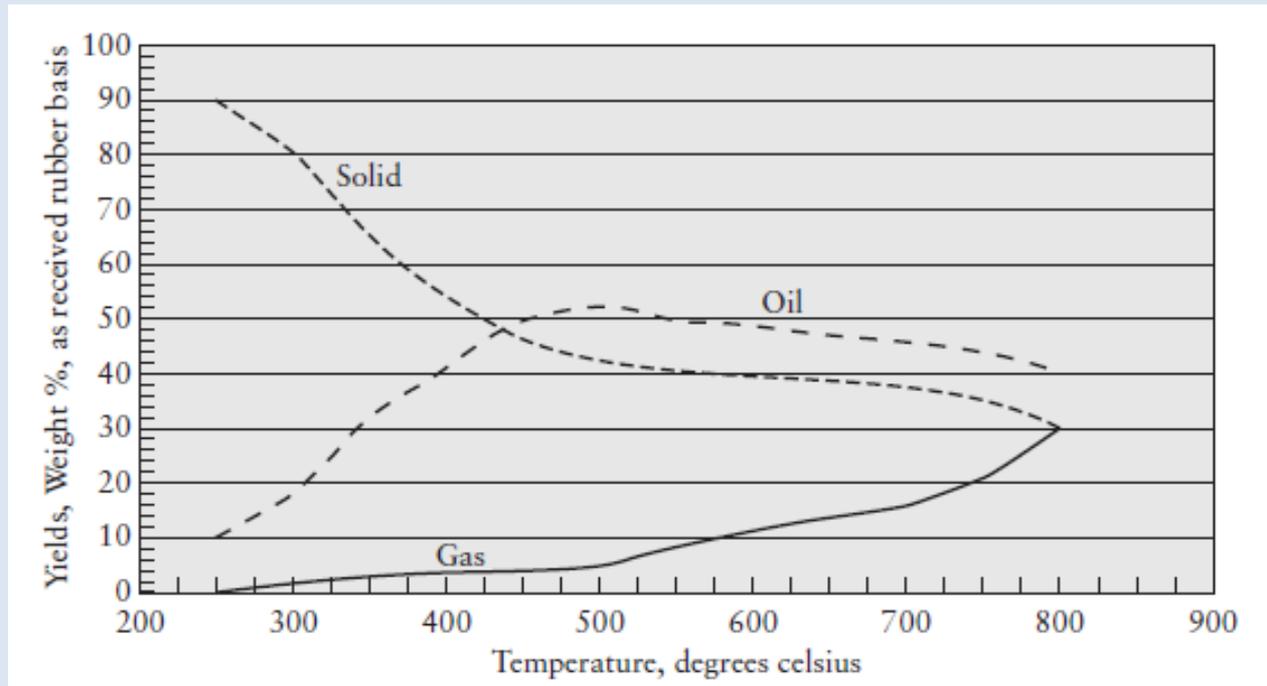
Tipo	Características
Pirólise lenta	Se processa a uma velocidade muito baixa de aumento da temperatura, em geral, menos do que um °C por segundo, e a faixa de temperatura final fica compreendida entre 500 e 750 °C.
Pirólise intermediária	Ocorre com um aumento de temperatura mais rápido, entre 5 e 100 °C/s e atinge temperaturas entre 750 e 1000 °C.
Pirólise rápida	Ocorre quando o aumento de temperatura é rápido, entre 106 e 500 °C/s. As temperaturas atingidas por este processo superam 1000 °C.
Pirólise ultra rápida	Ocorre quando o aumento da temperatura é praticamente instantâneo. As temperaturas obtidas neste processo podem ultrapassar 1200 °C.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Pirólise e Gaseificação**

- A escolha adequada destas variáveis determina os produtos obtidos a partir do sistema de pirólise. A temperaturas muito elevadas, o produto é principalmente gás, enquanto a baixas temperaturas, os produtos resultantes são principalmente sólidos.



# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

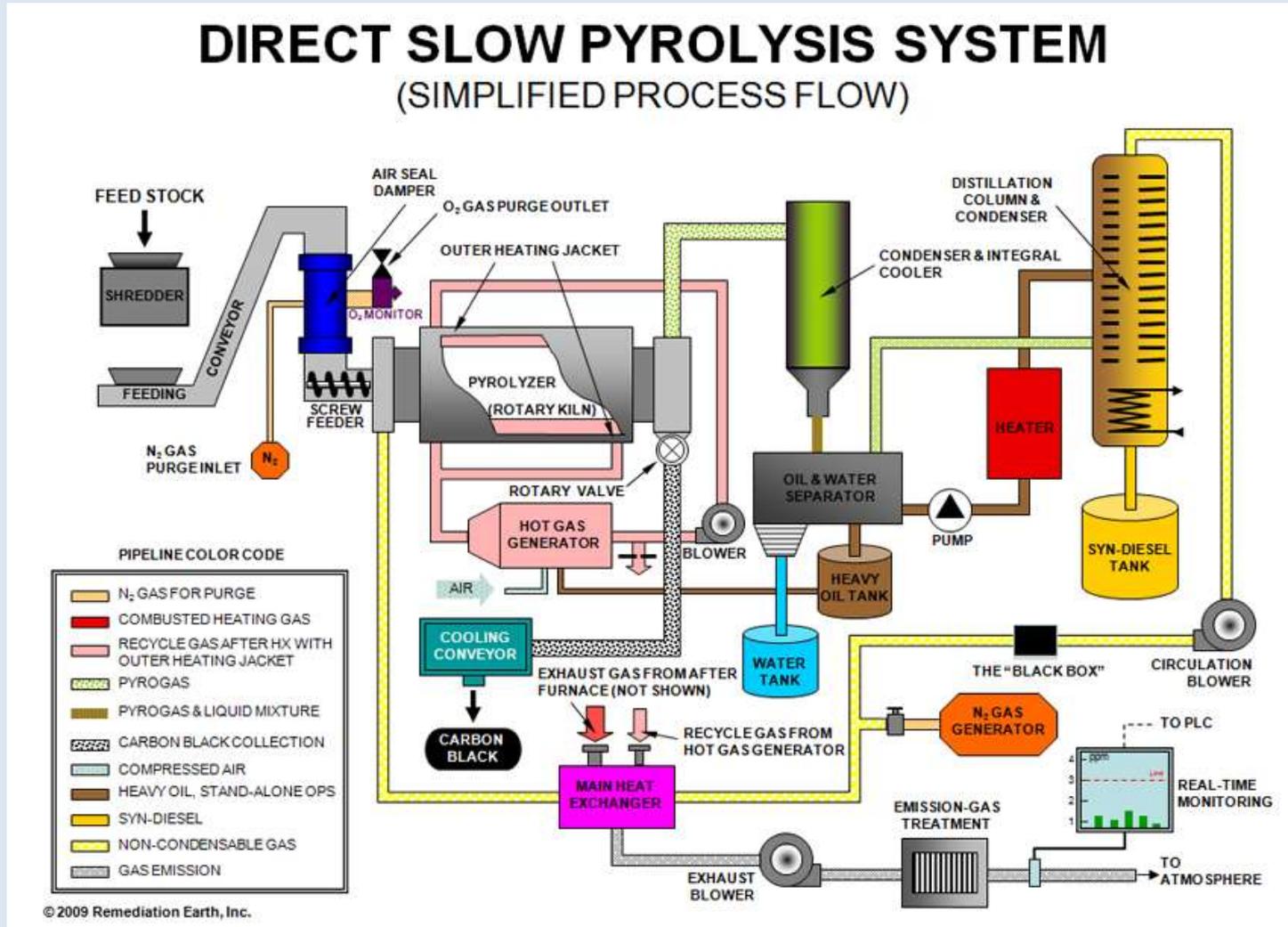
- **Pirólise e Gaseificação**

- As três frações resultantes da pirólise são compostas principalmente por:
  - **Fração gasosa** → Hidrogênio, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e vários outros gases, das características do material a se decomposto.
  - **Fração líquida** → Alcatrão ou óleo contendo ácido acético, acetona, metanol e hidrocarbonetos complexos . Através de um processamento adicional, esta fração líquida pode ser utilizada como um combustível sintético que pode substituir o óleo combustível.
  - **Fração Sólida** → Um carvão constituído praticamente de carbono puro, mais material inerte originalmente presente no resíduos sólido tratado.
- A pirólise se processa melhor com resíduos homogêneos, principalmente resíduos industriais ou biomassa, embora existam muitas unidades que realizam o tratamento de resíduos sólidos municipais.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

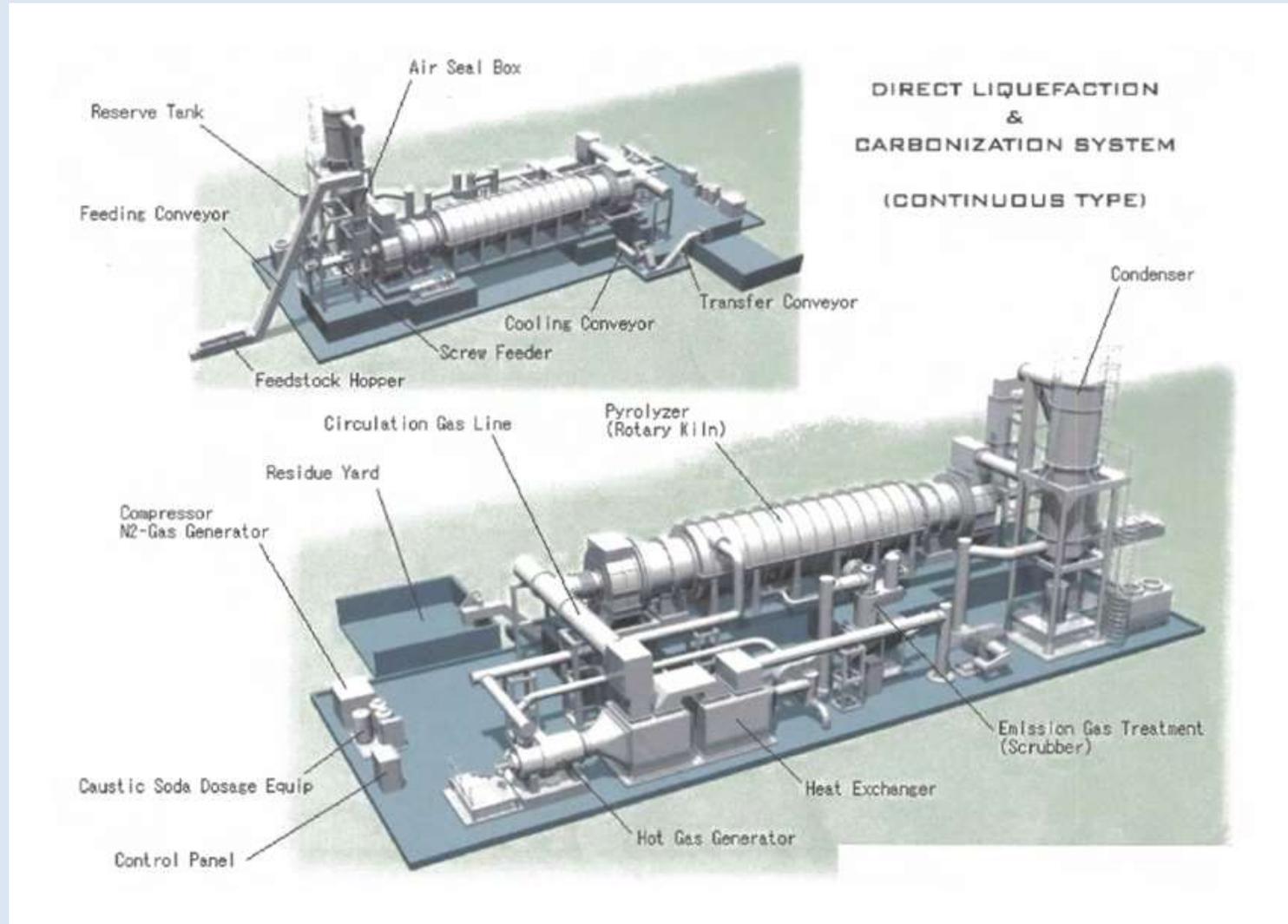
## • Pirólise e Gaseificação



# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Pirólise e Gaseificação



# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Plasma**

- O plasma é considerado o quarta estado da matéria e é constituído por um gás altamente ionizado, composto de partículas neutras e carregadas, que exibem um comportamento coletivo.
- Pode se formar a partir do aquecimento de materiais a temperaturas acima de 5.000 °C, resultando em gases ou fluidos eletricamente carregados. Esses “gases” são profundamente influenciados pelas iterações elétricas de íons e elétrons na presença de um campo magnético.
- A eletricidade que passa por meio de eletrodos de grafite ou carbono, com vapor e/ou injeção de ar/oxigênio, é usada para produzir eletricamente o gás condutor (plasma).

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

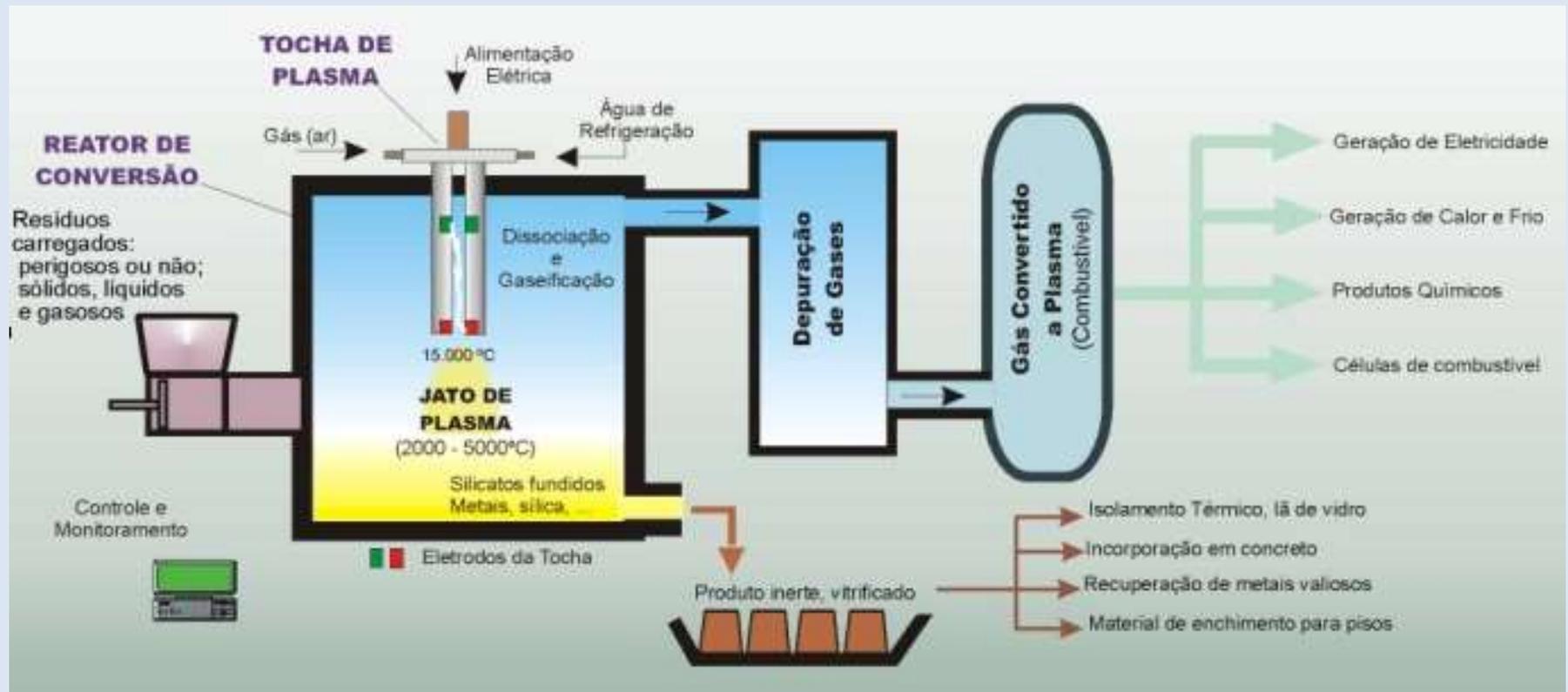
- **Plasma**

- O tratamento térmico por plasma é um processo no qual os componentes inorgânicos são convertidos em materiais, cerâmicos e vítreos praticamente inertes.
- A tocha de plasma, que opera em temperaturas elevadas (de 5.000 a 100.000 °C), pode ser empregada para tratamento de resíduos sólidos urbanos, industriais, biológicos e até mesmo nucleares.
- A eficiência da tecnologia de tratamento por plasma já foi verificada em escala piloto, contudo sua viabilidade técnica e econômica ainda não foi confirmada para o tratamento de RSU em escala comercial.
- No Brasil já existem empresas que tratam resíduos por plasma, entretanto este tratamento só é aplicado a determinados tipos de resíduos industriais e algumas frações do RSU.

# Tratamentos Térmicos de Resíduos

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Plasma



# Bibliografia e Leitura Recomendada

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

## Bibliografia e Leitura Recomendada:

- Williams, P. T. (2005), Waste Treatment and Disposal. Wiley, Second Edition. **Chapter 5.**
- WORLD BANK (1999), Municipal Solid Waste Incineration. Technical Guidance Report.
- Worrel, W. A. and Vesilind, P. A. (2012), Solid Waste Engineering. Cengage Learning, Second Edition. **Chapter 7.**