

# Sistemas de combustión

2024





# Consumos en la Industria (2016)

Consumo (ktep)



Usos	GN	LE	RB	SO	SG	GP	GA	KE	GO	FO	CP	CC	EE	OTROS	TOTAL
Iluminación													10,7		10,7
Generación de Vapor	1,4	123,2	26,8		0,6	0,7			0,1	37,1			0,3		190,3
Cogeneración de Vapor		4,5	847,8						0,0	11,8				1,6	865,6
Otros Equipos de Calor	2,9	11,7	20,3	0,1	0,0	0,1			1,0	9,0			0,4		45,6
Calor Directo	9,2	31,5	7,7		3,9	4,3		0,9	5,2	109,1	54,7	0,3	10,6		237,4
Fuerza Motriz							0,0		0,0				192,5	3,9	196,4
Frío de Proceso													26,6		26,6
Transporte Interno					0,4	0,3	0,1		10,1				2,8		13,7
Procesos Electroquímicos													3,9		3,9
Usos No Productivos	0,1	0,0	7,7	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0			11,6		20,0
<b>Total</b>	<b>13,5</b>	<b>171,0</b>	<b>910,4</b>	<b>0,2</b>	<b>5,3</b>	<b>5,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>	<b>16,5</b>	<b>166,9</b>	<b>54,7</b>	<b>0,3</b>	<b>259,4</b>	<b>5,5</b>	<b>1.610,3</b>

• ktep : kilo tonelada equivalente de petróleo

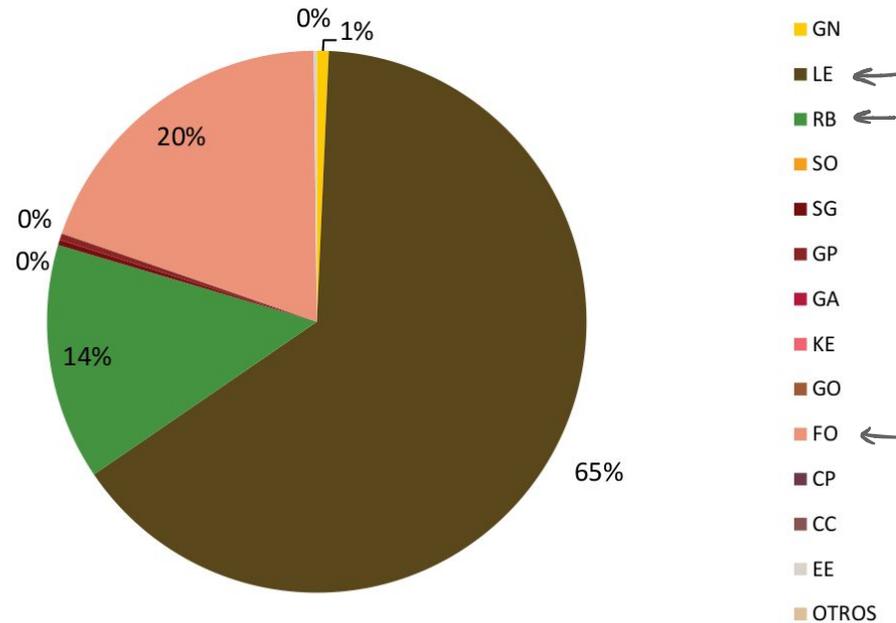
# Consumos en la Industria (2016)

Sin plantas de Pulpa de Celulosa. Consumo (ktep)

Usos	GN	LE	RB	SO	SG	GP	GA	KE	GO	FO	CP	CC	EE	OTROS	TOTAL
Iluminación													6,6		6,6
Generación de Vapor	1,4	123,2	21,3		0,6	0,7			0,1	35,2			0,3		182,8
Cogeneración de Vapor		0,5	87,9						0,0					1,6	90,0
Otros Equipos de Calor	2,9	11,7	20,3	0,1	0,0	0,1			1,0	9,0			0,4		45,6
Calor Directo	9,2	31,5	6,8		3,9	4,3		0,9	5,2	15,0	54,7	0,3	10,6		142,4
Fuerza Motriz							0,0		0,0				96,0	3,9	99,9
Frío de Proceso													26,6		26,6
Transporte Interno					0,4	0,3	0,1		8,7				2,3		11,8
Procesos Electroquímicos													3,9		3,9
Usos No Productivos	0,1	0,0	7,7	0,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0			8,1		16,4
<b>Total</b>	<b>13,5</b>	<b>167,0</b>	<b>144,0</b>	<b>0,2</b>	<b>5,3</b>	<b>5,5</b>	<b>0,1</b>	<b>0,9</b>	<b>15,1</b>	<b>59,2</b>	<b>54,7</b>	<b>0,3</b>	<b>154,7</b>	<b>5,5</b>	<b>626,1</b>

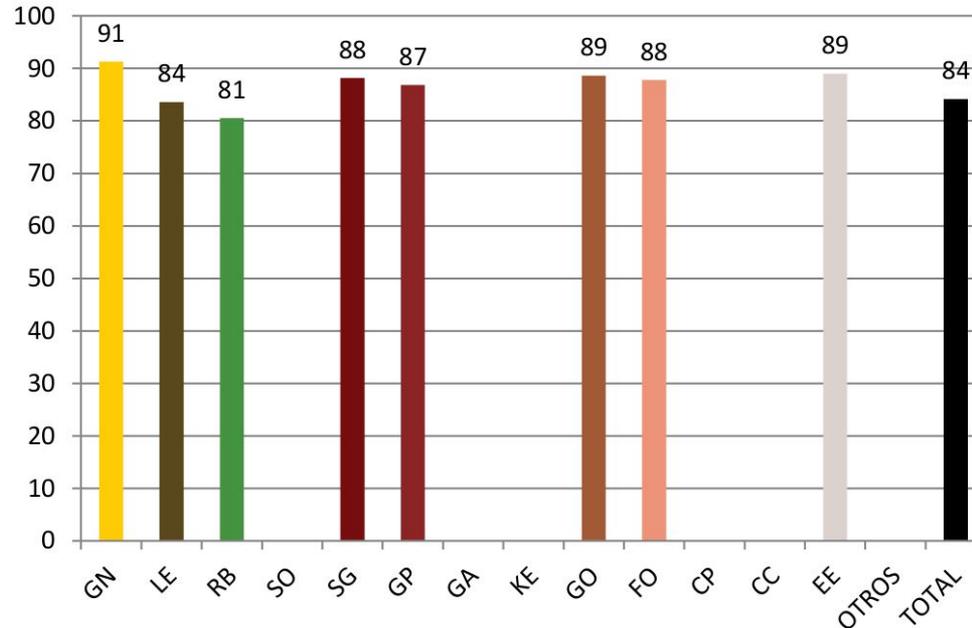
# Consumos en la Industria (2016)

Generación de vapor por fuente



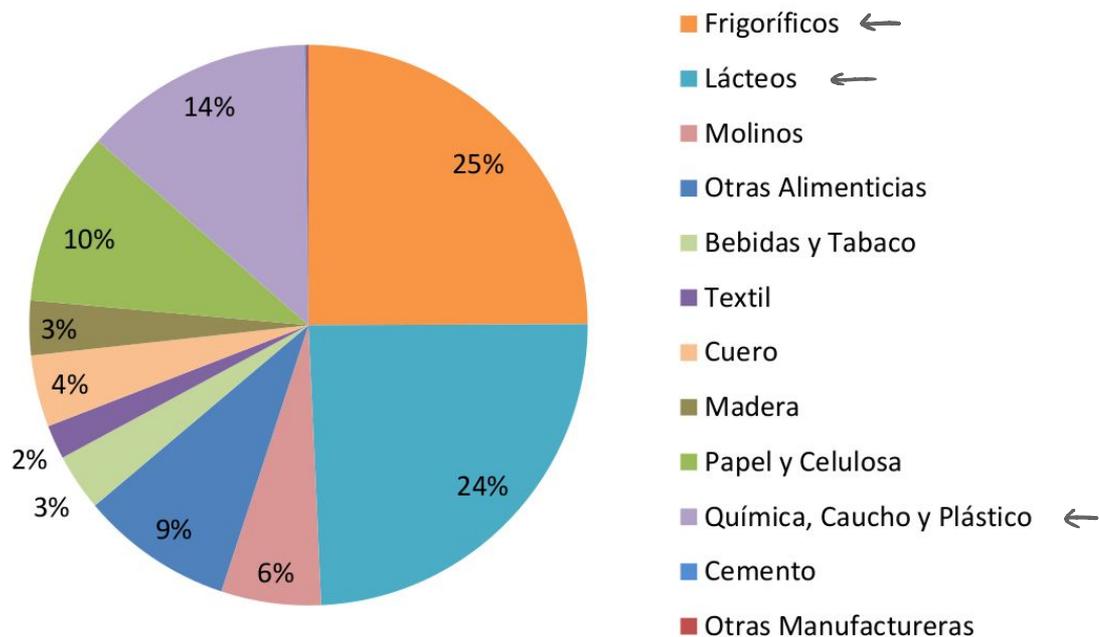
# Consumos en la Industria (2016)

Rendimientos en la generación de vapor (PCI)



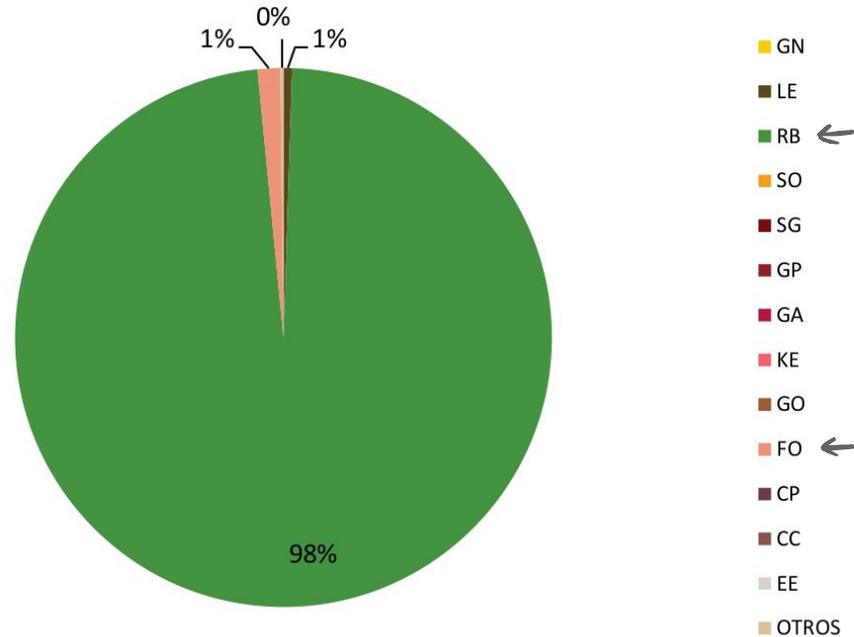
# Consumos en la Industria (2016)

Generación de vapor por rubro



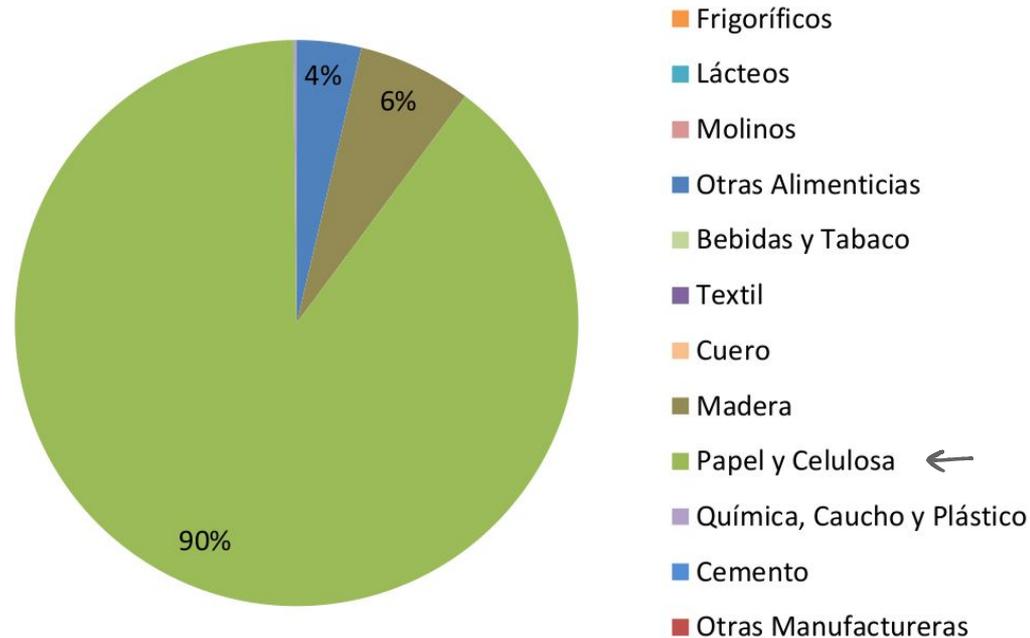
# Consumos en la Industria (2016)

Co-generación de vapor por fuente

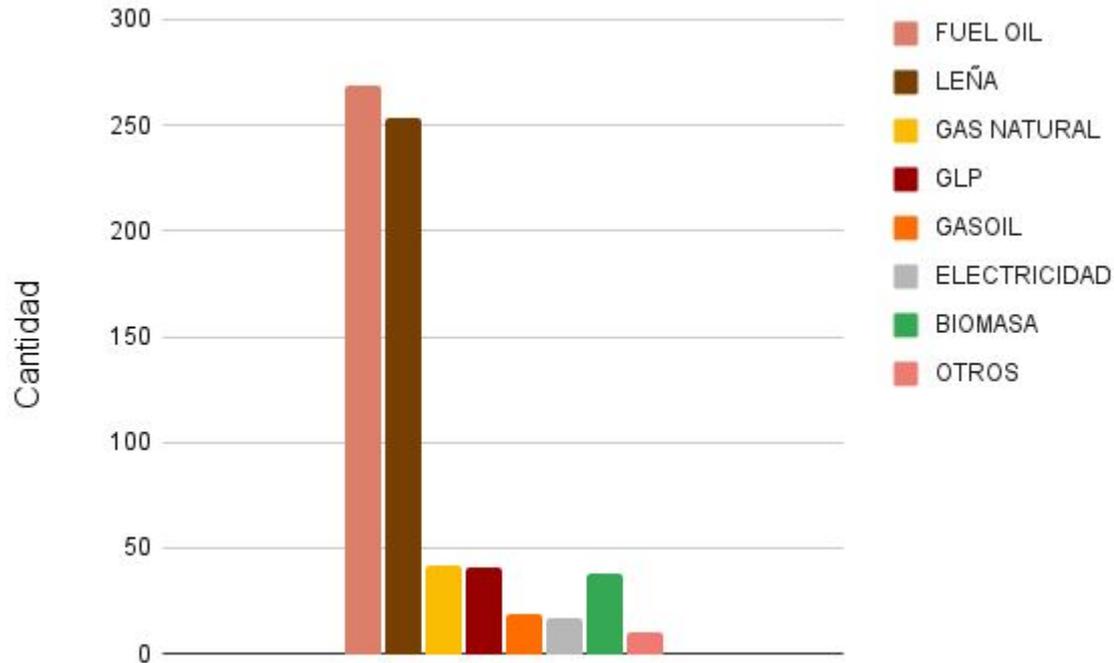


# Consumos en la Industria (2016)

Co-generación de vapor por rubro



# Cantidad de GV por tipo de combustible



# Dos conceptos a resaltar

1. La generación (o cogeneración) de **vapor** es el uso que **mayor cantidad de energía consume** en las industrias (a nivel global)
2. Los principales combustibles que se utilizan para producir ese vapor son: **Licor negro, Leña (o chip), Fueloil, Residuos de biomasa** (otros).

# A) Combustibles sólidos



1. Características como combustible
2. Combustión de biomasa
3. Sistemas de combustión
4. Cenizas

# Propiedades de las biomásas

CHONS	Ash	H <sub>2</sub> O
-------	-----	------------------

Biomasa	W	PCS	Ash	C	H	O	N	S	Aire q
	% bh	MJ/kg seco	% bs	% bs					Sm <sup>3</sup> /kg seco
Madera de Eucalipto	<53	19,5	0,4	52,3	5,9	41,4	0	0	1,11
Corteza de Eucalipto	<65	17,1	4,5	48,1	5,5	41,7	0,1	0,1	1,0
Madera de Pino	<55	20,0	0,3	49,3	6,0	44,1	0,3	<0,1	1,04
Cáscara de arroz	7 - 10	16,1	18,9	40,6	4,9	35,1	0,4	0,1	0,86
Bagazo de caña	50	17,3	3,1	41,3	5,8	49,1	0,6	0,1	0,82
Rastrojo de trigo	8 - 20	17,6	9,2	45,4	5,6	39,5	0,2	<0,1	0,97

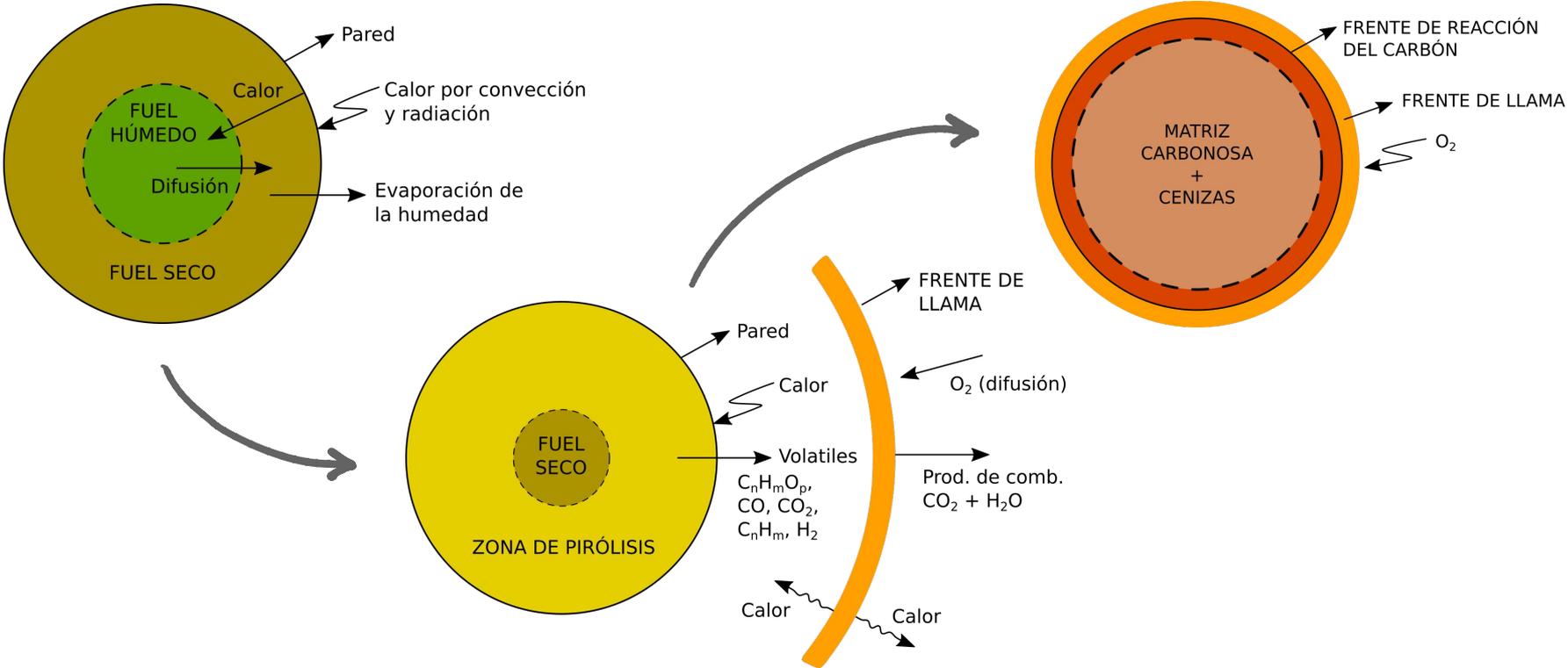
- Sm<sup>3</sup>: Metro cúbico de aire en condiciones standard (25°C y 1atm)

# Combustión de biomasa

Modelo de etapas secuenciales de la combustión:

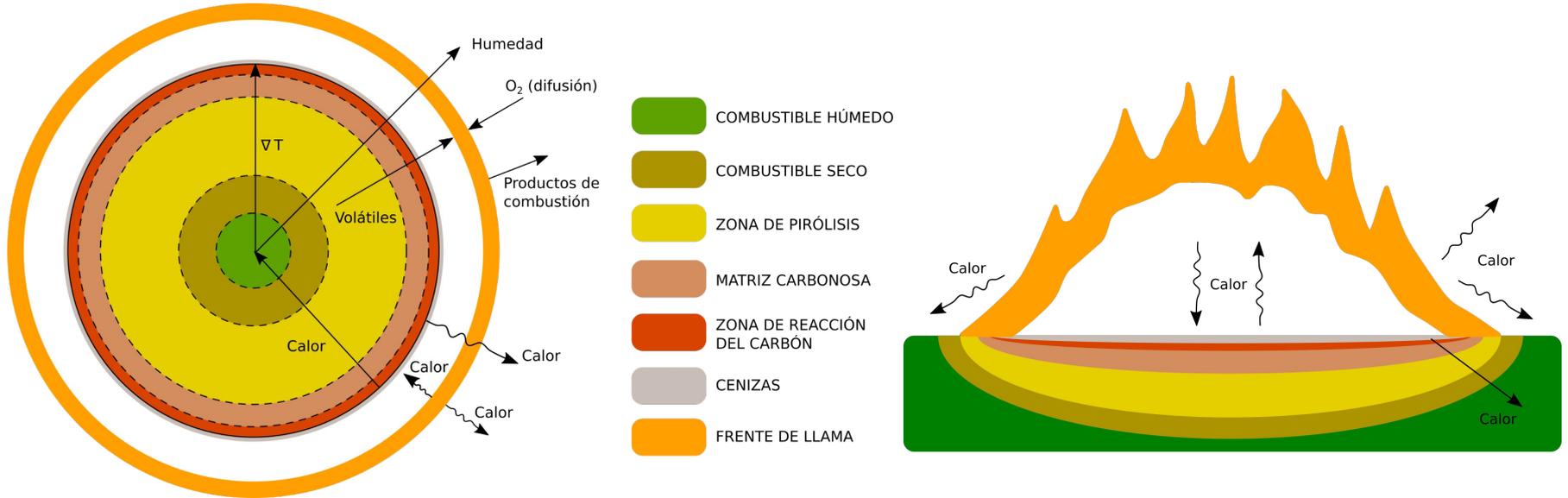
- Secado
- Pirólisis + Combustión de volátiles
- Gasificación + Combustión de matriz carbonosa

# Combustión de biomasa



# Combustión de biomasa

Etapas en simultáneo



# Combustión de biomasa

**Dificultades** que implica quemar biomasa sólida:

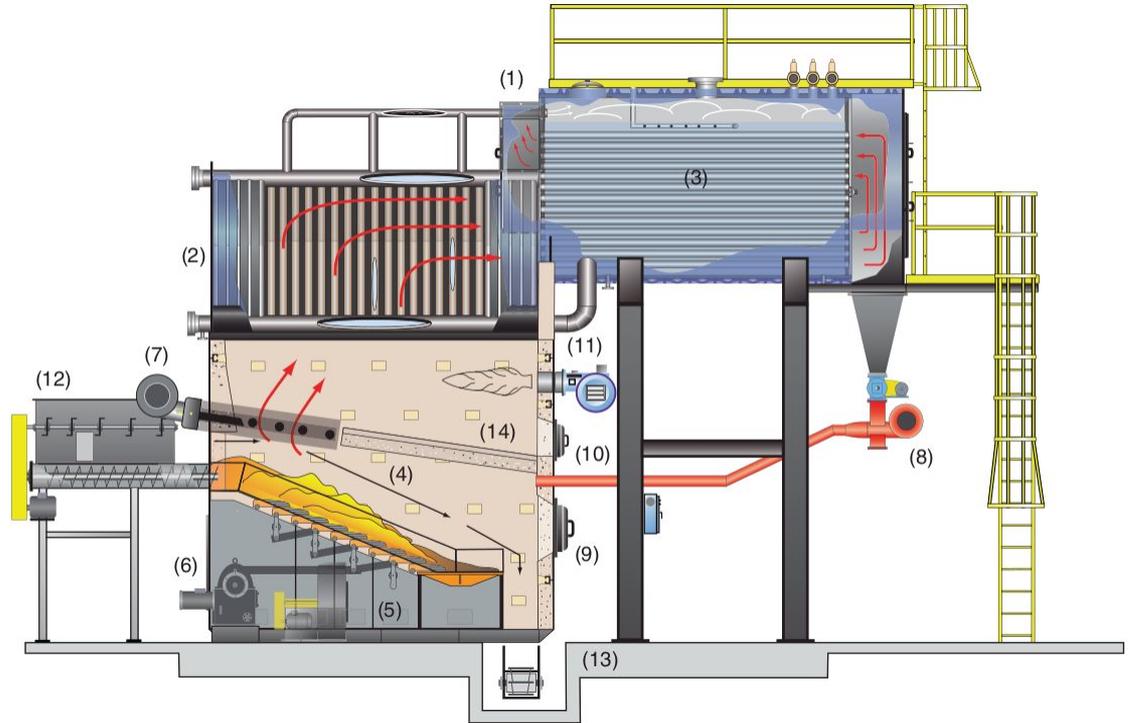
- Difícil pulverizar
- Contenido de humedad y cenizas
- Heterogeneidad en sus características físicas

El **sistema de combustión** debe compensar estos factores negativos con:

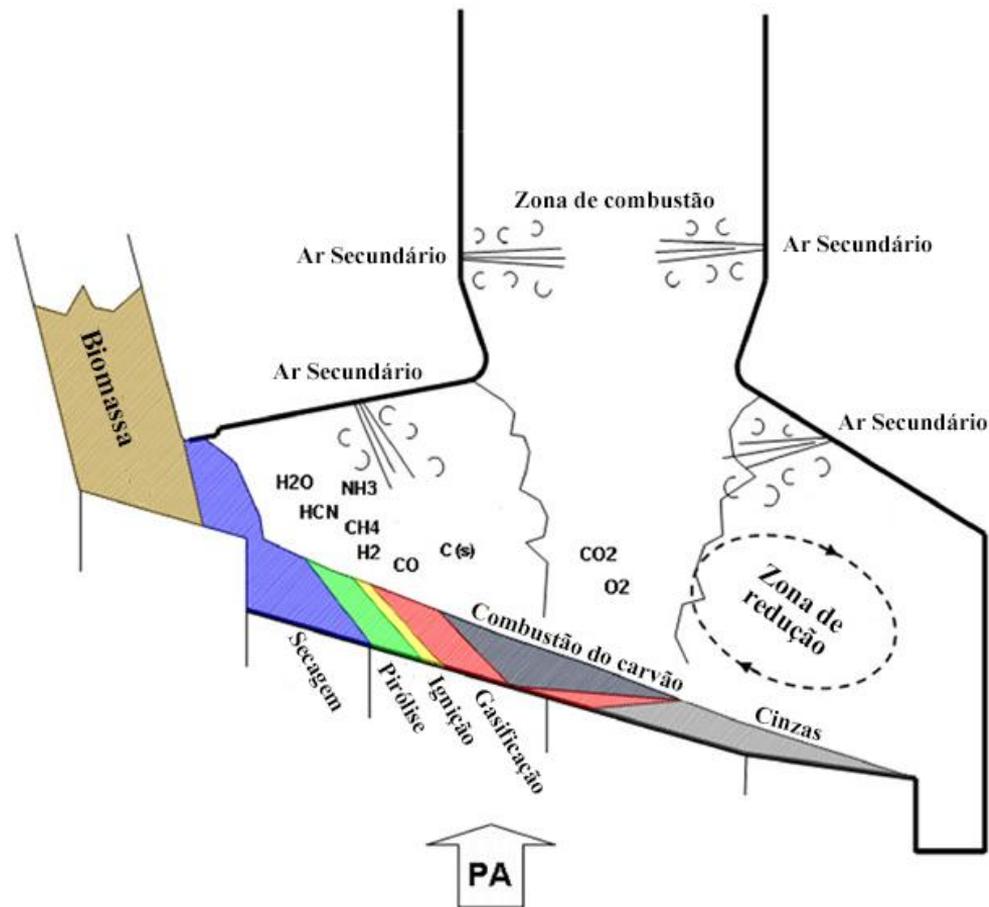
- Turbulencia
- Tiempo de residencia

# Sistemas de combustión de biomasa

- 1) Lecho fijo (sobre parrilla)
- 2) Quema en suspensión
- 3) Gasógeno + CC
- 4) Lecho fluidizado



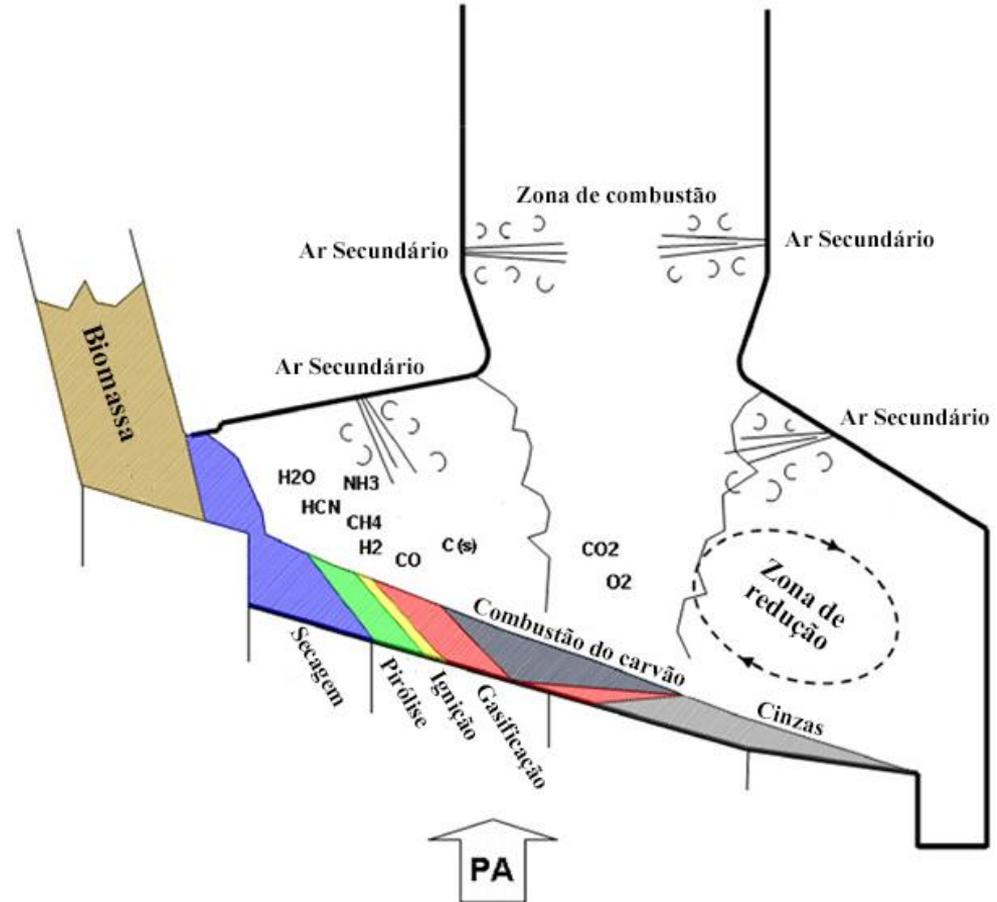
# Lecho fijo



# Lecho fijo

Componentes principais:

- Sistema de alimentação
- Parrilla
- Entradas de aire
- Descarga de cinzas



# Lecho fijo

## Alimentación:

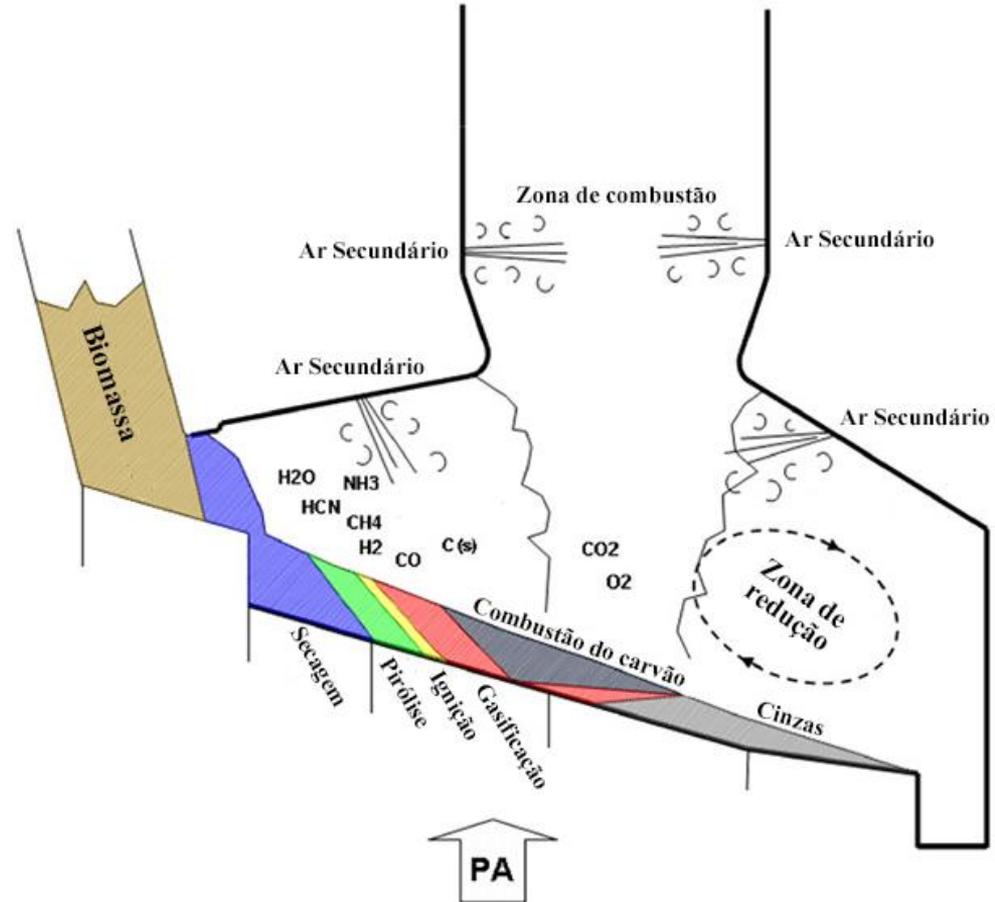
- Continua o discontinua
- Manual o automática

## Parrilla:

- Fija o móvil
- Horizontal o inclinada
- Seca o refrigerada

## Hogar:

- Seco o refrigerado



# Lecho fijo

Sistema de alimentación:  
Continuo y automático



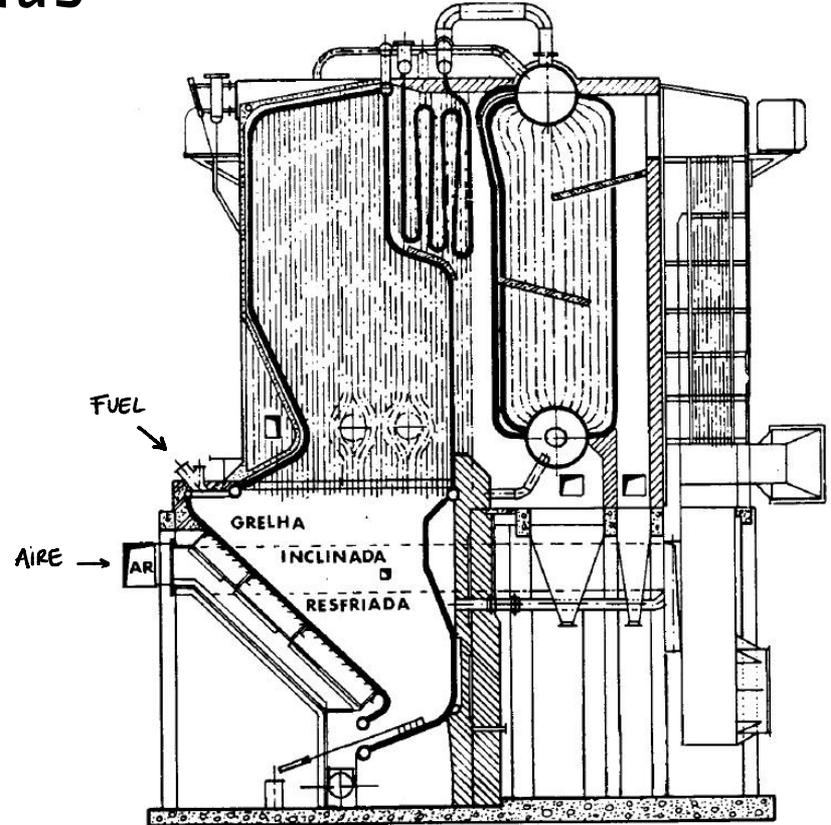
# Lecho fijo

Sistema de alimentación:  
Discontinuo y manual



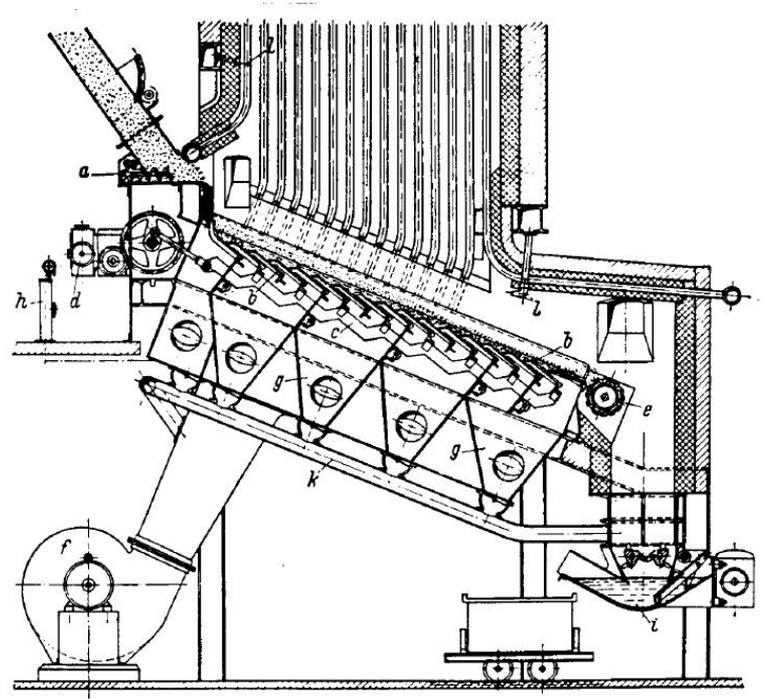
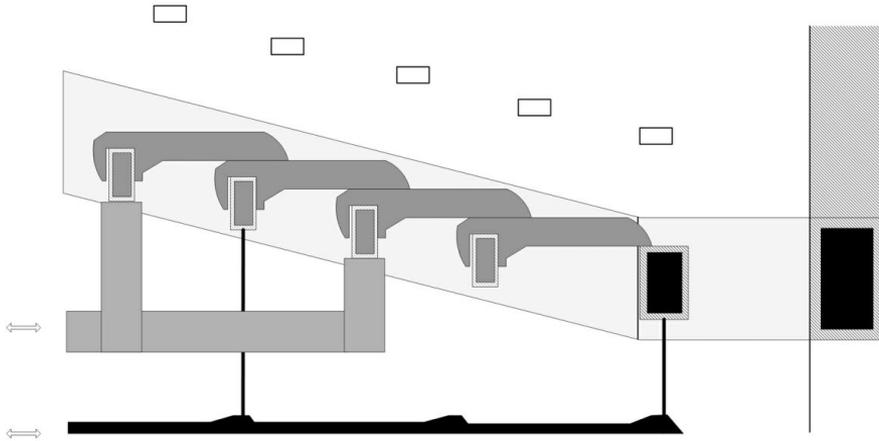
# Lecho fijo. Tipos de parrillas

## Parrilla inclinada



# Lecho fijo. Tipos de parrillas

## Parrilla reciprocante

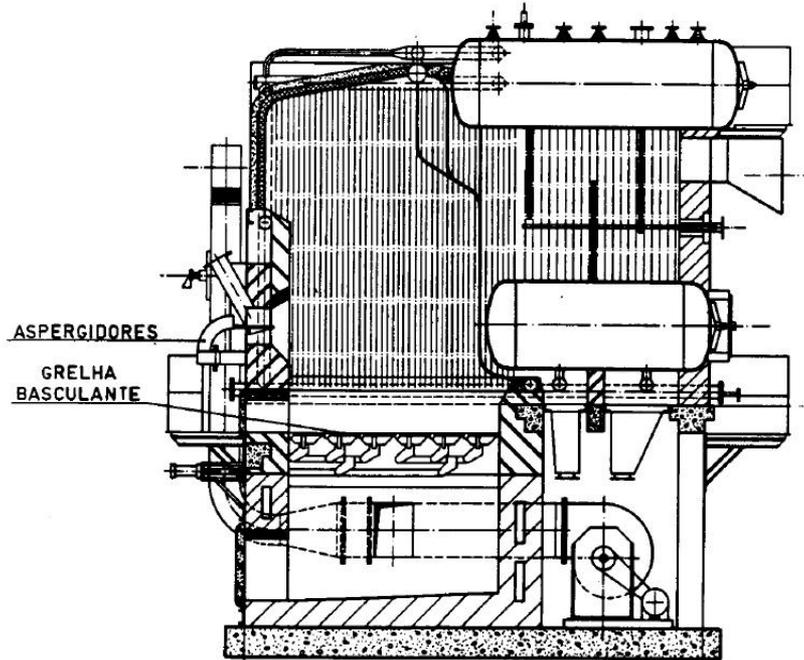


# Lecho fijo. Tipos de parrillas

Parrilla reciprocante



# Lecho fijo. Tipos de parrillas

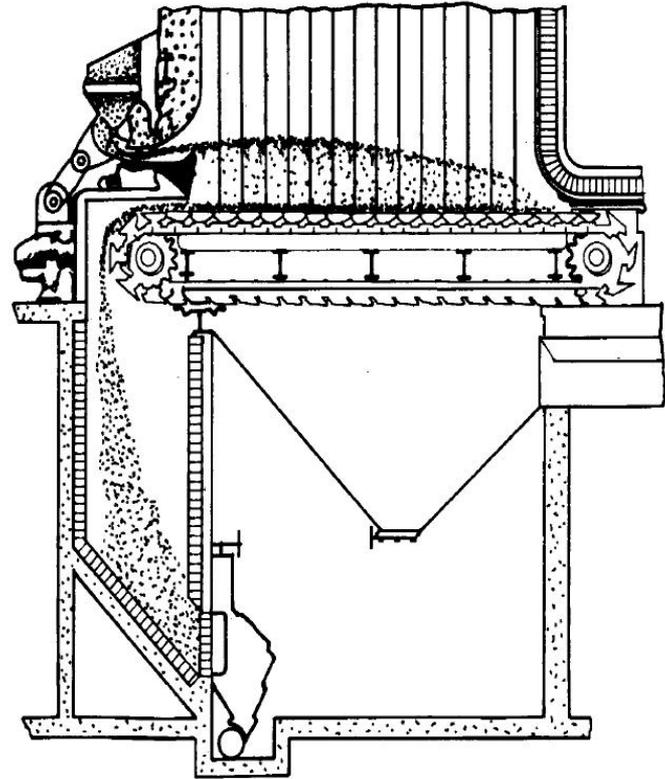
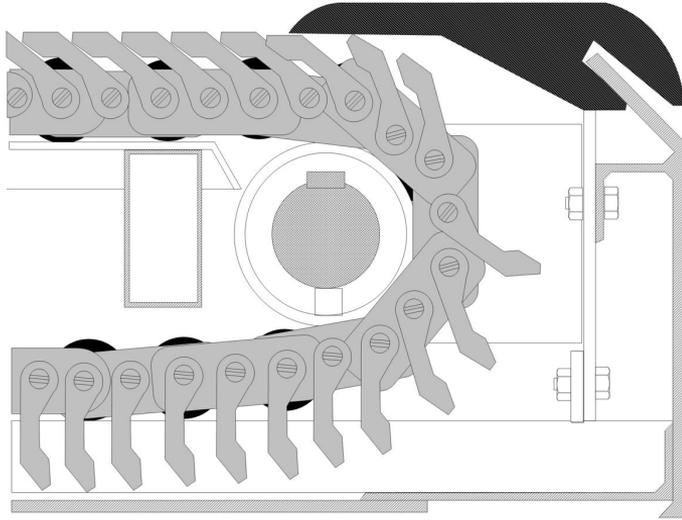


Parrilla basculante

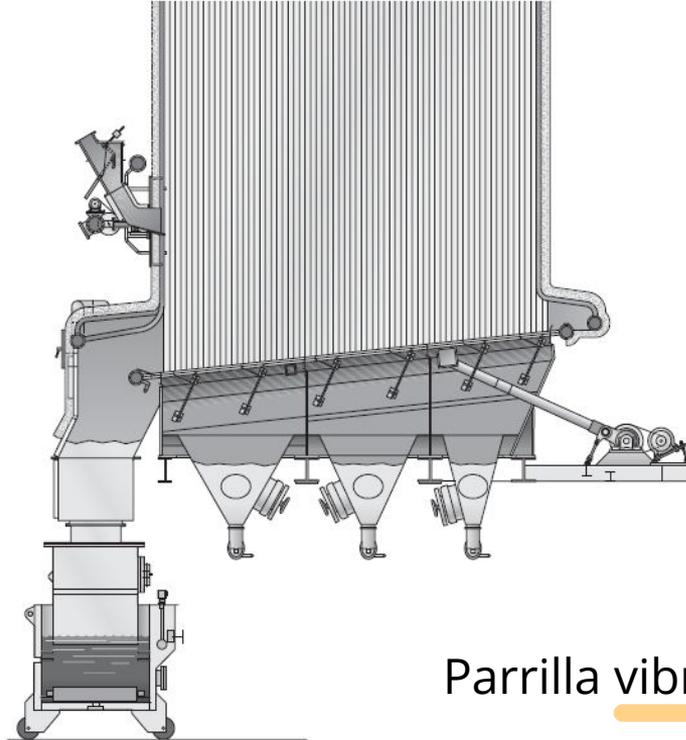


# Lecho fijo. Tipos de parrillas

Parrilla rotativa



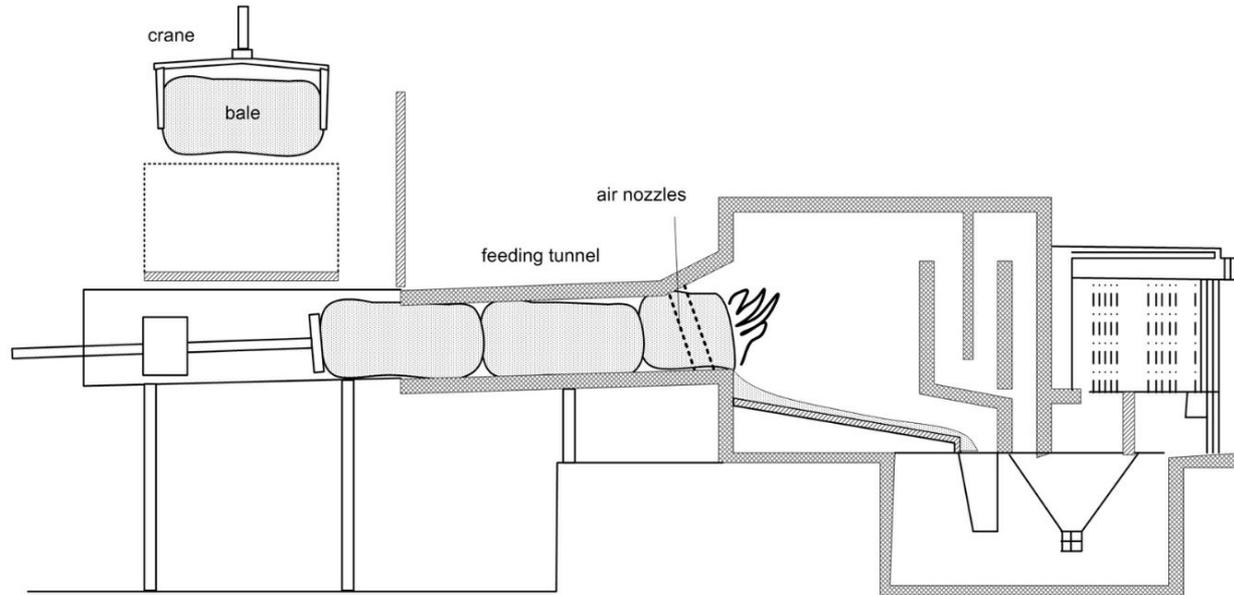
# Lecho fijo. Tipos de parrillas



Parrilla vibrante

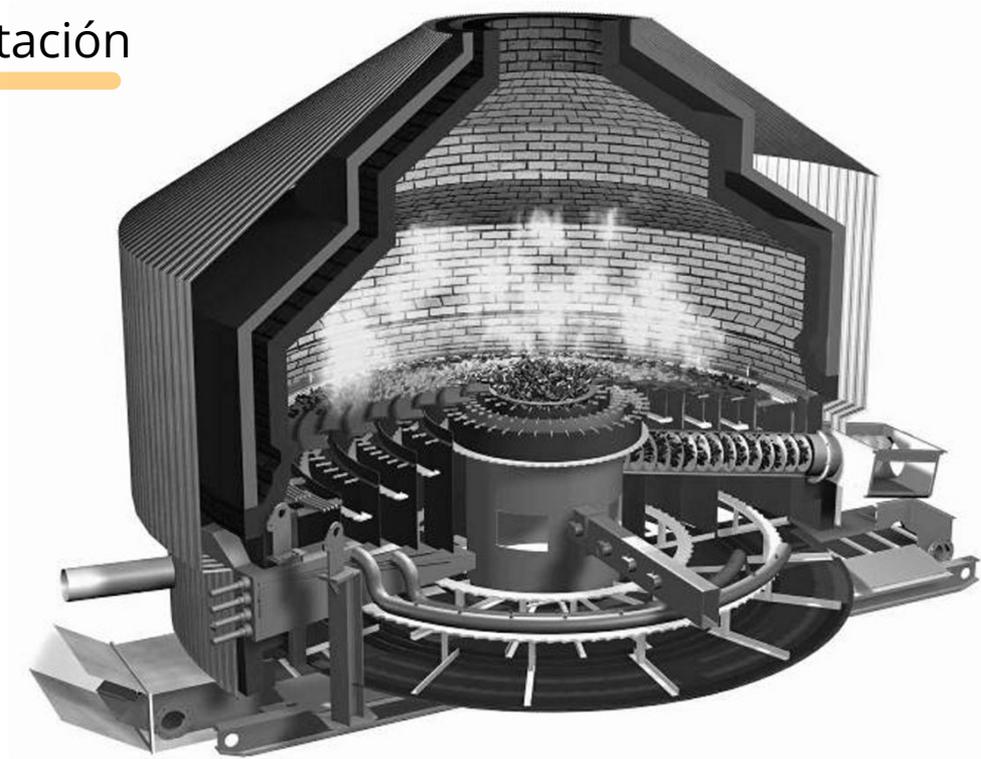
# Lecho fijo. Tipos de parrillas

Quemador tipo cigarro

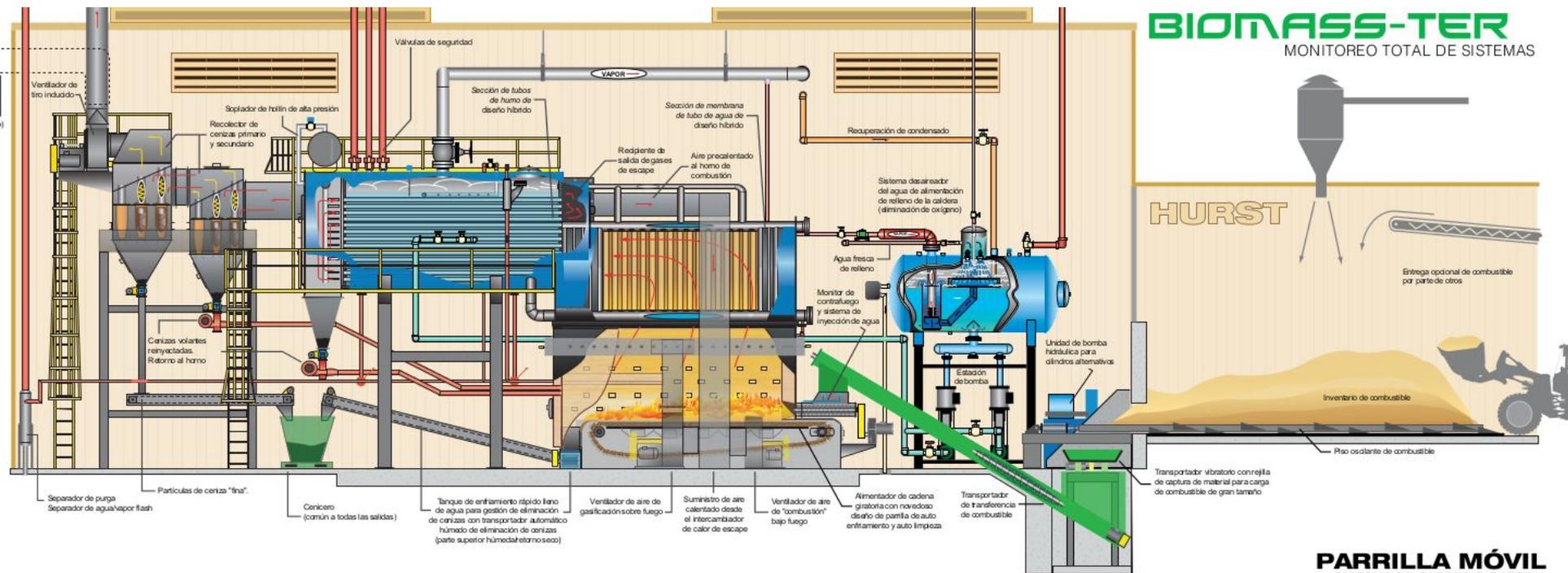


# Lecho fijo. Tipos de parrillas

Parrilla de alimentación  
inferior



# Lecho fijo



# Lecho fijo

Fotos y videos

<https://www.youtube.com/watch?v=1NXFQZ-FjqY>

# Quema en suspensión

Combustible de **tamaño y densidad** que permitan que una **corriente de aire** los **mantenga en suspensión** con velocidades razonables.

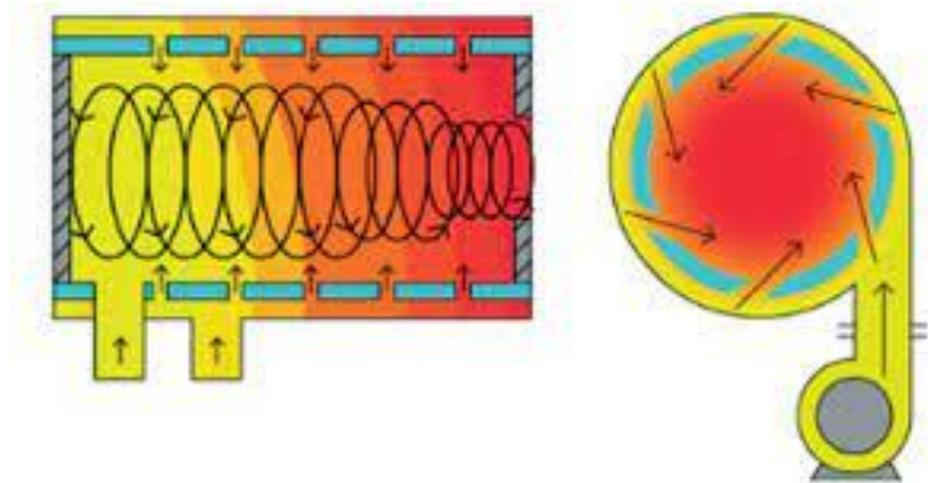
Por ejemplo: aserrín, polvo, cáscara de arroz

# Quema en suspensión

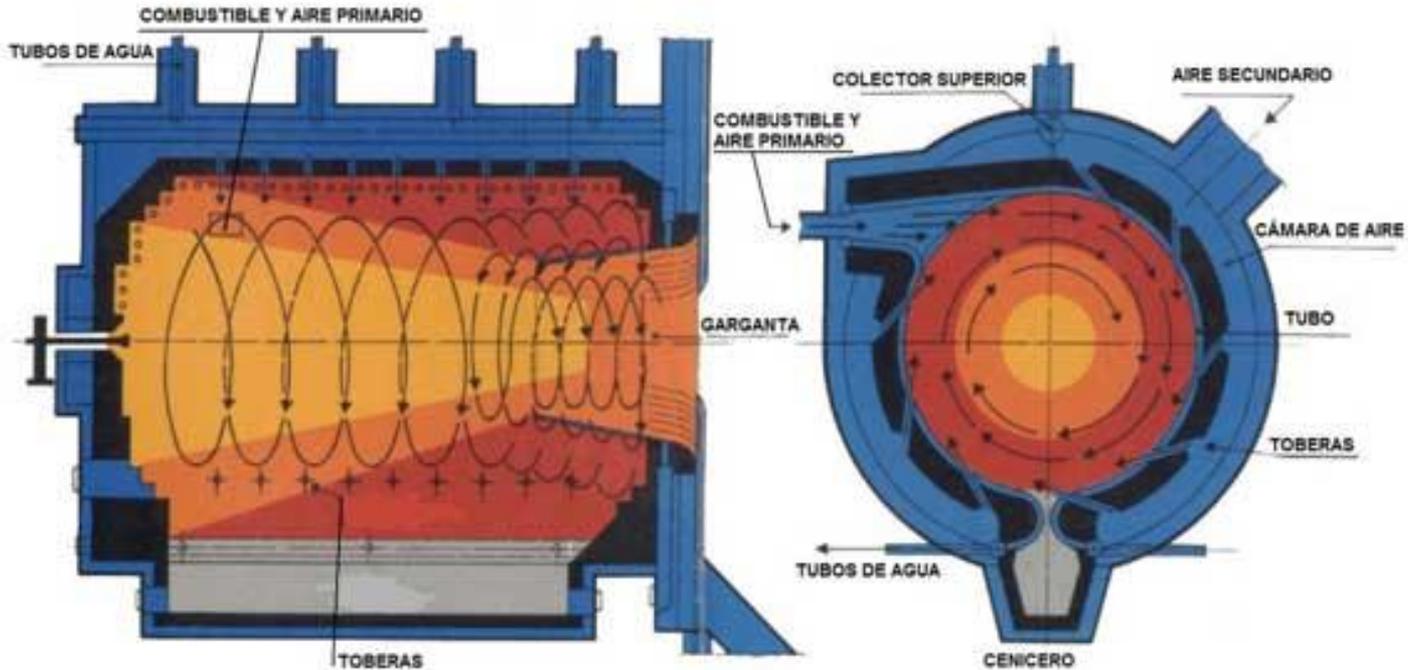
Combustible de **tamaño y densidad** que permitan que una **corriente de aire** los **mantenga en suspensión** con velocidades razonables.

Por ejemplo: aserrín, polvo, cáscara de arroz

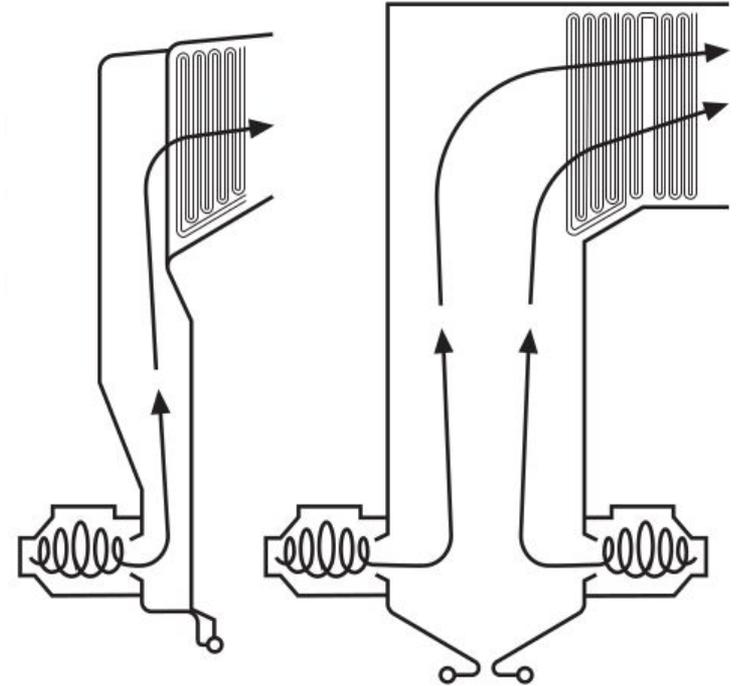
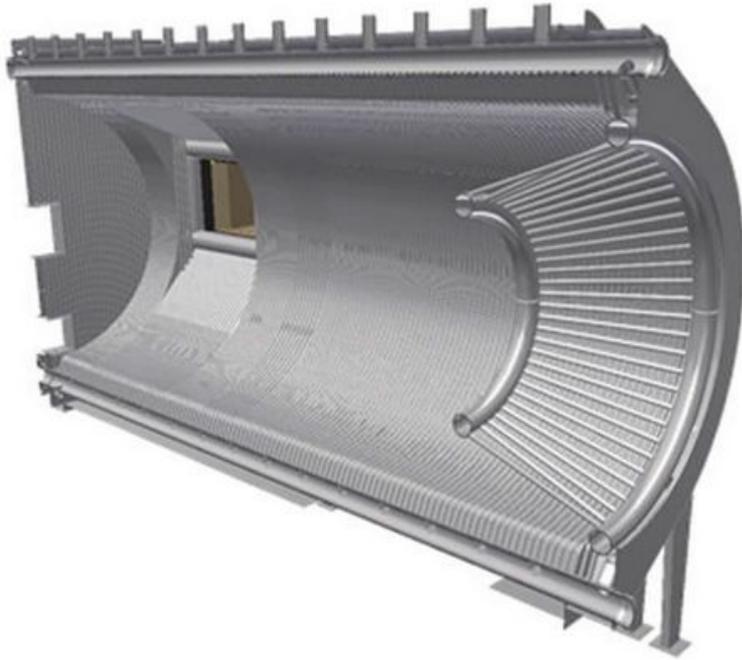
Cámara Torsional



# Quema en suspensión

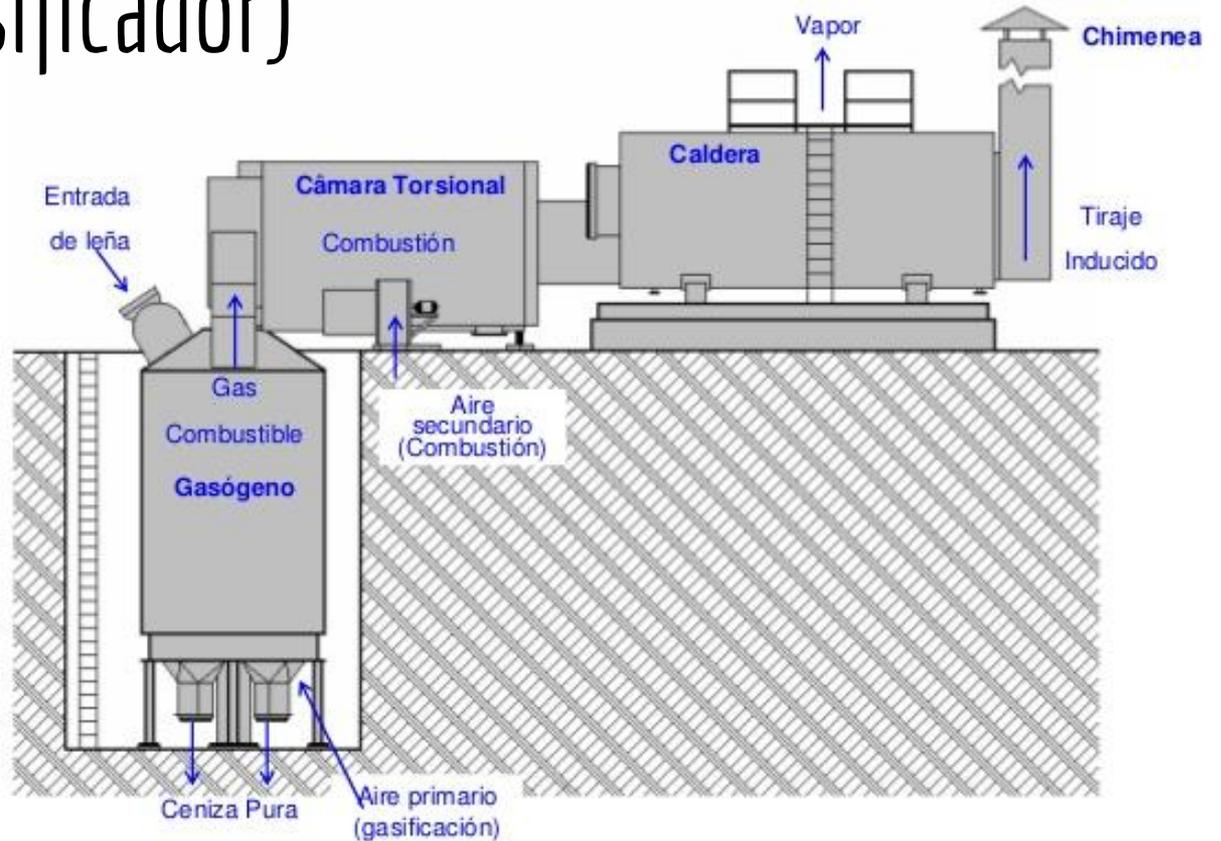


# Quema en suspensión



# Gasógeno (o gasificador)

Objetivo: Producir **gas de síntesis** ( $\text{CO} + \text{H}_2$ )



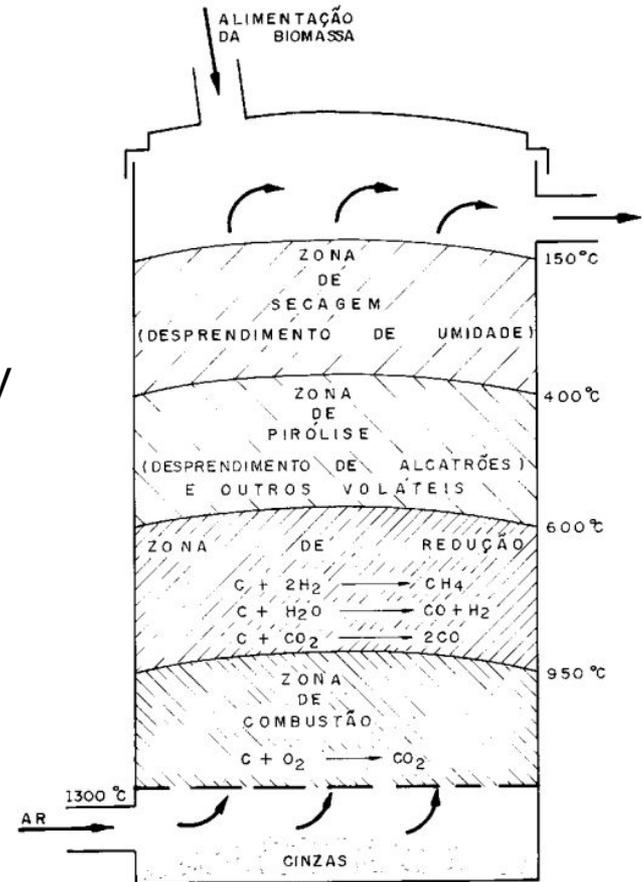
# Gasógenos

**Exceso** de aire **negativo**: -40% aprox.

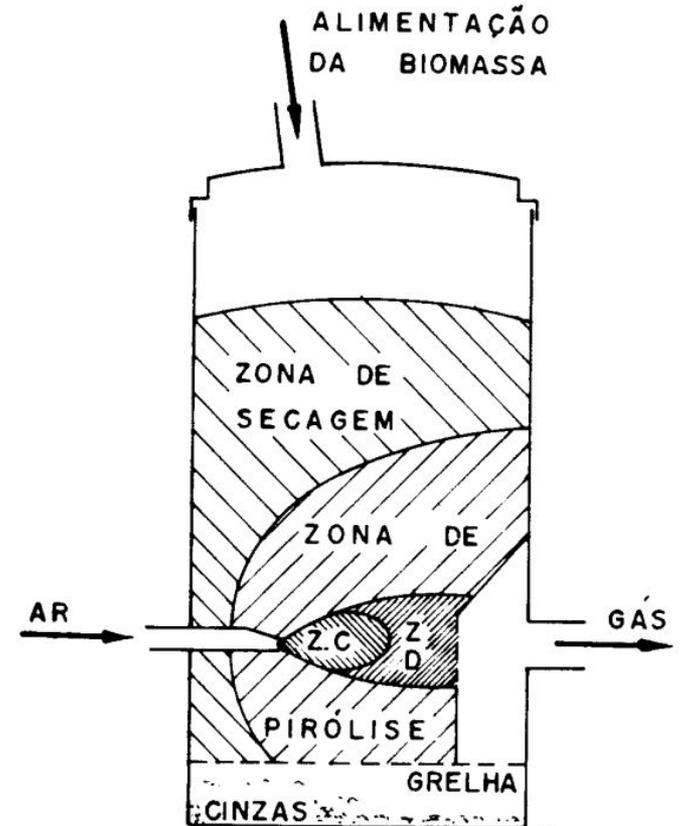
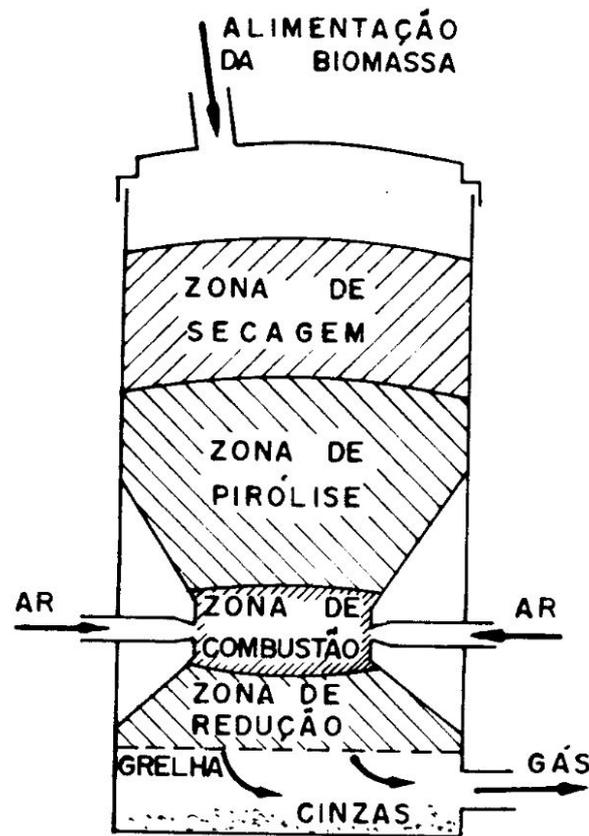
Camino de la partícula: **Secado**, **pirólisis**,  
**reducción** de MC y **combustión** de la MC

Tipo **contracorriente** es el más usual en Uruguay

Para otras aplicaciones puede ser más  
conveniente otro tipo (**concorriente o cruzado**)

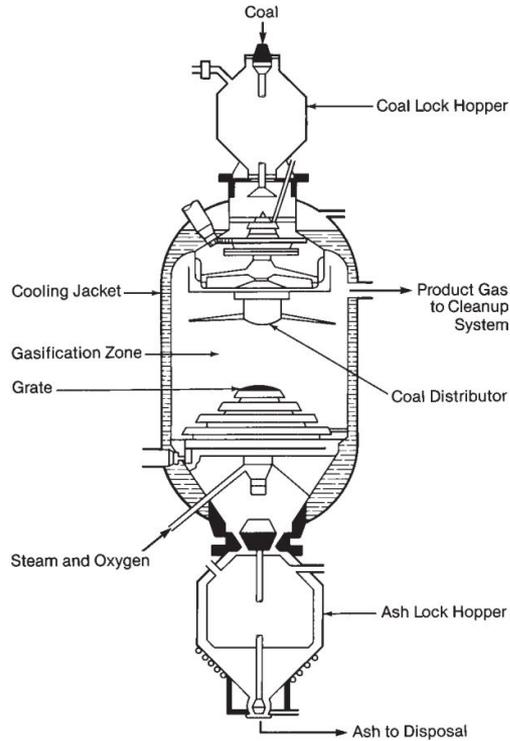


# Gasógenos

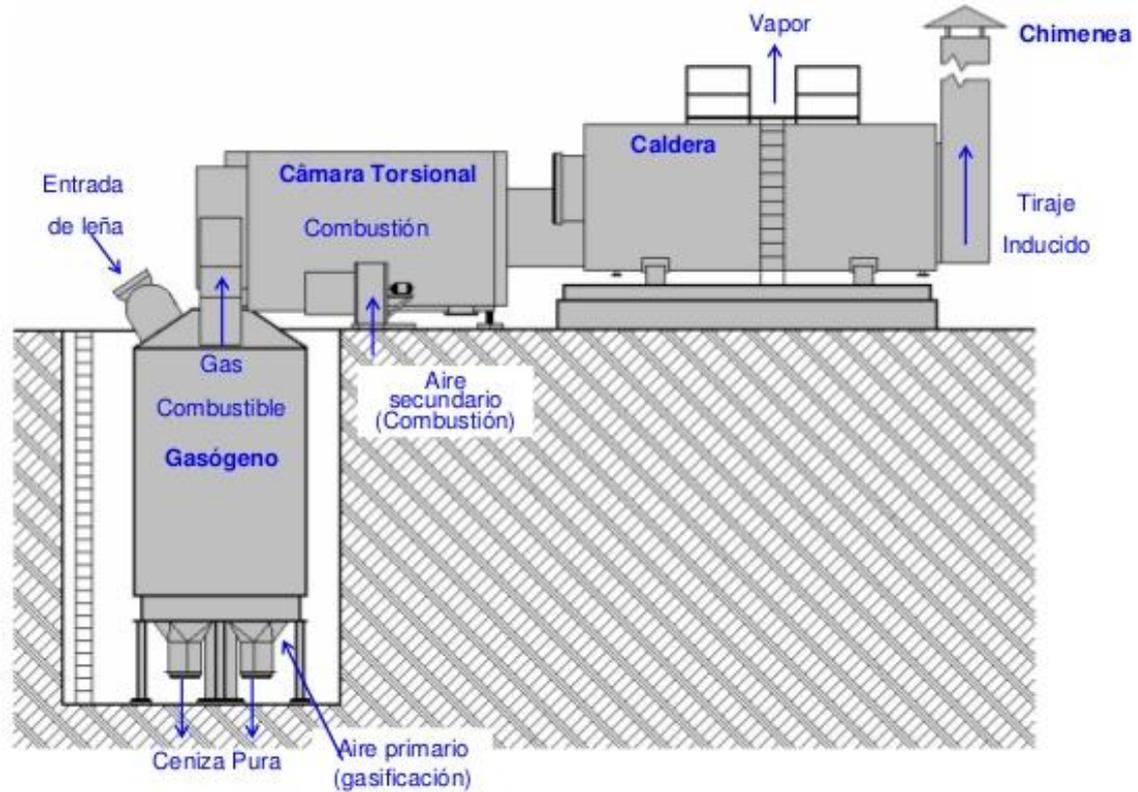


ZC = ZONA DE COMBUSTÃO  
ZD = ZONA DE REDUÇÃO

# Gasógeno contracorriente



# Gasógeno + CT + GV



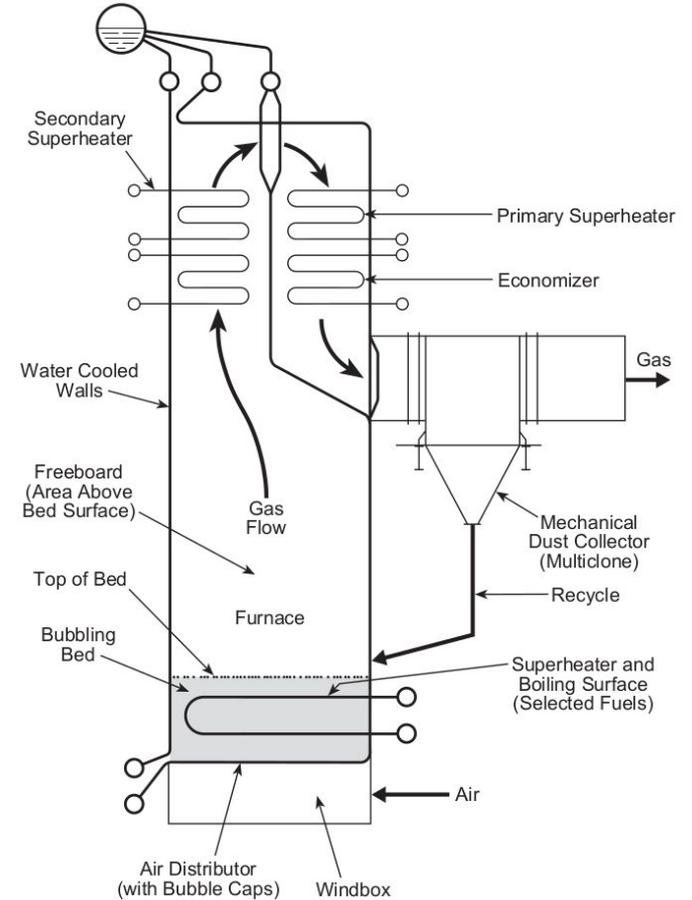
# Gasógeno + CT + GV

Video de Berkes

[https://www.youtube.com/watch?v=\\_TiD4z4moIM](https://www.youtube.com/watch?v=_TiD4z4moIM)

# Lecho fluidizado

1. Fenómeno de fluidización
2. Componentes principales de un sistema fluidizado
3. Ventajas y desventajas del lecho fluidizado
4. Aplicaciones industriales



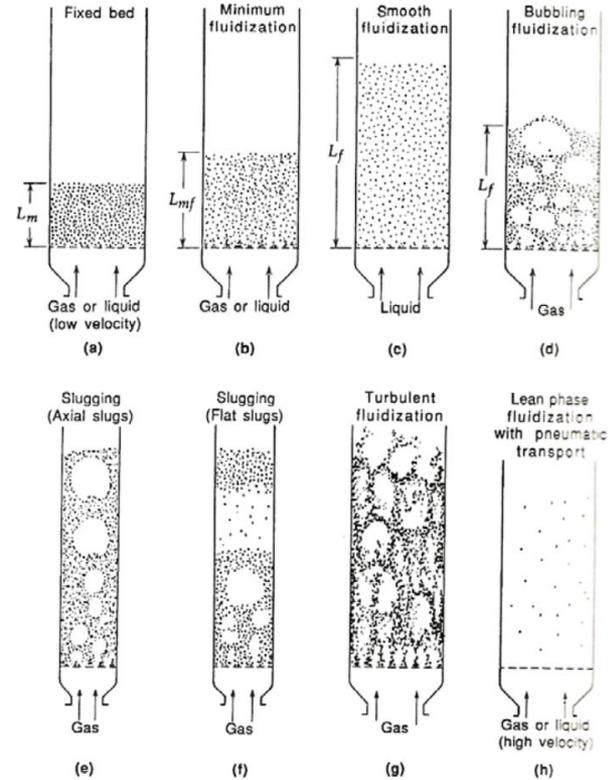
# 1. Fenómeno de la fluidización

La **fluidización** es un proceso por el cual una **corriente ascendente de fluido** (líquido, gas o ambos) se utiliza para **suspender partículas sólidas**. Desde un punto de vista macroscópico, la **fase sólida** (o fase dispersa) **se comporta como un fluido**, de ahí el origen del término fluidización.

- La **velocidad del fluido** debe ser lo suficientemente **alta** como para **suspender las partículas**, pero a la vez no tan elevada como para expulsar las partículas fuera del recipiente.
- Las partículas sólidas rotan en el lecho rápidamente, creándose un **excelente mezclado**.
- El **material que se fluidiza** es un **sólido** y el medio que fluidiza puede ser tanto líquido como **gas**.
- Las características y comportamiento de los lechos fluidizados dependen de las **propiedades del sólido y del fluido**.

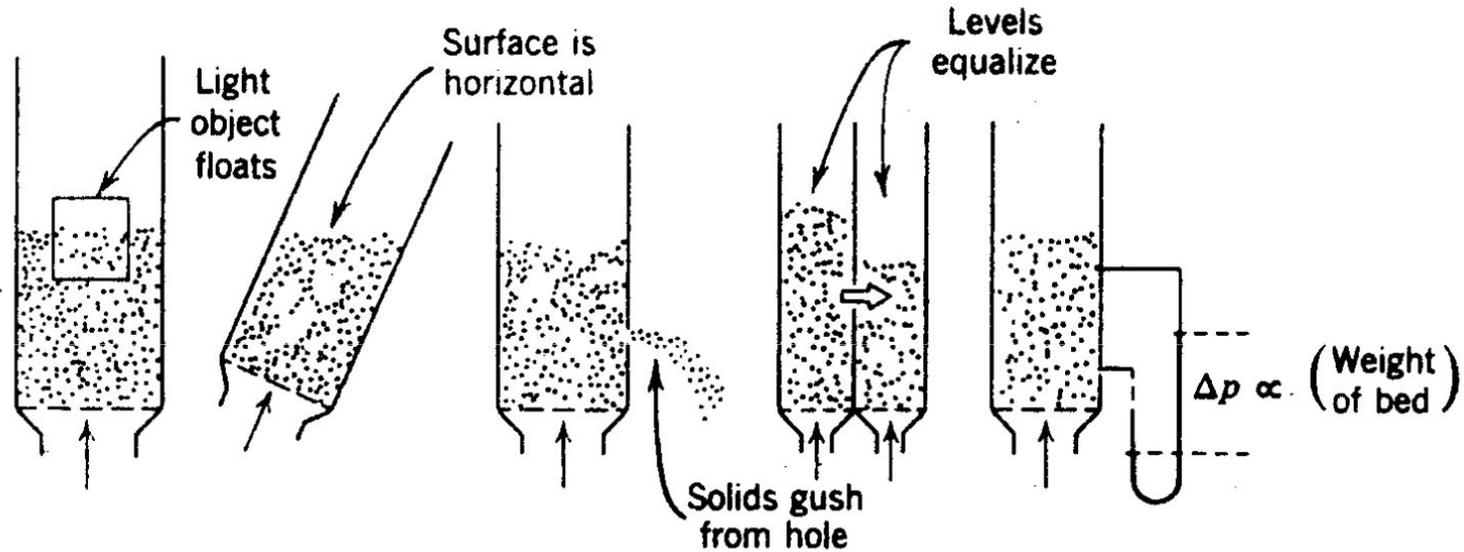
# 1. Fenómeno de la fluidización

- A. Lecho fijo
- B. Fluidización mínima (incipiente)
- C. Fluidización homogénea
- D. Lecho fluidizado burbujeante
- E. Slugging
- F. Lecho pistoneado
- G. Lecho fluidizado turbulento
- H. Transporte neumático



# 1. Fenómeno de la fluidización

Comportamiento similar a un fluido



## 2. Componentes principales del sistema

1. Columna
2. Distribuidor de gas
3. Soplador
4. Ciclón
5. Alimentador de material sólido

# 3. Ventajas del lecho fluidizado

- Elevado coeficiente de **transferencia de calor y masa** (gas-sólido y lecho-superficies inmersas)
- Elevada **superficie de contacto** sólido-gas (Ej: 1 m<sup>3</sup> de partículas de 100 micras tiene un área superficial de 30.000 m<sup>2</sup>)
- Equipos **compactos**
- **Mejor distribución** de las partículas
- Mayor **homogeneización** del lecho (uniformidad axial de temperatura y composición)
- Sólidos presentan comportamiento similar a un fluido

# 3. Desventajas del lecho fluidizado

- **Erosión** de las paredes y los tubos con contacto con el lecho
- Generación de **partículas finas** debido al rozamiento
- **Arrastre de partículas** en la corriente de gas
- **Tiempo de residencia** de las partículas **no uniforme**
- Ciencia empírica, dificultad en la elección de correlaciones

# 4. Aplicaciones industriales

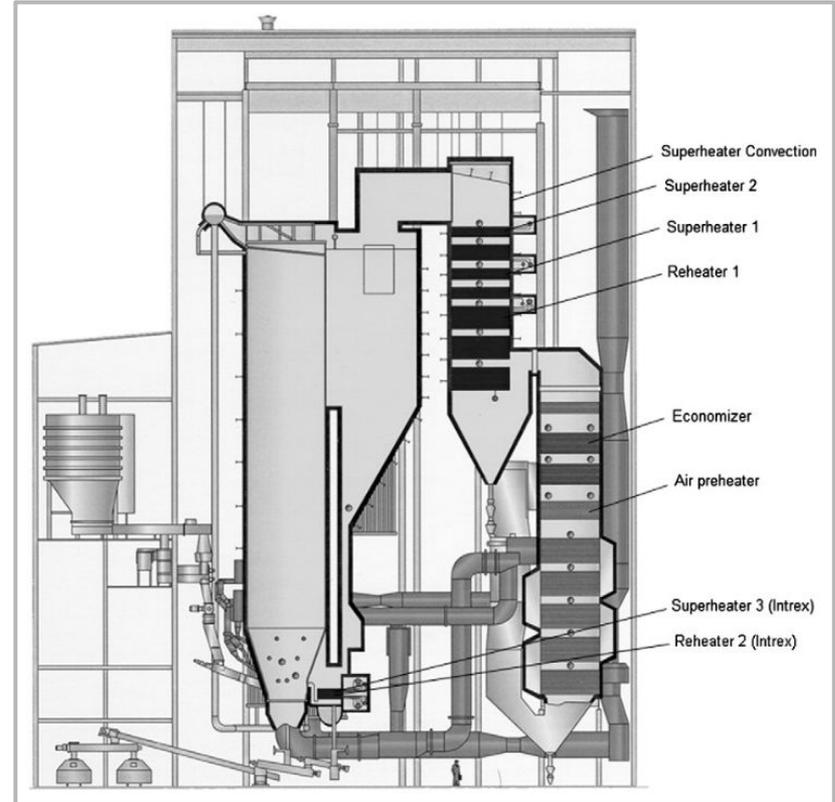
## Montes del Plata

- Lecho de arena
- Combustible: corteza, finos (residuo del chipeo) y lodo primario (efluente)
- Producción de vapor: 65ton/h a 95bar y 455°C

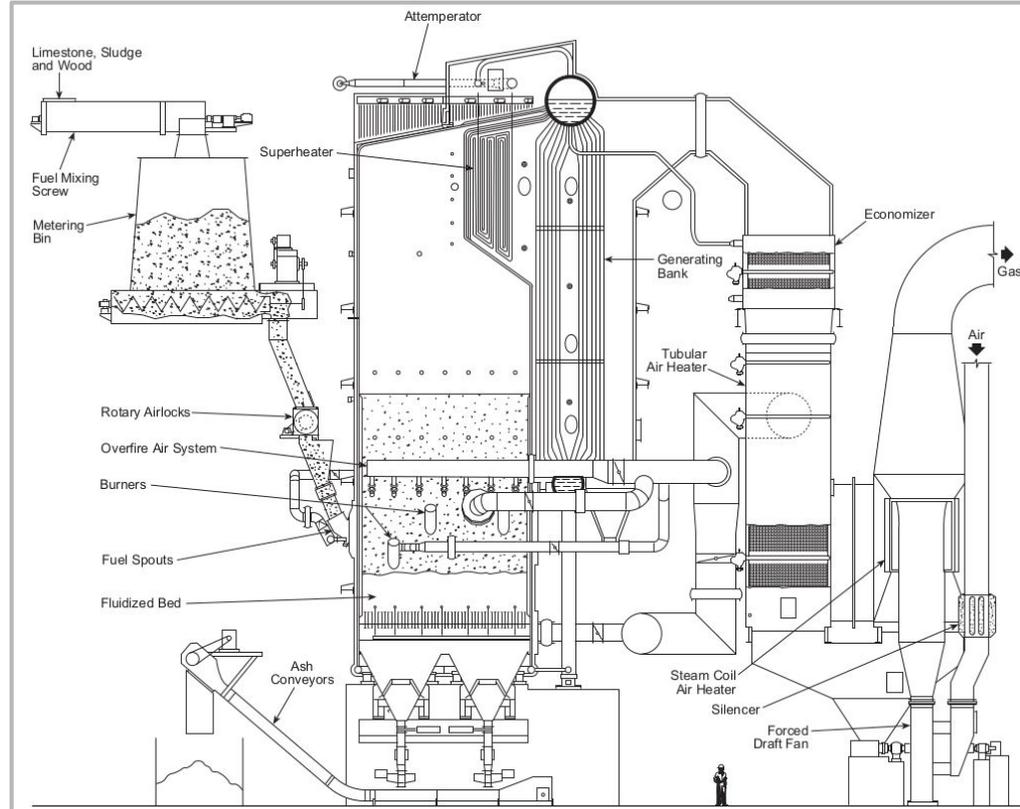


# 4. Aplicaciones industriales

Generador de vapor de **lecho fluidizado circulante** alimentado con biomasa

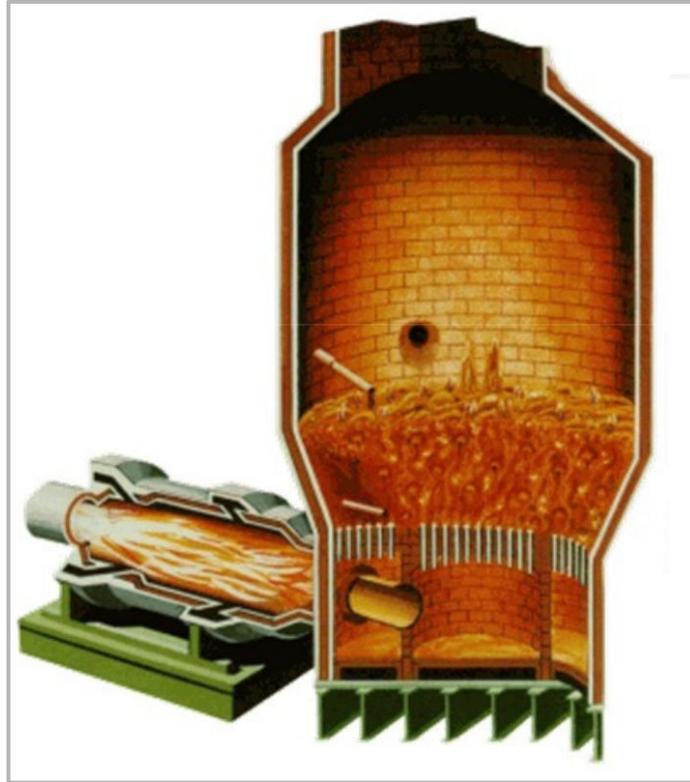


# 4. Aplicaciones industriales



# 4. Aplicaciones industriales

Incineración de sólidos



# Cenizas



# Cenizas

Las cenizas son el **residuo inorgánico** que resulta de la **combustión completa** de la biomasa.

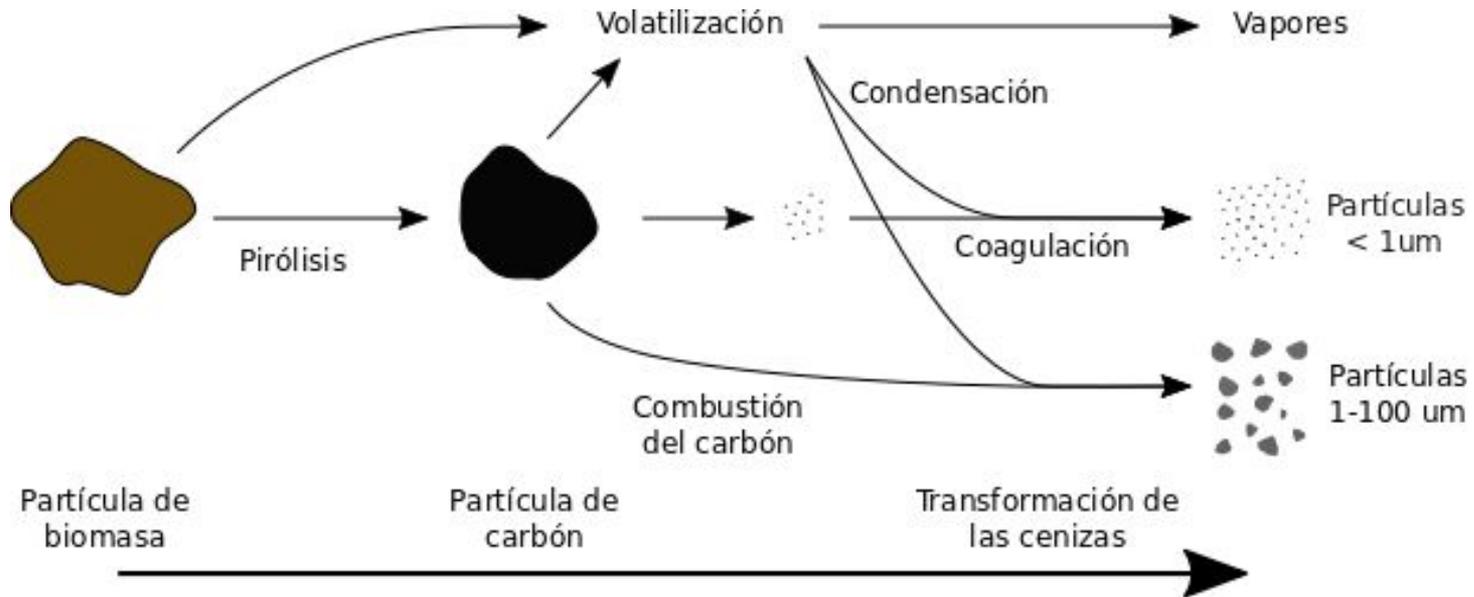
Principales problemas que generan las cenizas:

- Depositiones (fouling y slagging) genera resistencia térmica
- Aglomerados
- Corrosión
- Erosión
- Emisiones contaminantes (*fly ash*)



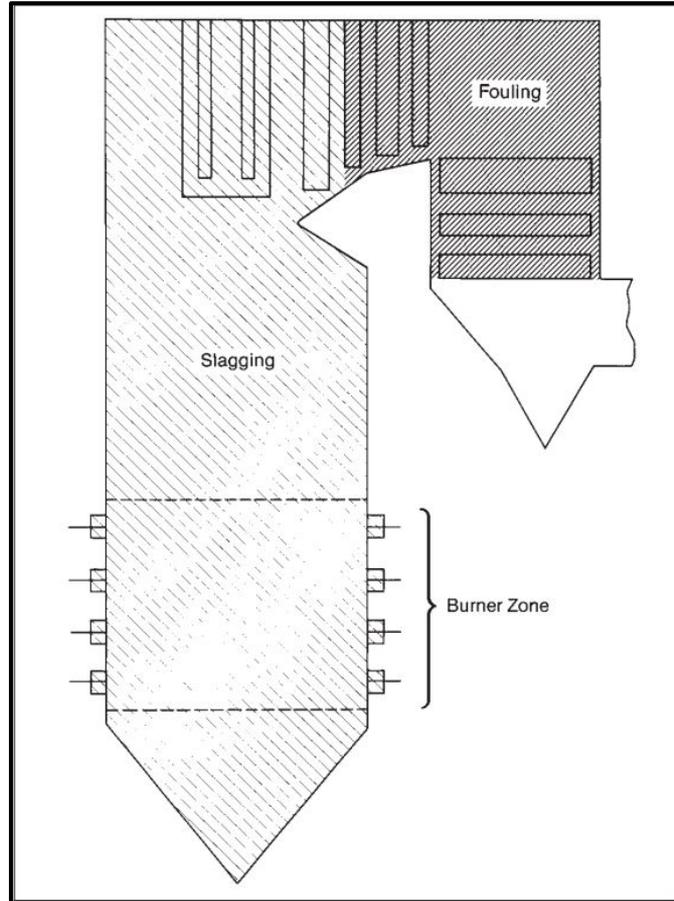
# Cenizas

Formación y transformación de las cenizas durante la combustión

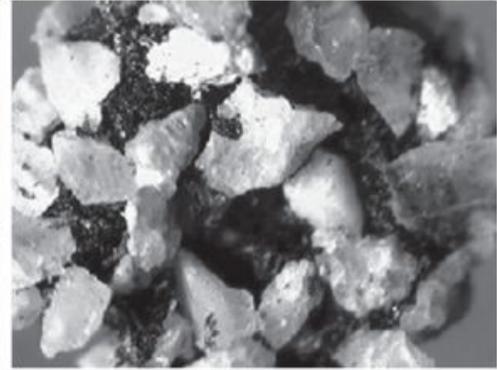
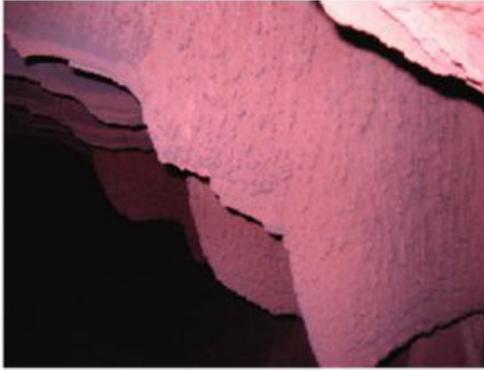


# Cenizas

## Fouling & Slagging

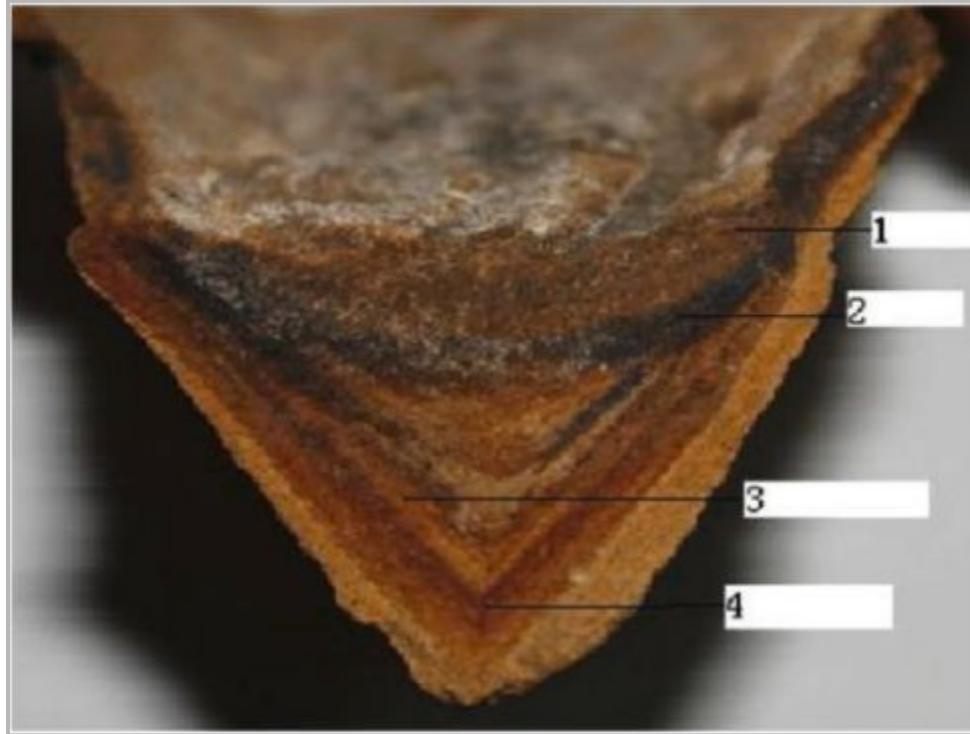


# Cenizas

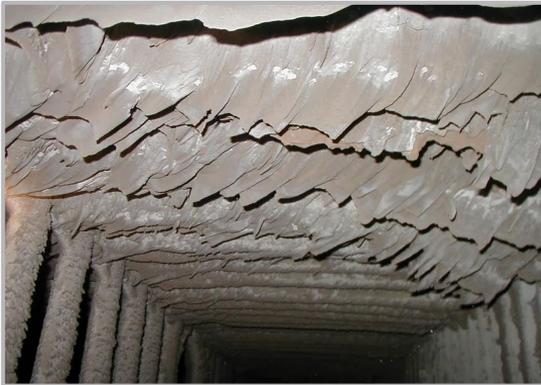
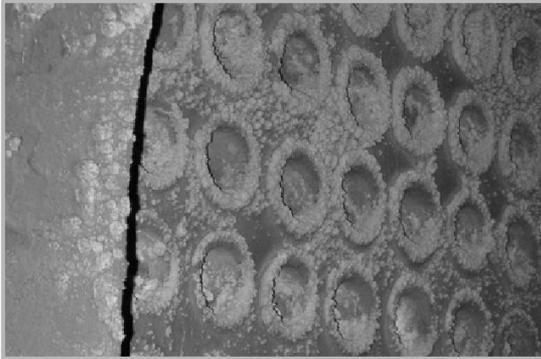


# Cenizas

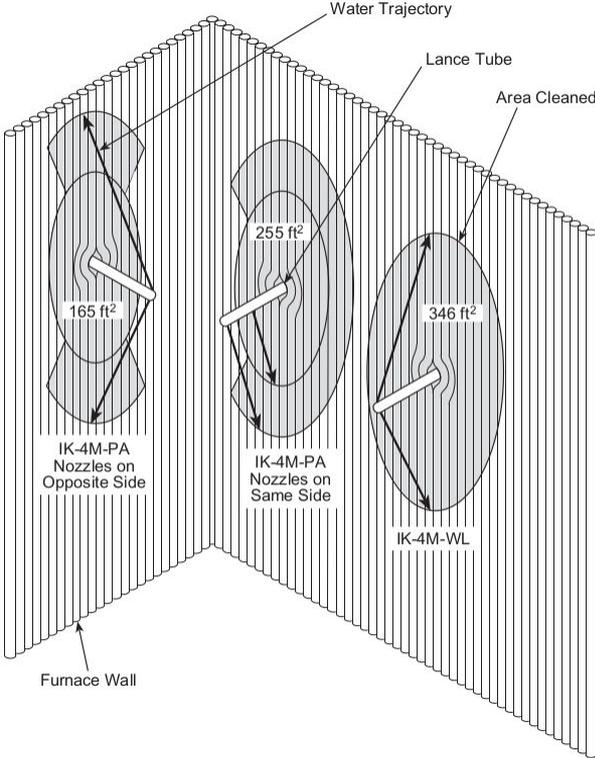
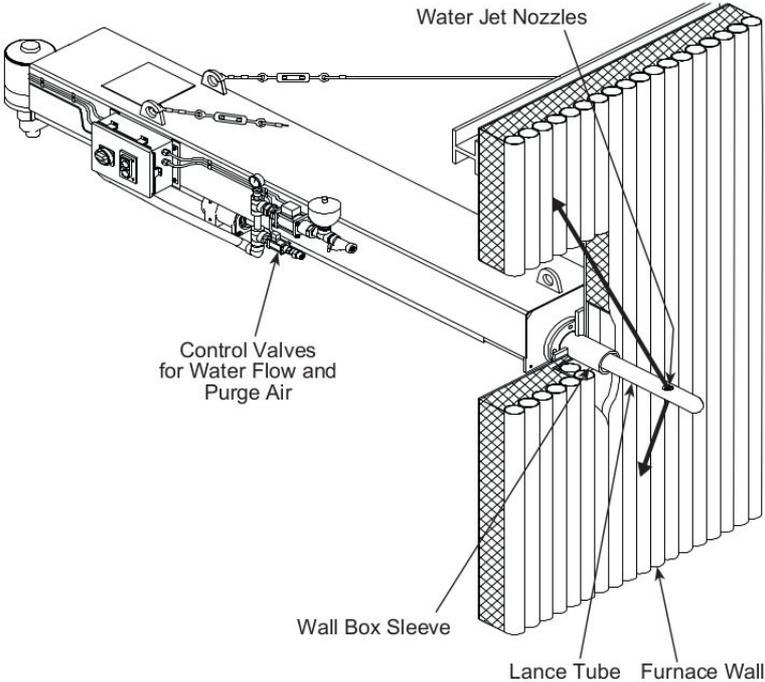
Slagging



# Cenizas



# Cenizas



# Cenizas

Cepillado y aspirado

