

6 - Sistemas de combustión

Docente(s) | Montevideo, Uruguay



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



UCU

Universidad
Católica del
Uruguay

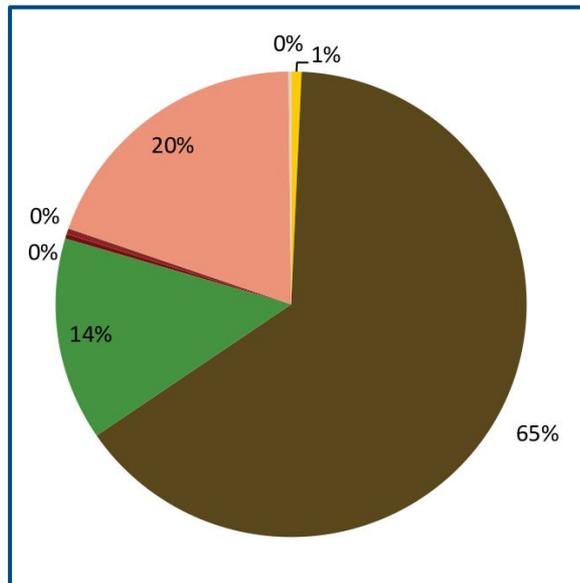
Contenido

1. **Combustibles** utilizados en generadores de vapor
2. Combustibles **sólidos**: Características de los combustibles, su combustión y los sistemas de combustión
3. Combustibles **líquidos**: Características, quemadores y requerimientos de la instalación
4. Combustibles **gaseosos**: Características, quemadores y requerimientos de la instalación
5. Protocolo de combustión y emisiones ambientales

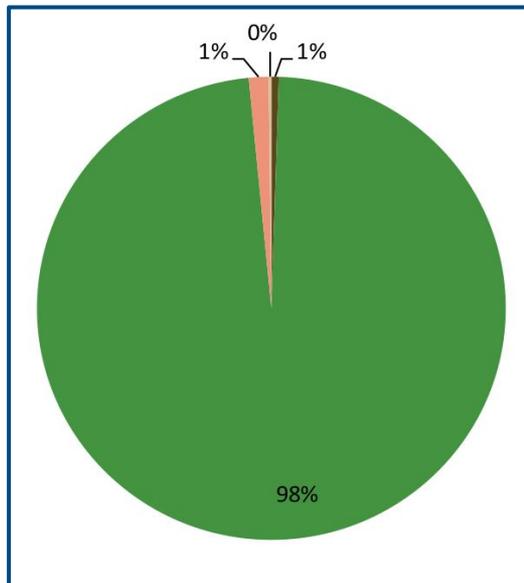
1. Combustibles

Los principales combustibles que se utilizan para generar ese vapor son: **Licor negro, Leña (o chip), Fuel-oil, Residuos de biomasa** (otros).

Generación de vapor por fuente



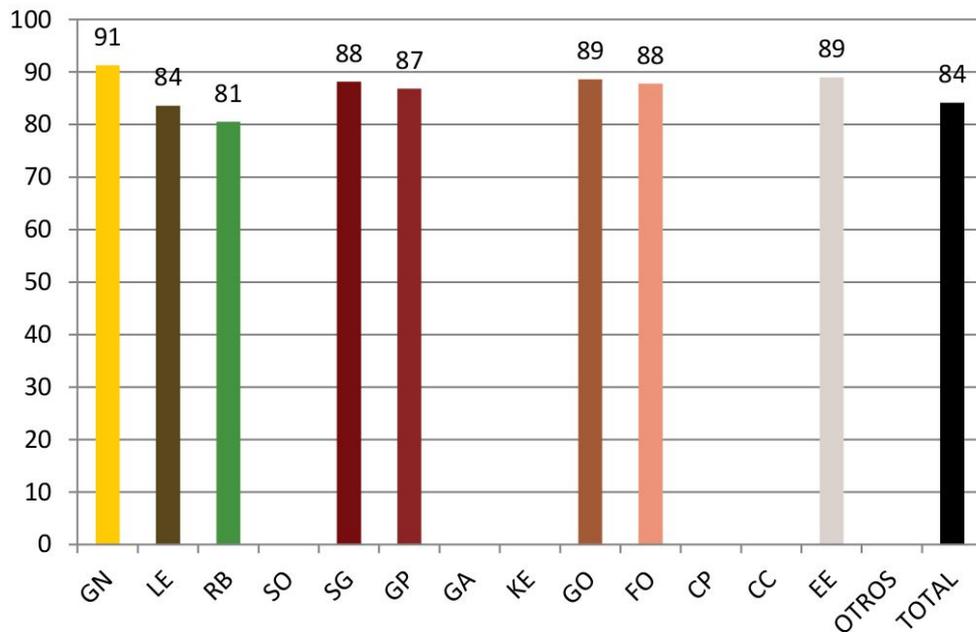
Co-Generación de vapor por fuente



Fuente: BNEU 2016 - DNE

1. Combustibles

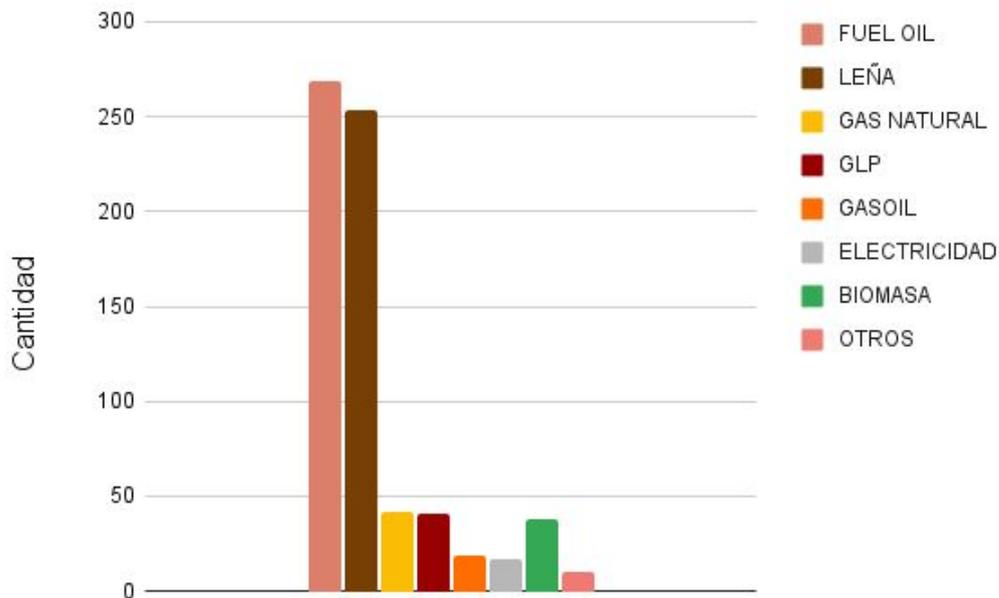
Rendimientos en la generación de vapor (PCI)



Fuente: BNEU 2016 - DNE

1. Combustibles

Cantidad de GV habilitados según el combustible



Fuente: URSEA

2. Combustibles sólidos

- 1.1. Características como combustible
- 1.2. Combustión de biomásas
- 1.3. Sistemas de combustión
- 1.4. Cenizas



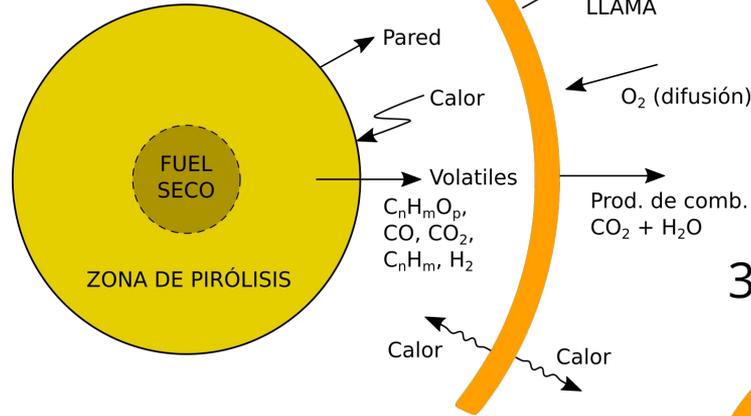
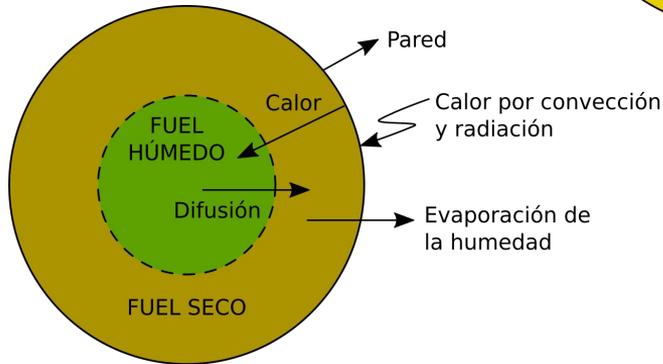
1.1. Características como combustible

	Composición última										
	Humedad	Temperatura de entrada	Poder Calorífico Inferior	Poder Calorífico Superior	C	H	O	N	S	Ash	H2O _f
	(%BH)	°C	kcal/kg	kcal/kg	%m						
Cáscara de Arroz	8.6		2014	3290	35.5	4.34	32.5	0.48	0.05	18.5	8.6
Rolos de Madera	16.5	10	3538	3868	50.3	5.3	44.2	0.1	0	0.31	0

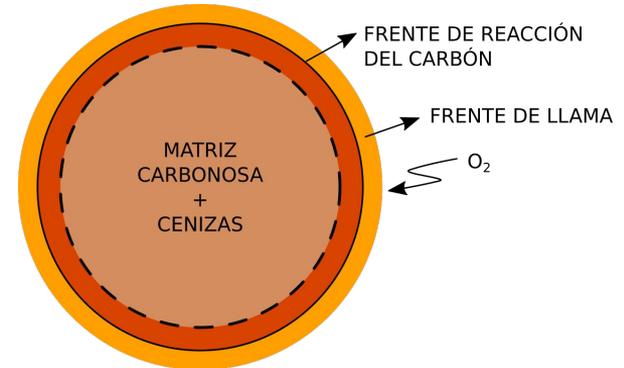
1.2. Combustión de biomásas

2. Pirólisis + comb. MV

1. Secado

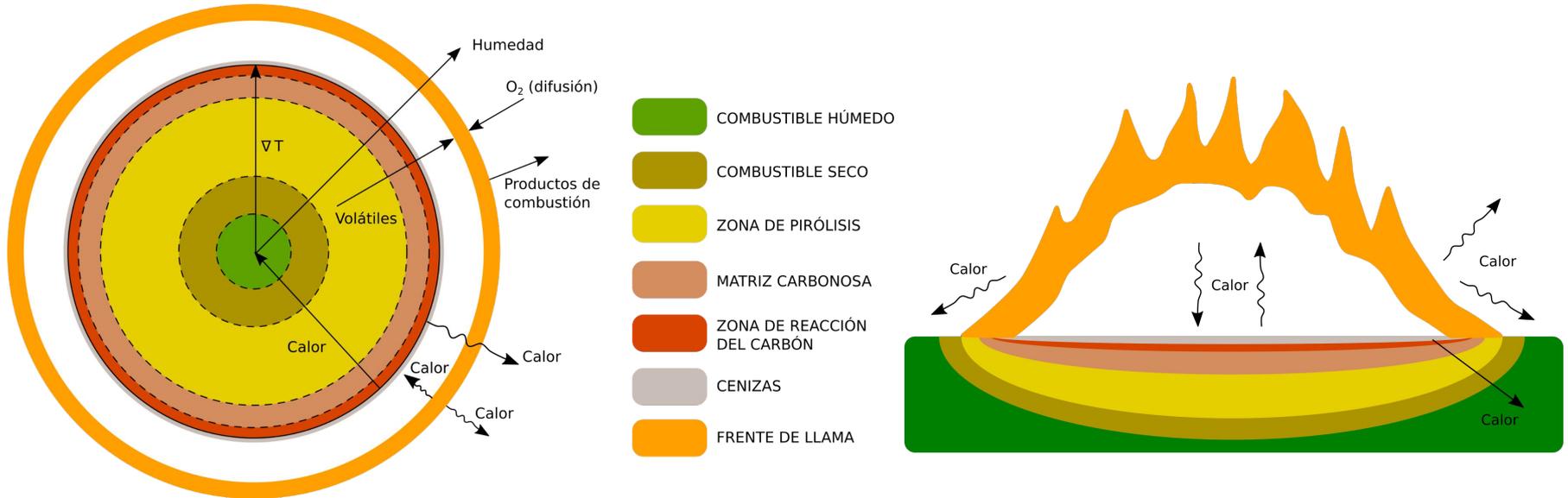


3. Combustión de MC



1.2. Combustión de biomásas

Etapas en simultáneo



1.2. Combustión de biomásas

Dificultades que implica quemar un sólido:

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

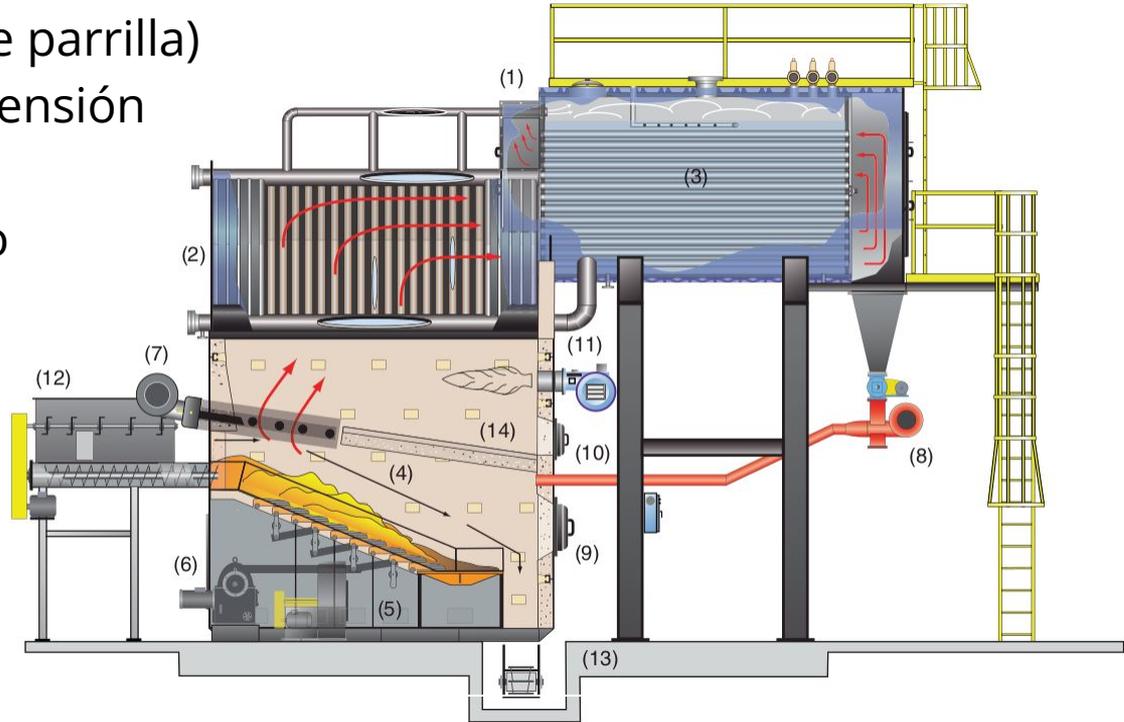
Esto debe ser tenido en cuenta en el diseño de la parrilla y el hogar

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

- Turbulencia
- Tiempo de residencia

1.3. Sistemas de combustión de biomásas

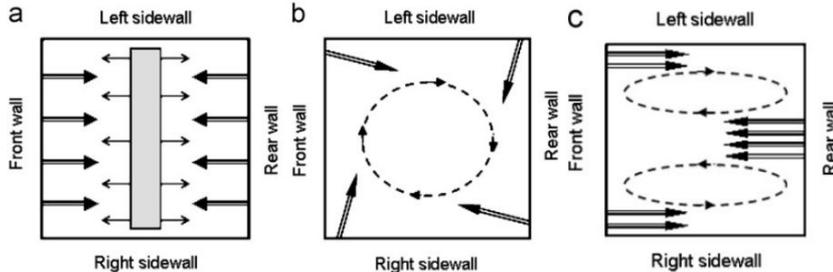
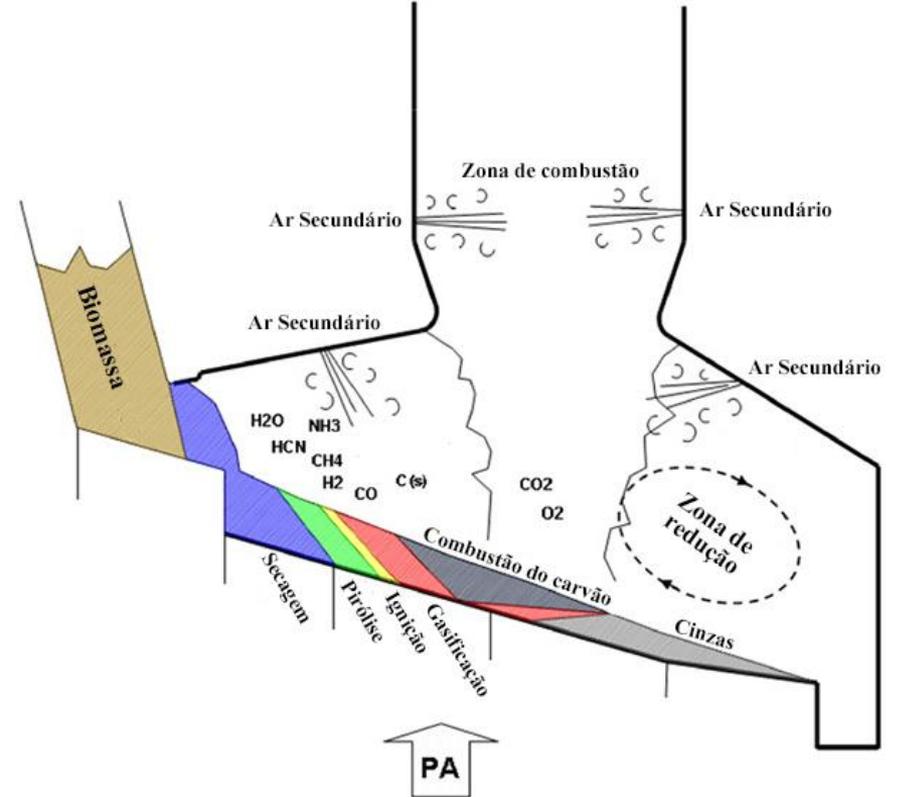
- 1.1.1. Lecho fijo (sobre parrilla)
- 1.1.2. Quema en suspensión
- 1.1.3. Gasógeno + CC
- 1.1.4. Lecho fluidizado



1.1.1. Lecho fijo

Componentes principales:

- Sistema de alimentación
- Parrilla
- Entradas de aire
- Descarga de cenizas



1.1.1. Lecho fijo

Alimentación:

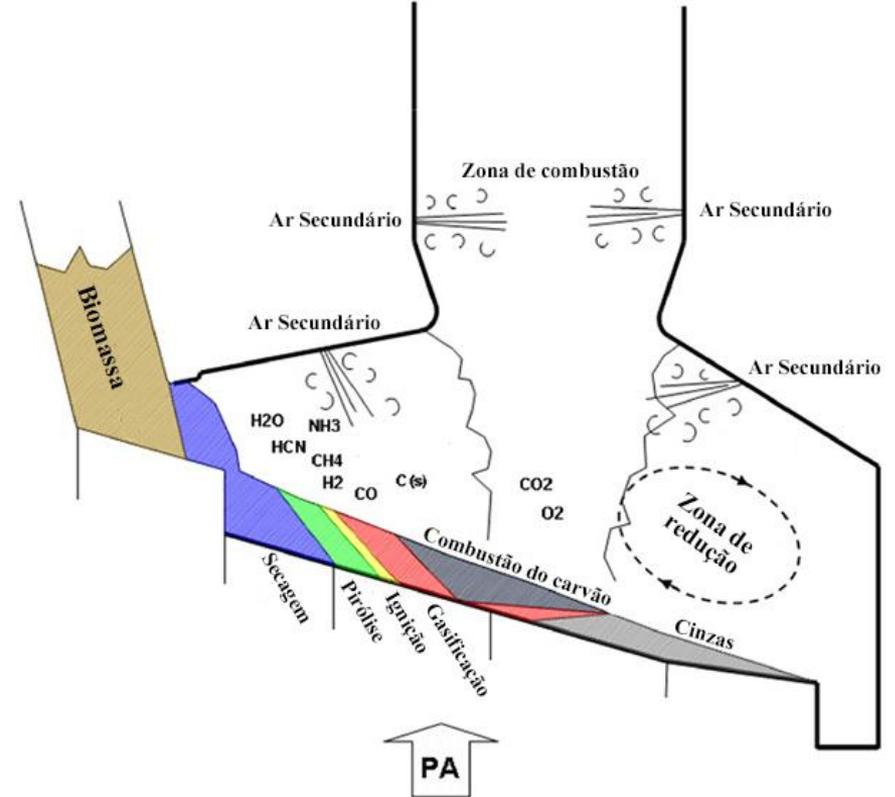
- Continua o discontinua
- Manual o automática

Parrilla:

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

Hogar:

- Seco o refrigerado



1.1.1. Lecho fijo - Alimentación de combustible

Alimentación:

- **Continua** o discontinua
- Manual o **automática**



1.1.1. Lecho fijo - Alimentación de combustible

Alimentación:

- **Continua** o discontinua
- Manual o **automática**



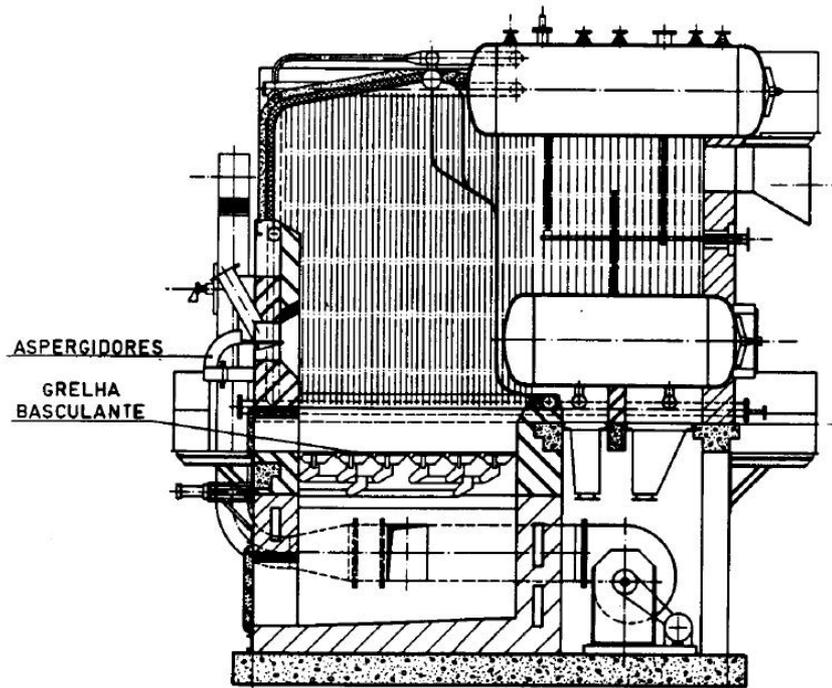
1.1.1. Lecho fijo - Alimentación de combustible

Alimentación:

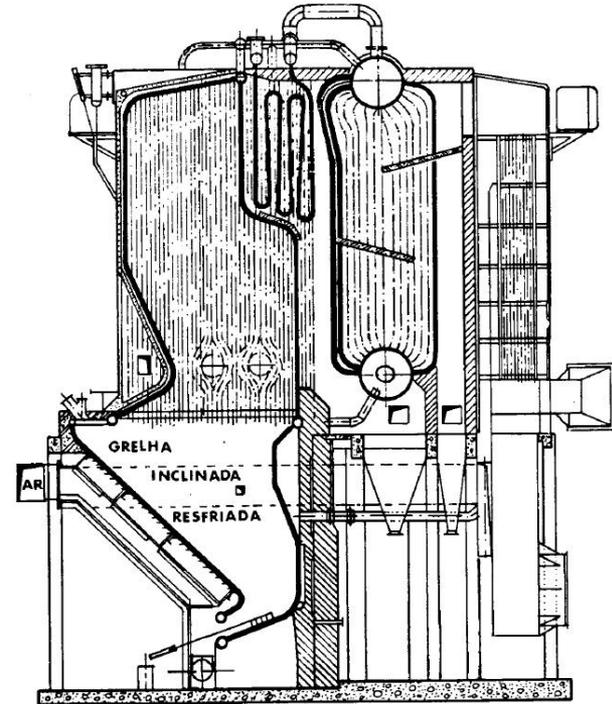
- Continua o **discontinua**
- **Manual** o automática



1.1.1. Lecho fijo - Parrillas

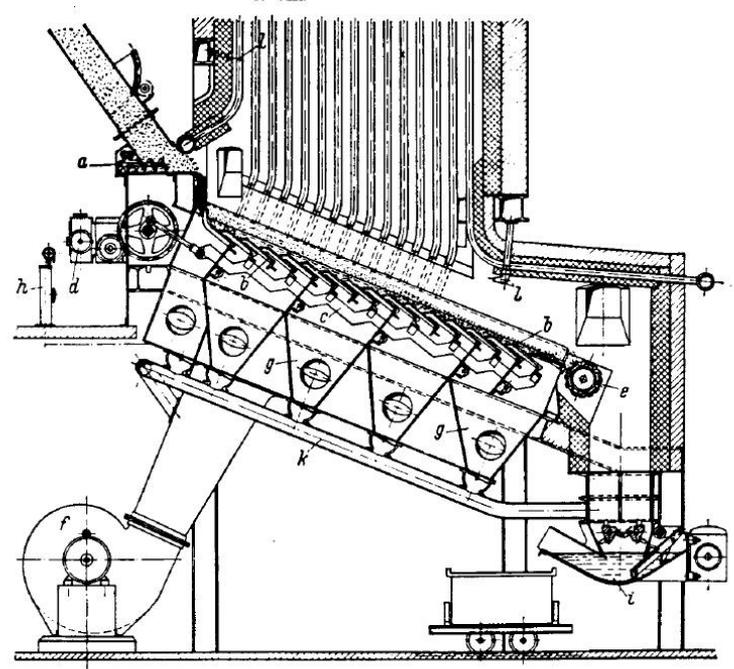
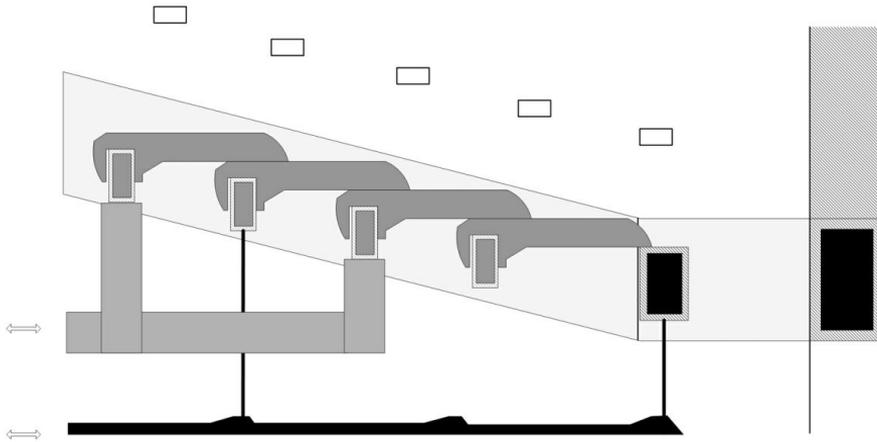


Parrilla basculante



Parrilla inclinada

1.1.1. Lecho fijo - Parrillas



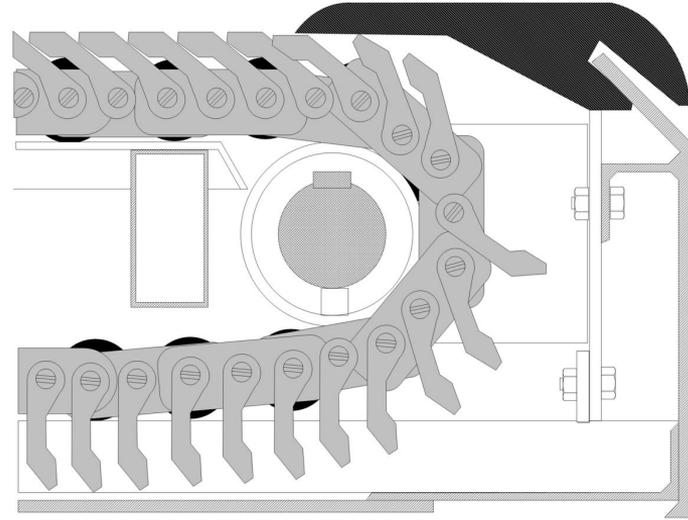
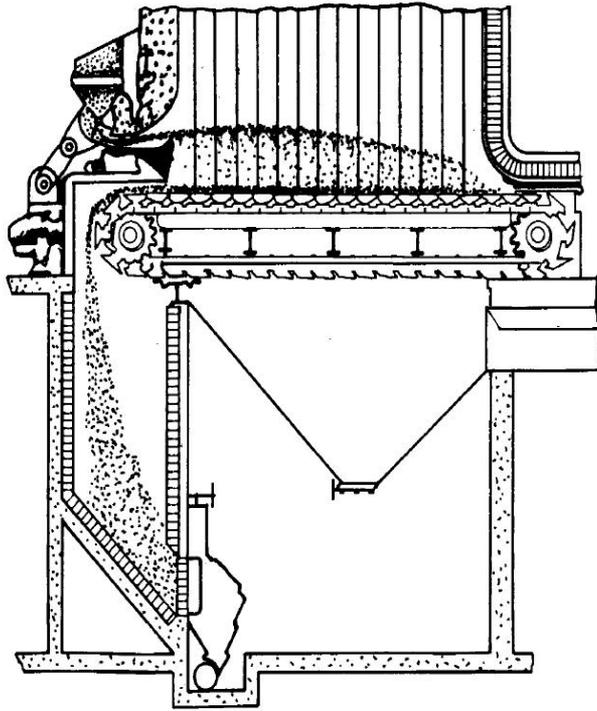
Parrilla reciprocante

1.1.1. Lecho fijo - Parrillas



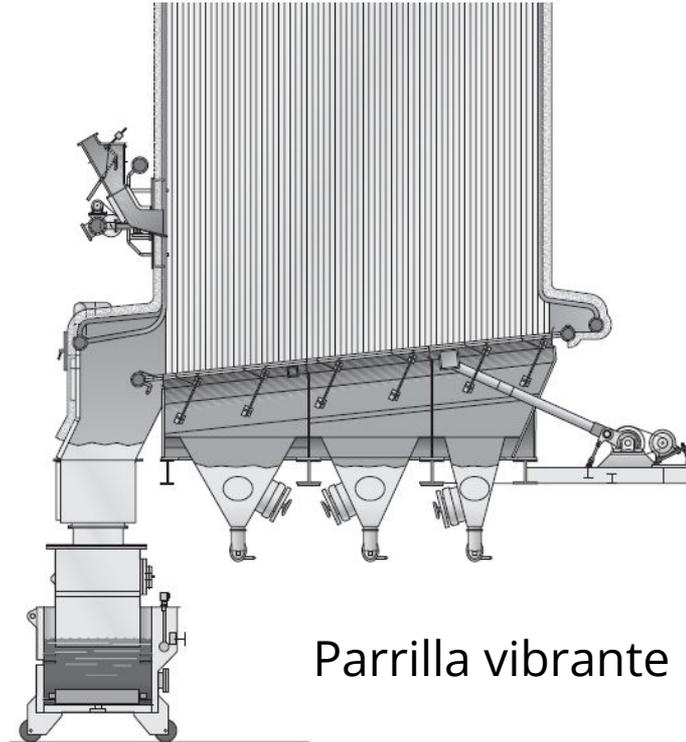
Parrilla reciprocante

1.1.1. Lecho fijo - Parrillas



Parrilla rotativa

1.1.1. Lecho fijo - Parrillas



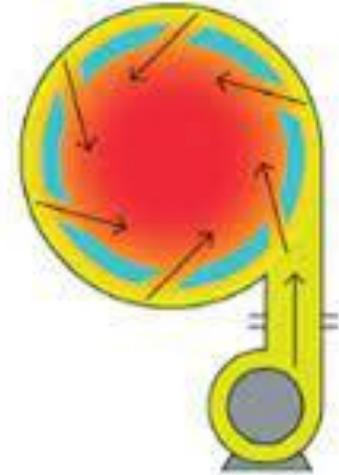
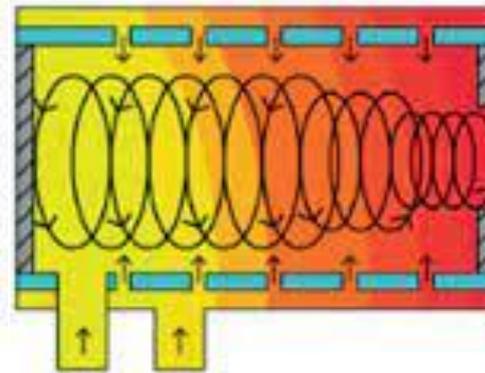
Parrilla vibrante

1.1.2. 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

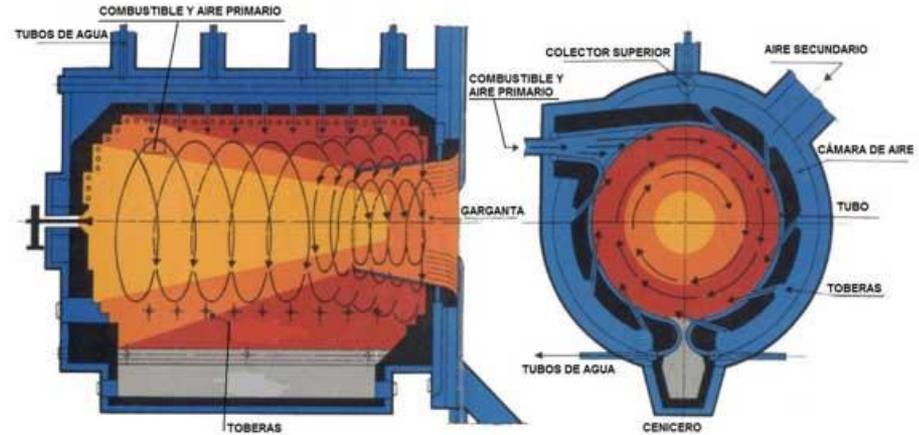
Cámara Torsional



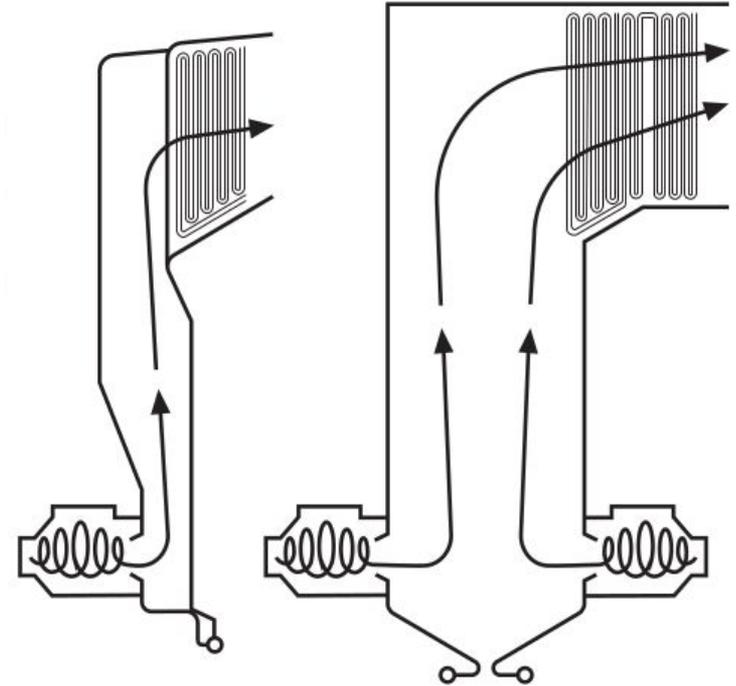
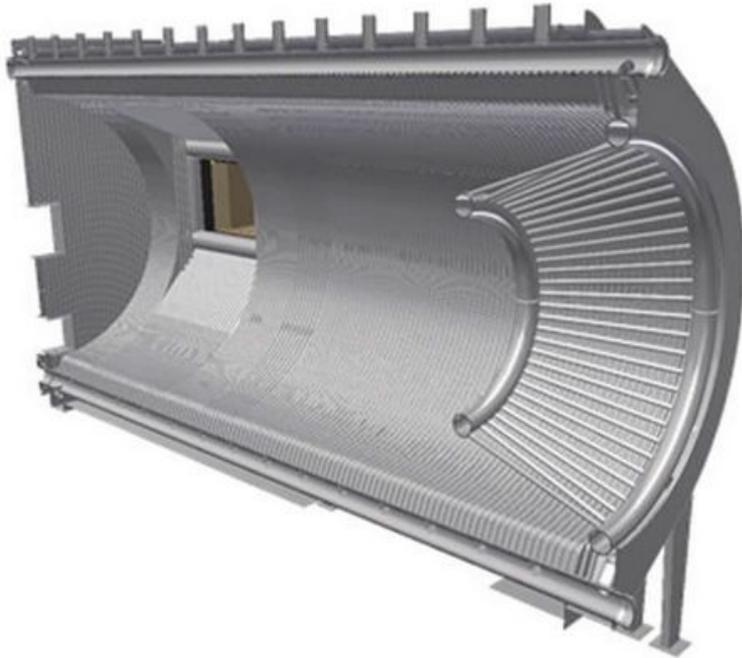
1.1.2. Quema en suspensión

Cámara torsional

- Camisa o **tubos de agua**
- **Alimentación neumática** de combustible (aire primario)
- Entrada **tangencial** de aire secundario
- Trayectoria helicoidal con elevado **tiempo de residencia**
- **Garganta** para recircular y quemar hollín



1.1.2. Quema en suspensión

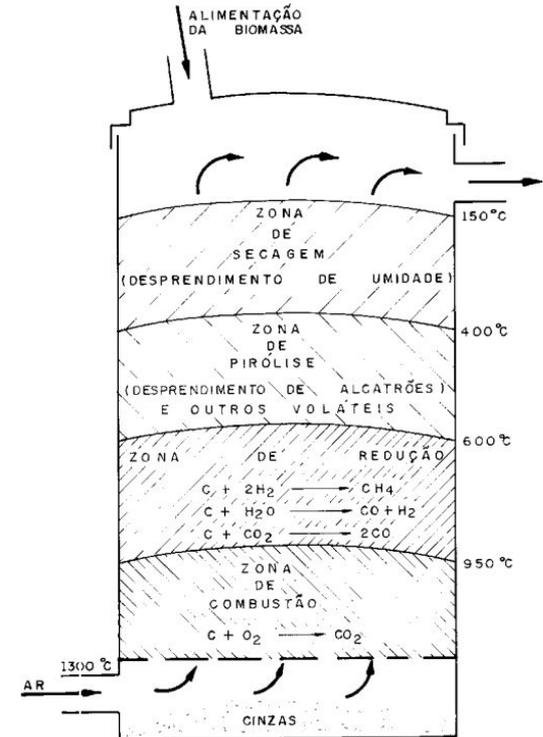


1.1.3. Gasógeno + cámara de combustión

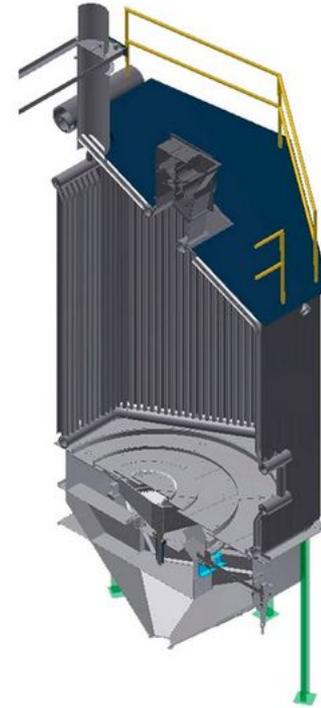
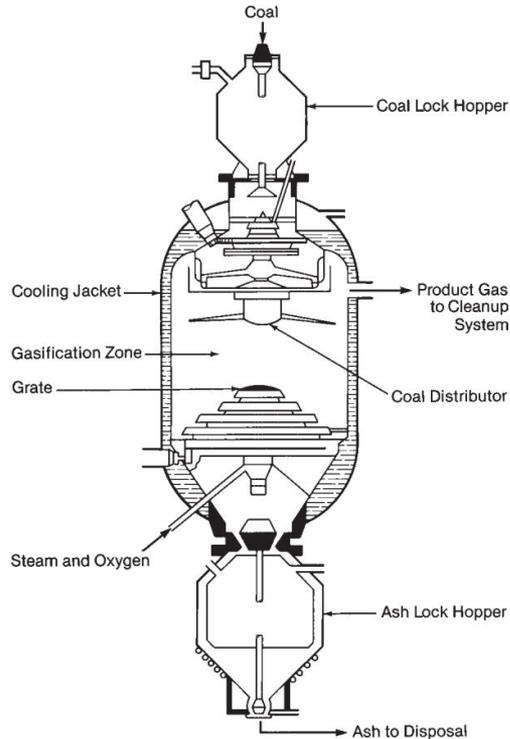
Objetivo de la gasificación:

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

- **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

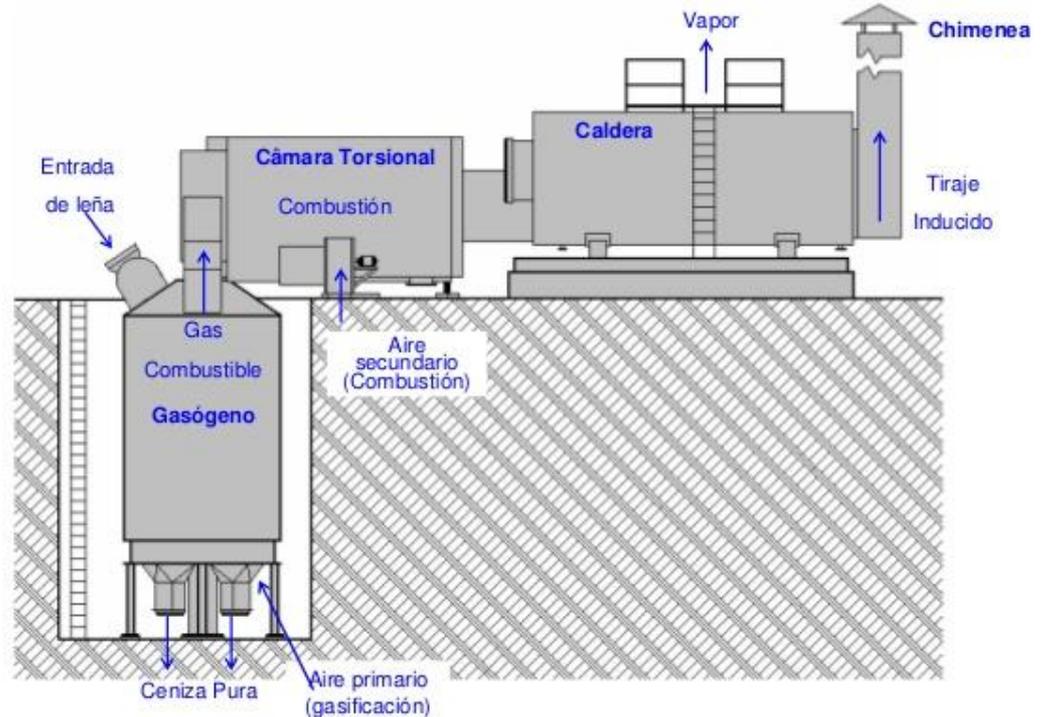


1.1.3. Gasógeno + cámara de combustión



1.1.3. Gasógeno + cámara de combustión

- Exceso global de aire menor al de quema directa
- Multicombustible
- Alimentación al gasógeno con válvula rotativa
- Admite elevado contenido de humedad (50%)



1.1.4. Lecho fluidizado

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**.

Componentes principales del sistema:

- Columna
- Distribuidor de gas
- Soplador
- Ciclón
- Alimentador de material sólido

1.1.4. Lecho fluidizado

Ventajas:

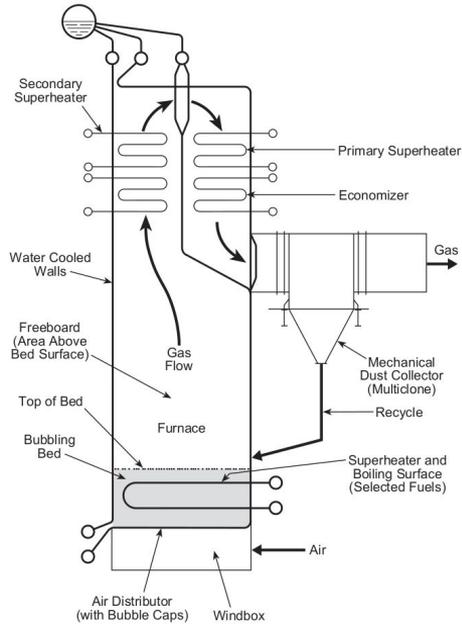
- Elevado coeficiente de **transferencia de calor y masa** (gas-sólido y lecho-superficies inmersas)
- Elevada **superficie de contacto** sólido-gas (Ej: 1m³ de partículas de 100 micras tiene un área superficial de 30.000 m²)
- Equipos **compactos**
- **Mejor distribución** de las partículas
- **Menor estratificación** de las partículas
- Mayor **homogeneización** del lecho (uniformidad axial de temperatura y composición)
- Admite elevado contenido de humedad (65%)
- Sólidos presentan comportamiento similar a un fluido

Desventajas:

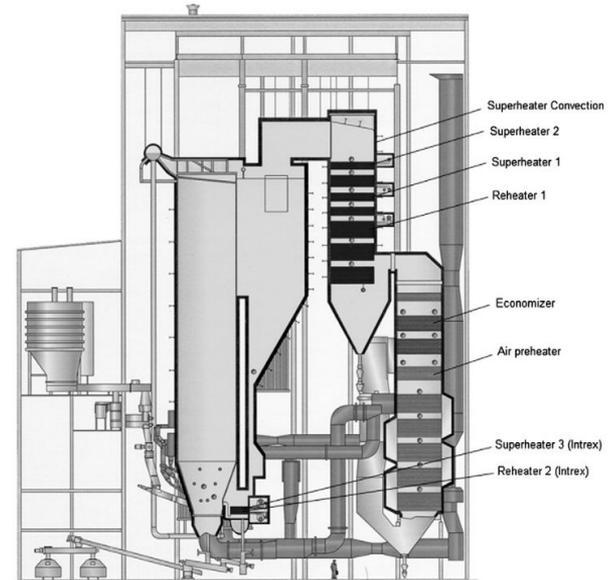
- **Erosión** de las paredes y los tubos con contacto con el lecho
- Generación de **partículas finas** debido al rozamiento
- **Arrastre de partículas** en la corriente de gas
- **Tiempo de residencia** de las partículas **no uniforme**
- Ciencia empírica, dificultad en la elección de correlaciones

1.1.4. Lecho fluidizado

Lecho fluidizado burbujeante



Lecho fluidizado circulante



1.1.4. Lecho fluidizado - Aplicación en Uruguay

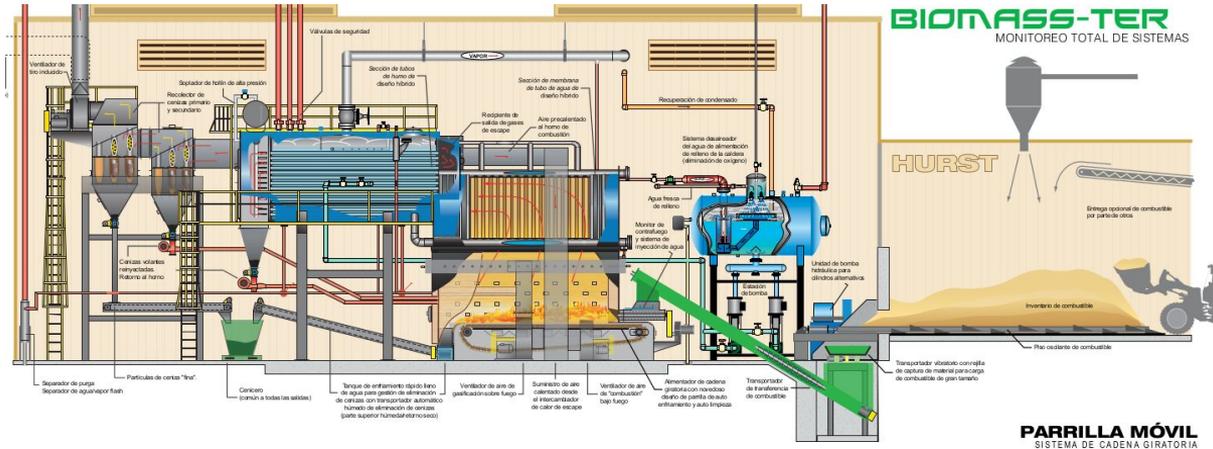
Montes del Plata

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



1.3. Sistema de combustión de sólidos

- Alimentación
- Combustión
- Circuito de humos
- Tratamiento de humos
- Chimenea



1.4. Cenizas

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

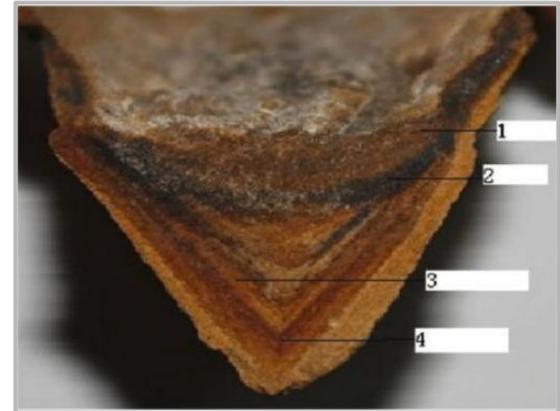
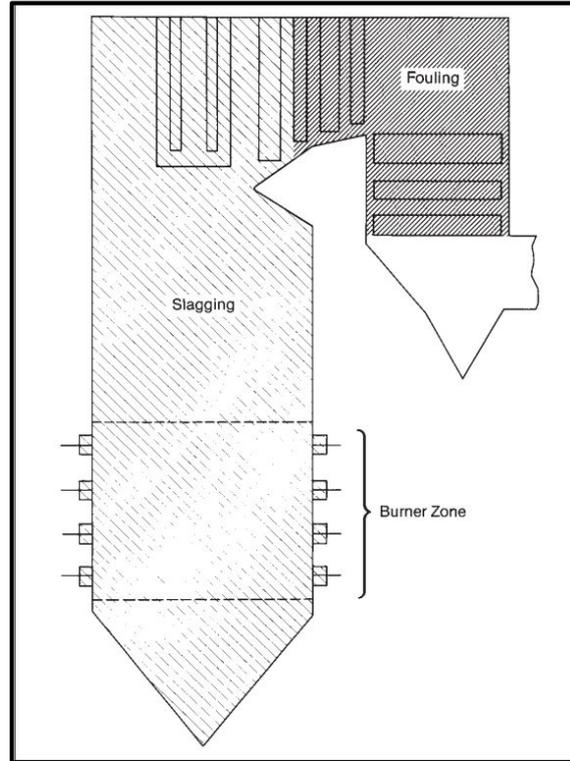
Principales problemas que generan las cenizas:

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

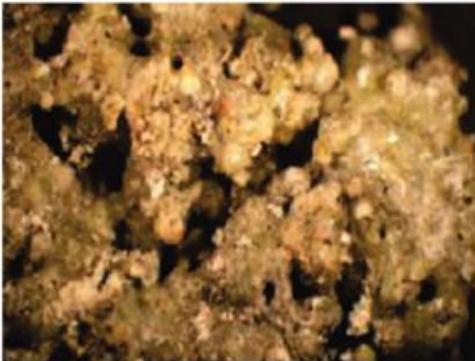
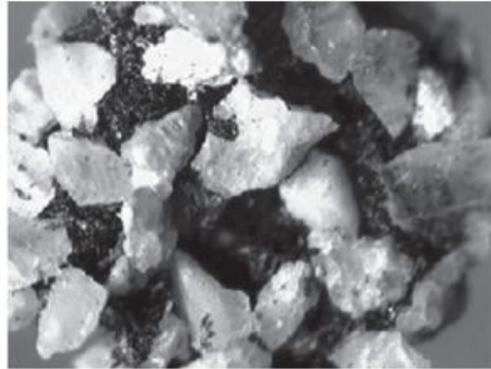
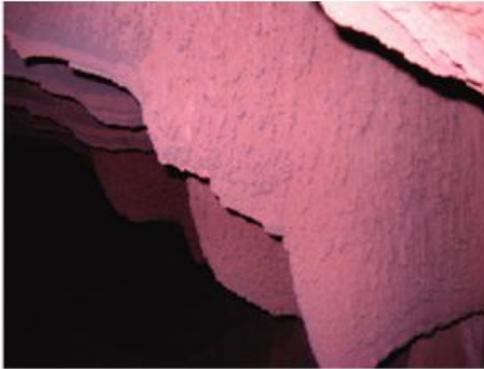


1.4. Cenizas

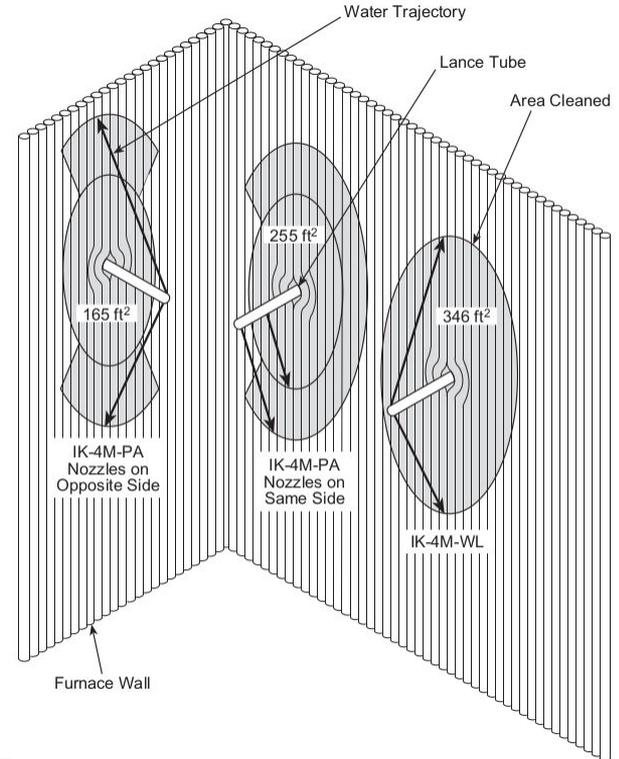
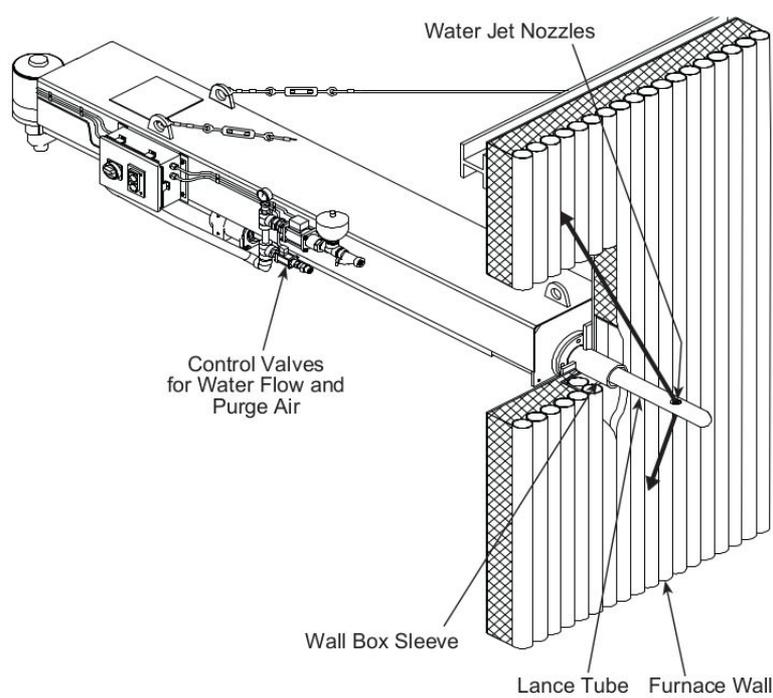
Fouling & Slagging



1.4. Cenizas

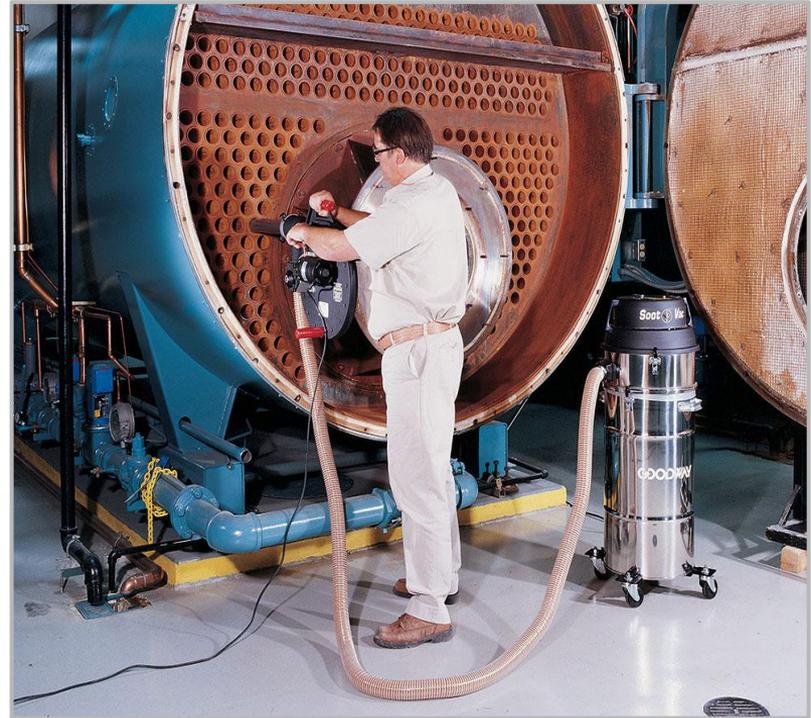


1.4. Cenizas



1.4. Cenizas

Cepillado y aspirado



3. Combustibles líquidos

- 1.1. Características de combustibles líquidos
- 1.2. Sistemas de alimentación
- 1.3. Quemadores



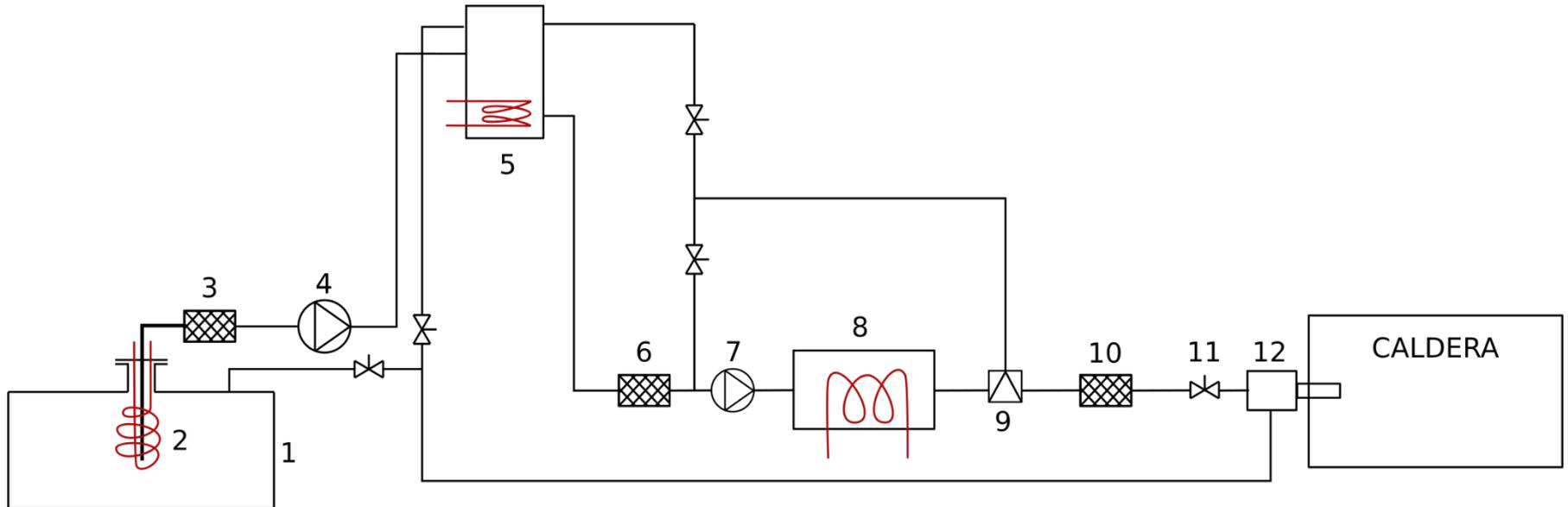
1.1. Características de combustibles líquidos

Propiedades de Fuel Oil
Pesado

Ficha técnica de ANCAP

<i>DETERMINACIONES</i>	<i>ESPECIFICACIONES</i>		<i>MÉTODO DE ENSAYO</i>
	<i>Min.</i>	<i>Máx.</i>	
Punto de inflamación PM, °C	65		ASTM D 93
Punto de escurrimiento, °C		20	ASTM D 97
Viscosidad Cinemática a 50 °C, cSt		466	ASTM D 445
Viscosidad Saybolt Furol a 50 °C, s		220	ASTM D 88
Cenizas, % en peso		0.20	ASTM D 482
Poder calorífico sup., kcal/kg	10000		ASTM D 4868
Agua y sedimento, % en vol.		1.0	ASTM D 1796
Agua + sedimento, % en vol.		1.0	ASTM D 95 + ASTM D 473
Estabilidad y Compatibilidad		2	ASTM D 4740

1.2. Sistema de alimentación de Fuel-oil

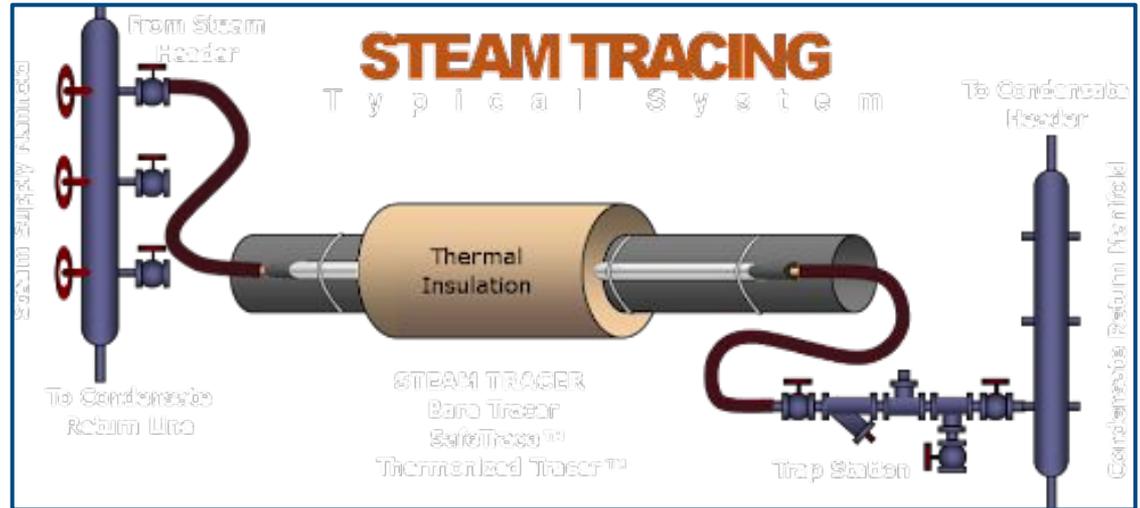
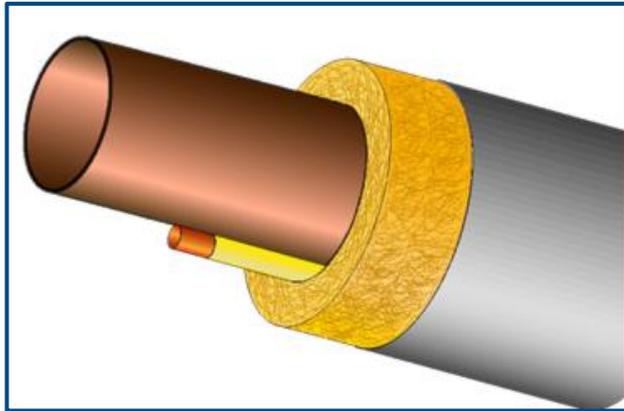


1. Tanque de almacenamiento
2. Calentador (a vapor)
3. Filtro
4. Bomba

5. Tanque diario con calentador (eléctrico)
6. Filtro
7. Bomba
8. Precalentador (eléctrico)

9. Válvula de alivio
10. Filtro
11. Válvula reguladora
12. Quemador

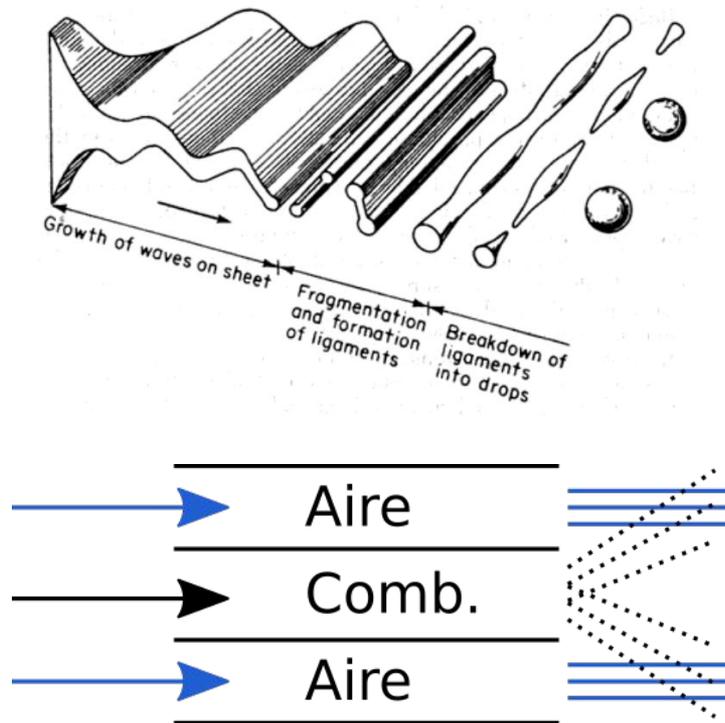
1.2. Sistema de alimentación de Fuel-oil - “Tracing”



1.3. Quemadores de líquidos

Requerimientos necesarios para lograr una buena combustión:

- Dosificación adecuada de **aire-combustible, temperatura, pulverización, turbulencia y tiempo.**
- El combustible líquido **requiere una vaporización** previa a la combustión.
- La **atomización** o pulverización facilita la vaporización
- Generar un **spray en forma de cono** favorece la vaporización de combustible y mezcla con el aire.



1.3. Quemadores de líquidos

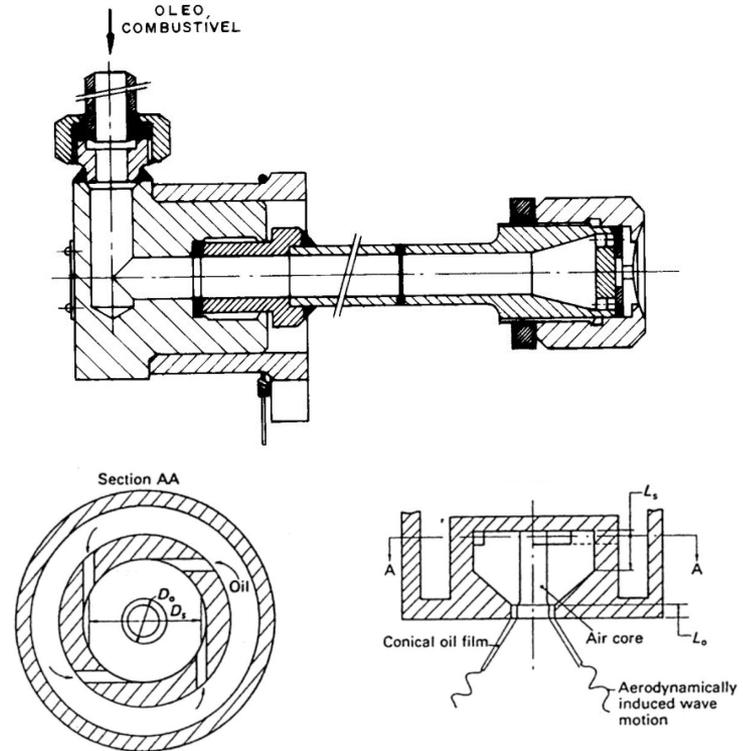
Tipos de quemadores:

- 1.1.1. Quemadores por presión mecánica
- 1.1.2. Quemadores por rotación (copa rotativa)
- 1.1.3. Quemadores por inyección de vapor o aire

1.1.1. Quemadores por presión mecánica

Características:

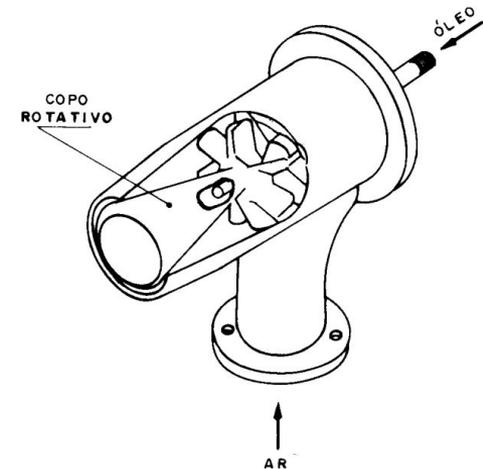
- Atomización por presión mecánica
- Presión de combustible: **20 a 30 kgf/cm²**
- **Pastilla atomizadora**, con agujeros periféricos y canales tangenciales
- **Regulación** de caudal **por la presión** de alimentación (puede incluir retorno)



1.1.2. Quemadores por copa rotativa

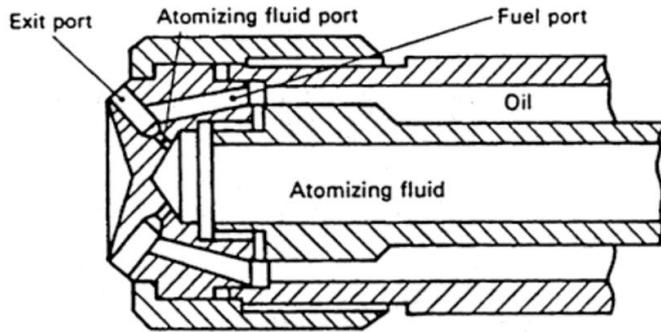
Características:

- El combustible llega por un tubo central que termina en una copa
- Copa giratoria (**3000 a 4000 rpm**)
- Combustión simultánea de varios gases y líquidos combustibles
- Requiere baja presión de suministro de combustible y baja temperatura de precalentamiento.



1.1.3. Quemadores por inyección de vapor o aire

Características:



- Vapor o aire a presión utilizado como **fluido para atomizar** el combustible.
- En caso de utilizarse **vapor** como fluido de atomización se debe contar con aire comprimido para el **arranque en frío** o quemadores auxiliares de otro tipo.
- El aire de atomización no es suficiente para la combustión, siendo necesario mayor ingreso de aire.
- Atomización con **vapor reduce la temperatura** del hogar y **evita** formación de **NOx**.

1.1.3. Quemadores por inyección de vapor o aire



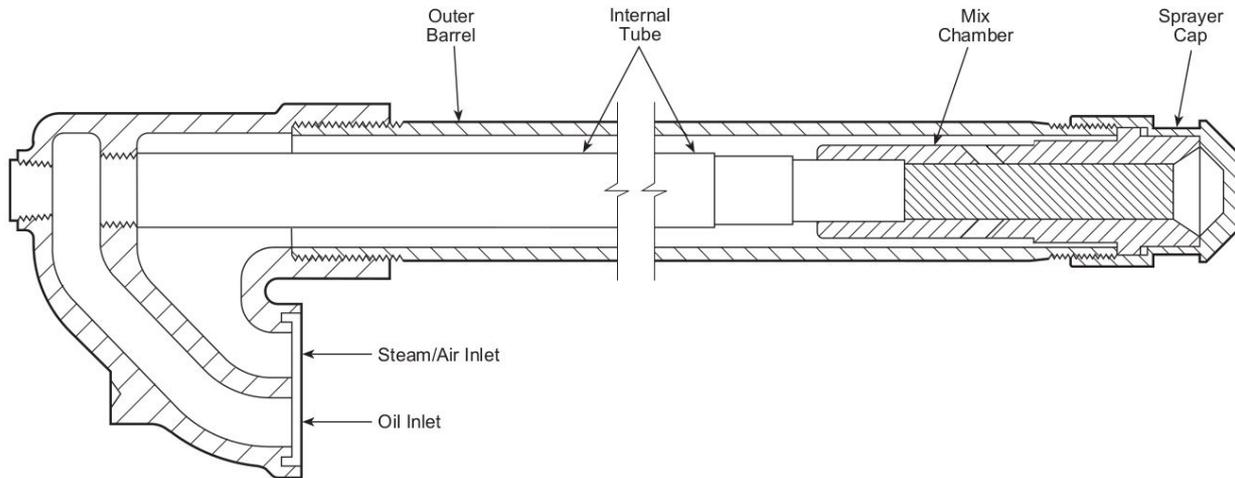
Mix Chamber (side view)



Sprayer Cap (side view)



Sprayer Cap (front view)



1.3. Quemadores de líquidos

Quemadores monoblock:

- Precalentador
- Bomba de inyección
- Filtro de entrada
- Válvula de alivio
- Válvula reguladora
- Ventilador de tiro forzado
- Cámara de mezcla
- Puntero de atomización
- Encendido piloto
- Controles automáticos



1.3. Quemadores de líquidos

- Manual
- Automático
 - ON-OFF
 - Modulante
 - Discontinuo (alto y bajo fuego)

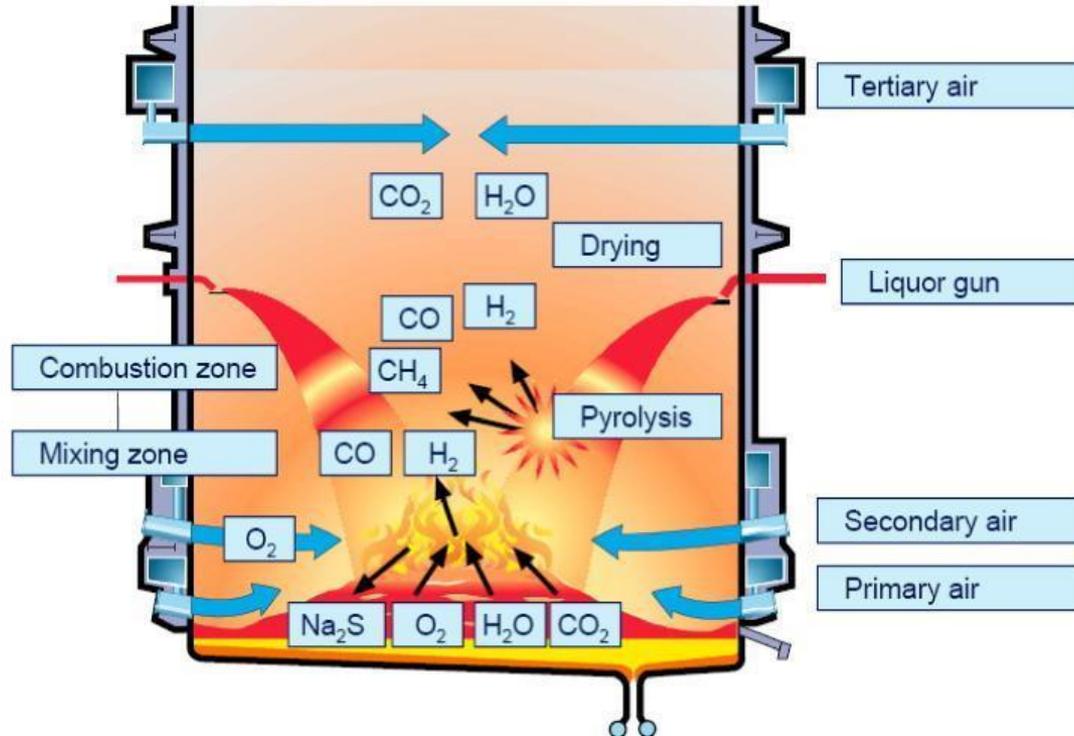
Automática **ON-OFF** (algunos problemas):

- **Ensuciamiento** del puntero del quemador.
- Variación de la **temperatura de combustible** por falla del sistema de regulación.
- Variación de la **presión de combustible** por obstrucción en algún punto del circuito (filtros, válvulas).
- **Variación del caudal de aire** por anomalía en el VTF.
- **Falta de turbulencia** por ensuciamiento del hogar.
- **Falta de tiro** por ensuciamiento de tubos.

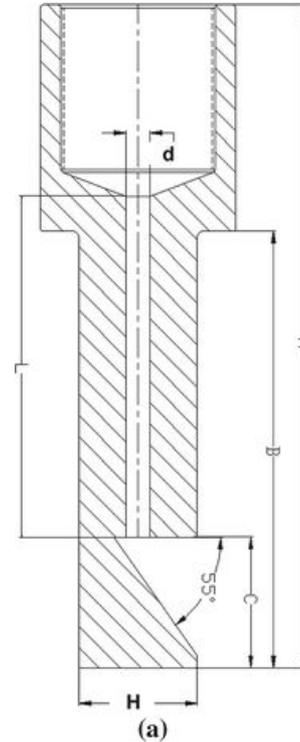
Automática con Modulación:

- **Presostato con resistencia variable** envía señal eléctrica variable
- Un motor modulante gira en función de la señal eléctrica de entrada
- Por un **sistema de palancas** se regula el pasaje de **combustible** (válvula reguladora) y **aire** (registro) para mantener un exceso adecuado.
- Se setea con la caldera en **funcionamiento** y haciendo **análisis de humos**.
- **Sistema más preciso:** transmisor de presión electrónico, controlador, válvula modulante neumática y actuadores sobre el VTF y la válvula modulante.
- **Variador de frecuencia** en VTF.
- El sistema modulante mantiene la presión de vapor casi constante y se eliminan los reencendidos

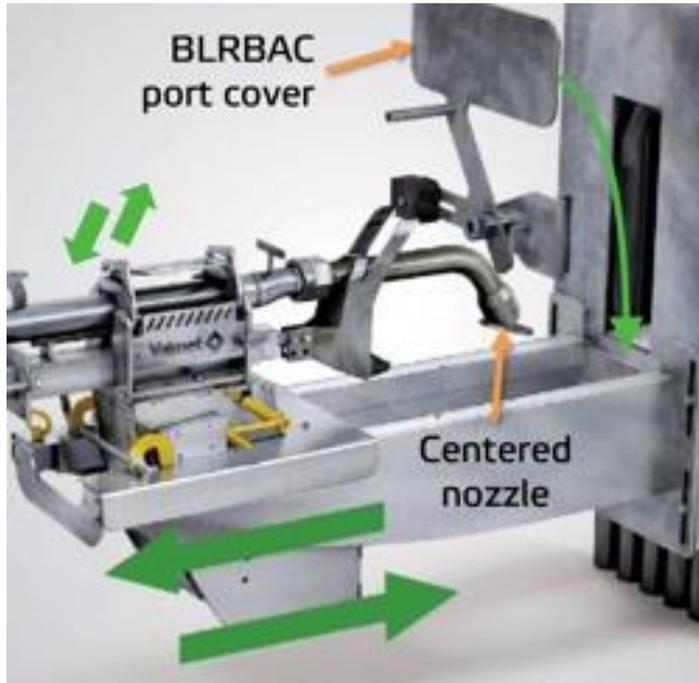
1.3. Quemadores de líquidos - Licor negro



1.3. Quemadores de líquidos - Licor negro

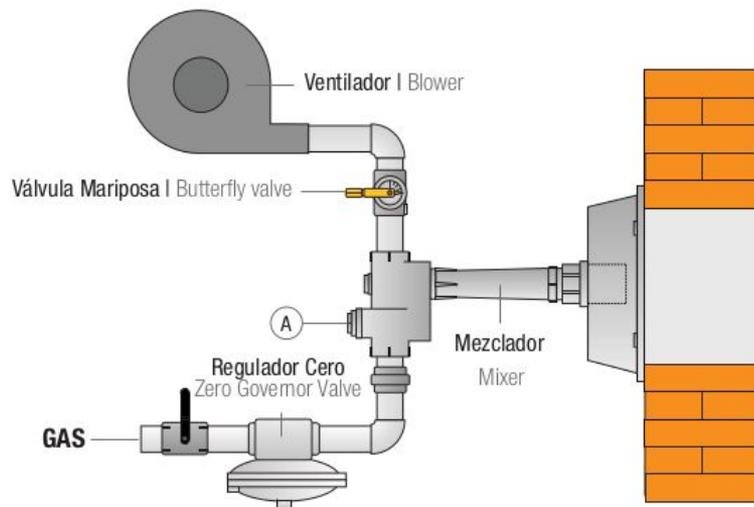


1.3. Quemadores de líquidos - Licor negro



4. Combustibles gaseosos

- 1.1. Características de combustibles gaseosos
- 1.2. Instalación fija
- 1.3. Quemadores



1.1. Características de combustibles gaseosos

Ventajas:

- **No** necesita **precalentamiento**
- **No** necesita **pulverización**
- Más **fácil** obtener una **buena combustión** y calidad de gases en la chimenea
- **No** contiene **azufre**

Desventajas:

- **Manipular** un combustible gaseoso es **más delicado** que un líquido (medidas especiales de **prevención y mantenimiento**)
- Las **fugas** de gas **no son visibles**. (posibilidad de generar atmósfera explosiva)

Ventajas desde el punto de vista **operativo** pero **desventajas** desde el punto de vista de la **seguridad**

1.1. Características de combustibles gaseosos

Propano industrial

Propiedades

Datos de ANCAP (marzo 2019)

DETERMINACIONES	ESPECIFICACIONES		MÉTODO DE ENSAYO
	Min.	Máx.	
Contenido de C3, % en vol.	Informar		ASTM D 2163
Contenido de Propileno	Informar		ASTM D 2163
Contenido de C4 y superiores, % en vol.	20		ASTM D 2163
Contenido de C5 y superiores, % en vol.	0.3		ASTM D 2163
Tensión de vapor a 37.8°C, psig (1)	208		ASTM D 1267 o D 2598 o D 6867
Densidad relativa a 15,6°C (2)	Informar		ASTM D 2598 o D 1657
Residuos (5): Residuo de evaporación de 100 ml y Prueba de la mancha de Aceite (3) (4) ; o Residuo por cromatografía gaseosa (mg/kg)	0.05 Pasa 350		ASTM D 2158 ASTM D 7756
Corrosión en lámina de Cobre (1 hora a 37.8°C) (6)	1		ASTM D 1838
Azufre, ppm (7)	185		ASTM D 6667
Sulfuro de hidrógeno	Pasa		ASTM D 2420
Contenido de humedad	Pasa		ASTM D 2713
Contenido de agua libre	No contiene		Visual
Olor característico, diuido en el aire en la concentración de 0.06% en vol.	Perceptible		UNIT 561/79
Poder calorífico, kcal/kg	Informar		ASTM D 3588 o D 2598

1.1. Características de combustibles gaseosos

Gas Natural

Composición (%)

(Datos de MontevideoGas Abril 2022)

Metano	92,0
Etano	4,2
Propano	0,6
Butano	0,1
Nitrógeno	1,0
Anhídrido carbónico	2,1

Especificación de Calidad (Datos de ANCAP marzo 2019)

Determinaciones	Valor Máximo
Dióxido de Carbono (CO ₂)	2,0 % molar
Agua (H ₂ O)	65 mg/sm ³
Total de Interés (N ₂ + CO ₂)	4,0 % molar
Sulfuro de Hidrógeno (SH ₂)	3 mg/sm ³
Azufre Entero	15 mg/sm ³
Hydrocarburos condensables	-41° C @ 5.500 kPa Abs
Oxígeno (O ₂)	0,2 % molar
Partículas sólidas	22.5 Kg/MM de sm ³ (tamaño >5 micrones)
Partículas líquidas	100 litros/MM de sm ³
Poder calórico superior (PCS)	Min 8.850 Máx 10.200 Kcal/sm ³
Temperatura máxima	50°C

1.2. Instalación fija

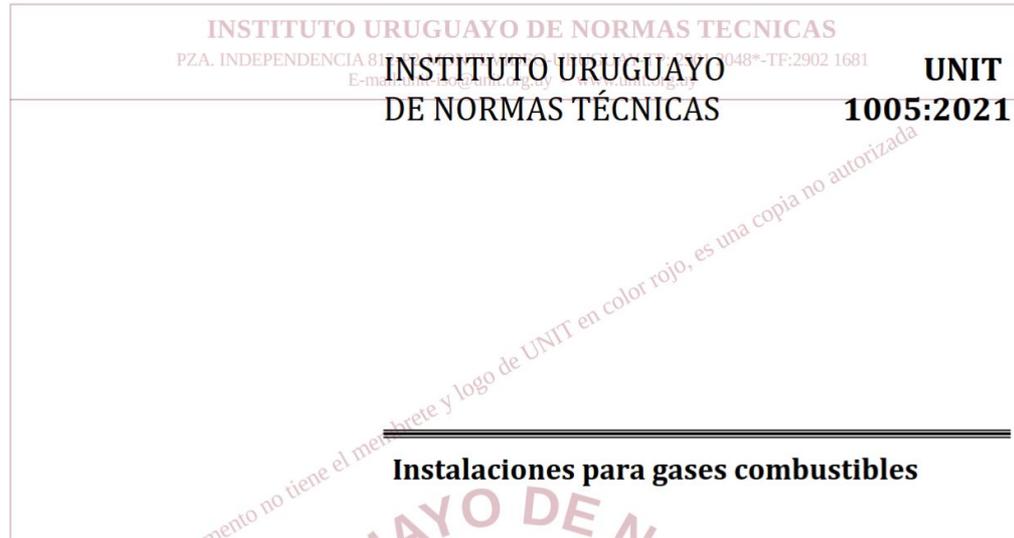


REGLAMENTO DE INSTALACIONES FIJAS DE GAS COMBUSTIBLE

- **UNIT 1005** Instalaciones para gases combustibles por cañería
- **NAG 201** Disposiciones, Normas y Recomendaciones para uso de Gas Natural en Instalaciones Industriales (ENARGAS)
- **NFPA 54** National Fuel Code
- **NFPA 58** Liquefied Petroleum Gas Code
- Reglamento Técnico y de Seguridad de Instalaciones y Equipos destinados al manejo de GLP de la URSEA

1.2. Instalación fija

UNIT 1005:2021 incluye instalaciones industriales (en sustitución de NAG 201)



1.2. Instalación fija - GLP

Tanques de acumulación:

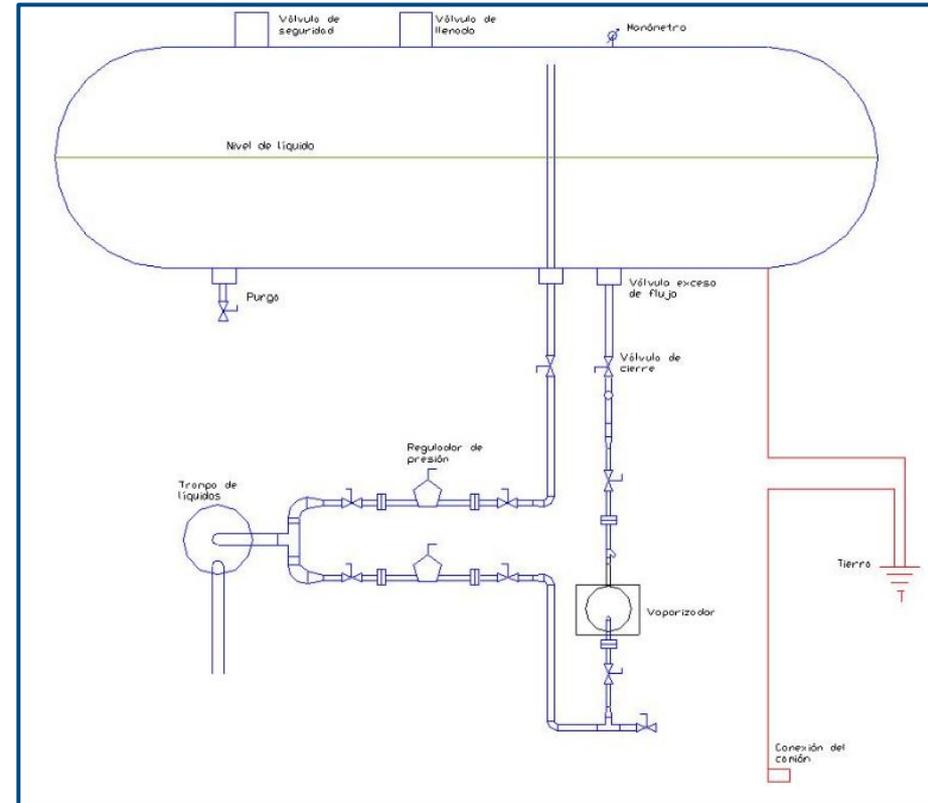
- Capacidades: 1, 4, 7.3, 50, 120 m³
- Posibilidad de batería de tanques
- Volumen de reserva en función del consumo y periodicidad de recarga



1.2. Instalación fija - GLP

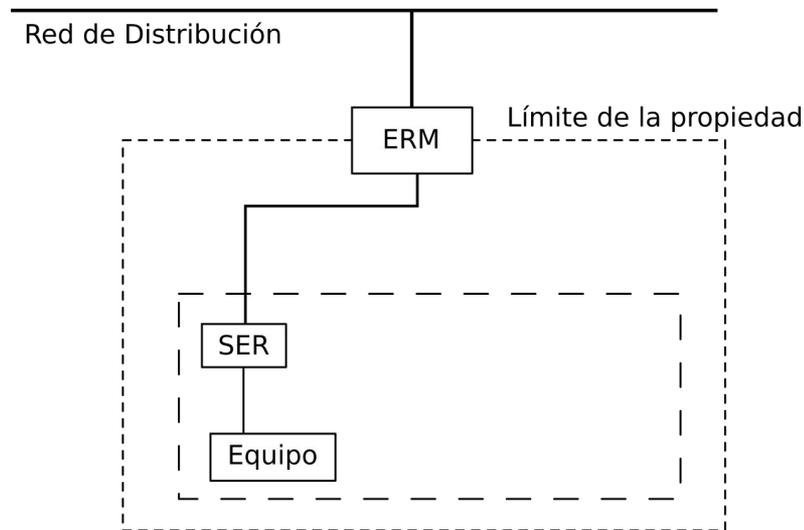
Tanques de acumulación:

- Extracción en **fase vapor** (sujeto a vaporización **natural**)
- Extracción en **fase líquida** con **vaporizador**
- **Regulación** primaria de **presión**



1.2. Instalación fija - Gas Natural

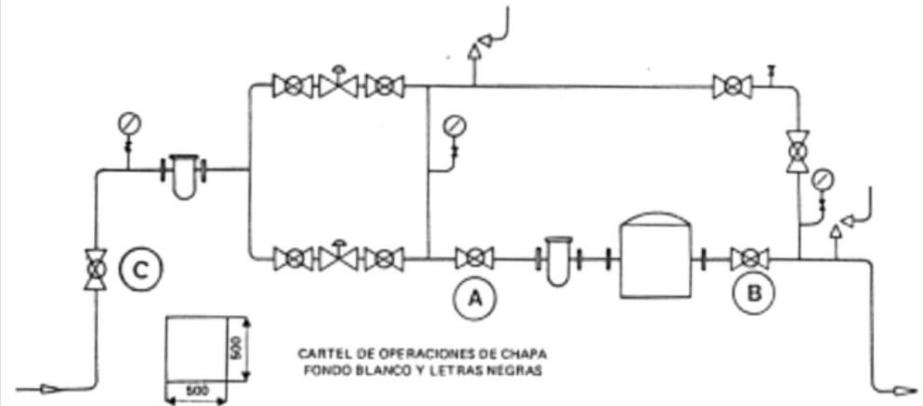
- Alimentación desde la red de distribución.
- Presión máxima de la red: 4 barg
- Para grandes usuarios (más de 5000 Nm³/día) posibilidad de ramal dedicado (bypass físico o comercial)
- Estación de regulación y medición (ERM)
- Estación de regulación secundaria (SER)



1.2. Instalación fija - Gas Natural

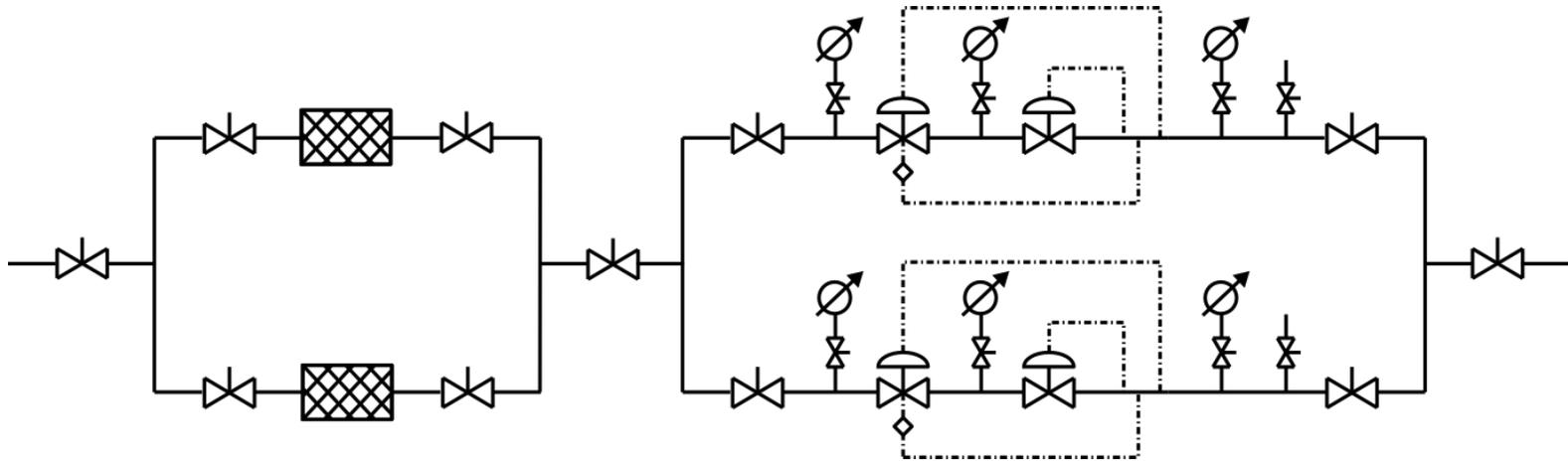


Estación de Regulación y Medición (**ERM**)

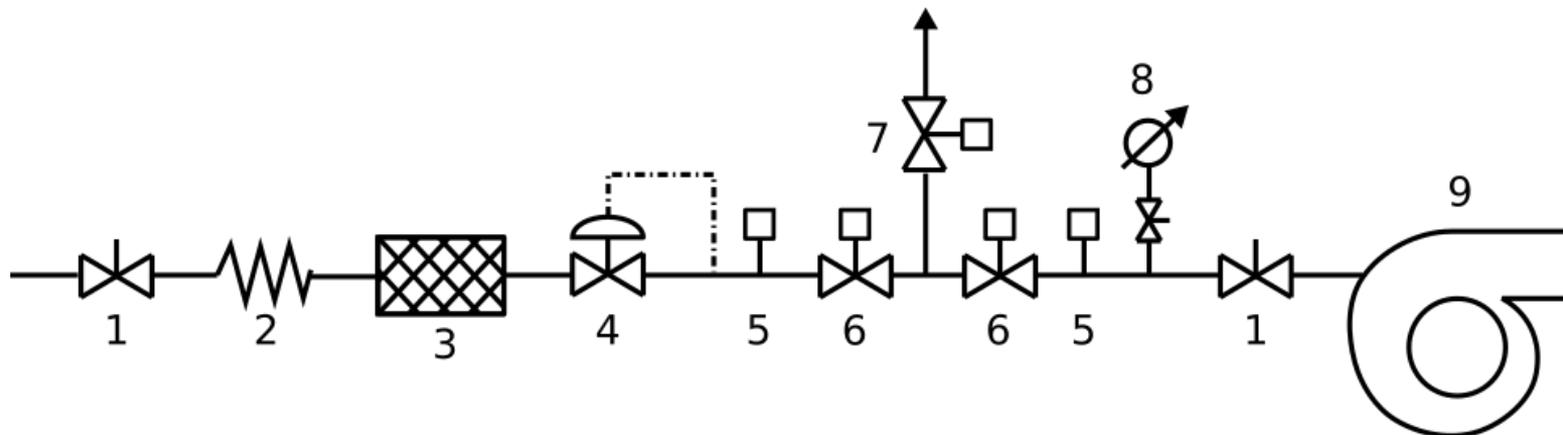


1.2. Instalación fija

Si la **presión** en los **artefactos difiere** de la **presión regulada** interna, es necesario instalar una planta de regulación **SER**



1.3. Quemadores - Tren de válvulas



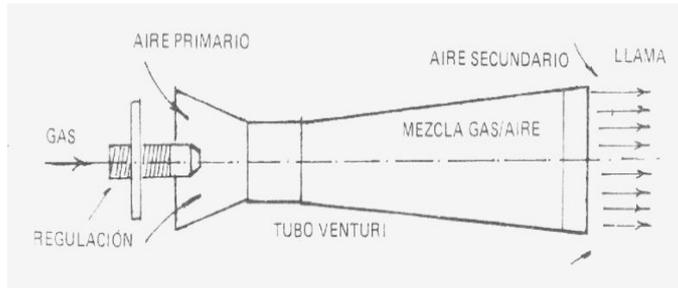
- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. Válvula de corte manual | 6. Válvulas solenoides de corte (normal cerrada) |
| 2. Flexible | 7. Venteo |
| 3. Filtro | 8. Manómetro |
| 4. Válvula reguladora de presión | 9. Quemador |
| 5. Presostato (alta y baja) | |

1.3. Quemadores de gases

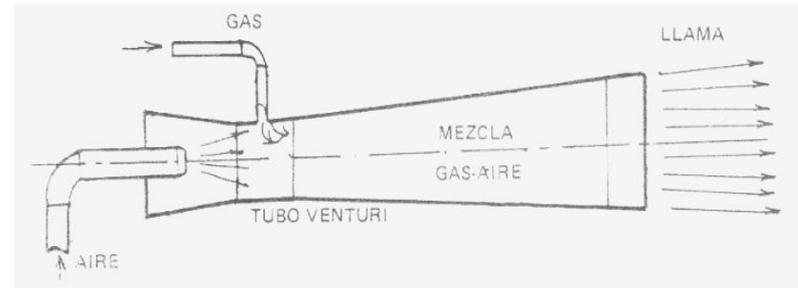
Generar una buena **mezcla** combustible + comburente, potencia **estable**, muy **bajas** emisiones de **CO**, **no** generar **calado ni desprendimiento** de llama

- Atmosféricos o por presión de aire
- De premezcla o de llama difusiva

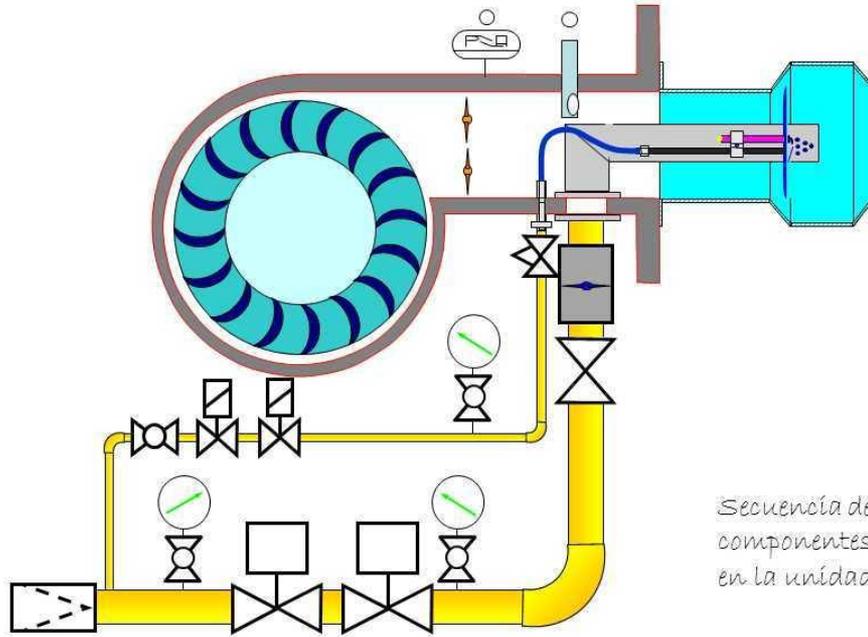
Quemador atmosférico



Quemador por presión de aire



1.3. Quemadores de gases



Secuencia de componentes en la unidad

Secuencia de encendido:

1. Encendido del ventilador (prebarrido)
2. Presostato de aire
3. Hermeticidad de tren de válvulas del piloto
4. Encendido del piloto
5. Sensor de llama
6. Hermeticidad de tren de válvulas del quemador principal
7. Encendido del quemador ppal.

1.3. Quemadores de gases



1.3. Quemadores de gases

- Operación ON-OFF, modulante, alto/bajo fuego
Regulación: fijación mecánica, válvulas proporcionantes, regulador cero
- Prebarrido (4 volúmenes de hogar o 12 segundos)
- Corte de suministro:
 - No se detecta llama
 - Presión de gas alta o baja
 - Interrupción de suministro de gas
 - Interrupción de corriente eléctrica
 - Falta de tiro en ducto de evacuación
 - Falta de suministro de aire

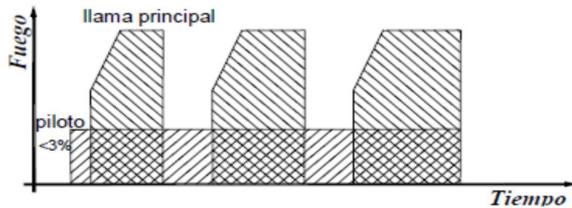
1.3. Quemadores de gases - Piloto

Funcionamiento **independiente** del quemador principal

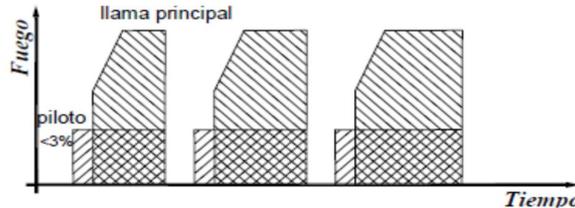
Llama piloto con potencia **inferior a 3% del máximo fuego**

Equipos pequeños pueden encender con el quemador en bajo fuego sin piloto

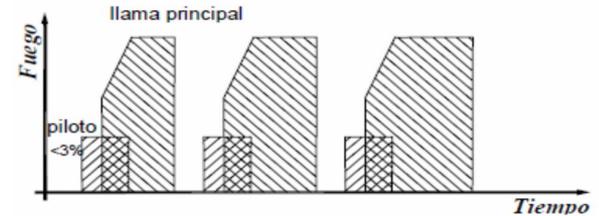
Piloto continuo



Piloto Intermitente



Piloto Interrumpido



5. Protocolo de combustión y emisiones ambientales

Combustible:

- Caudal
- Presiones
- Temperatura

Aire:

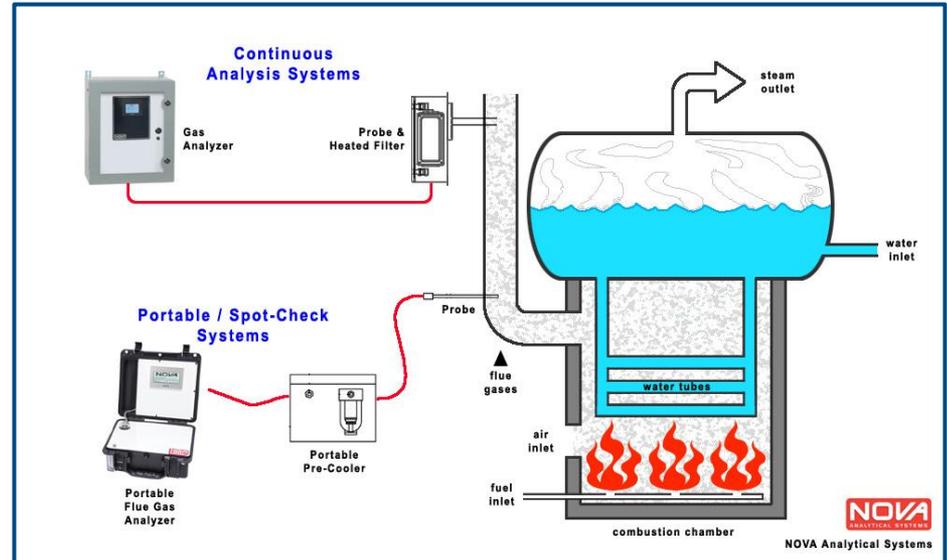
- Caudal
- Presiones

Humos:

- Composición:
 O_2 , CO , CO_2
- Temperatura

Vapor:

- Caudal
- Presión



5. Protocolo de combustión y emisiones ambientales

Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (DINACEA, antes DINAMA)

Reglamento de calidad del aire

Emisiones de Fuentes Fijas

Límites máximos admisibles en función de la **potencia térmica** y el **tipo de combustible**

Tabla 3. Estándares de emisión para unidades de combustión

Unidad de combustión (Potencia térmica) ⁽¹⁾	Combustible ⁽²⁾	SO ₂ (mg/Nm ³)	NOx como NO ₂ (mg/Nm ³)	MP (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	Oxígeno Seco(%)
>40 MW	Gas	-	400	-	-	3
	Líquido	1700	600	50	-	3
	Sólido	1400	900	50	-	6
≥12 MW y <40 MW	Gas	-	400	-	-	3
	Líquido	5100	600	250	-	3
	Sólido	4250	900	250	1500	6
≥5 MW y <12 MW	Gas	-	400	-	-	3
	Líquido	5100	600	350	-	3
	Sólido	4250	900	350	2000	6
<5 MW con combustibles alternativos	Líquido	5100	600	350	-	3
	Sólido	4250	900	350	2000	6
TURBINAS	Gas natural	-	100	-	-	15
	Líquido	80	150	50	-	15
MOTORES	Gas natural	-	200 ⁽³⁾	-	-	15
			400 ⁽⁴⁾			
	Líquido	600	1850 ⁽⁵⁾	50	-	15
			2000			