FONCALOR

ASOCIACIÓN PROVINCIAL DE INSTALADORES DE FONTANERÍA, CALEFACCIÓN, GAS, CLIMATIZACIÓN, MANTENIMIENTO, ELECTRICIDAD Y AFINES DE PONTEVEDRA

JORNADAS TÉCNICAS DE FORMACIÓN DE INSTALADORES DE CALEFACCIÓN EN CALDERAS DE BIOMASA

Conocimiento de los combustibles

Ponente: Marcos García Glez
Ingeniero Industrial

Colegiado nº 1688 del I.C.O.I.I.G.
Profesor asociado a la Universidad de Vigo

Ingeniería VII AIPRO

inega
INSTITUTO ENERXÉTICO DE GALICIA

Enero 2015

Poder calorífico de la biomasa

TABLA 5. Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa					
Producto	PCS (kcal/kg)	PCI a la humedad x (kcal/kg)			
	Humedad = 0%	x	PCI	x	PCI
Leñas y ramas					
Coníferas	4.950	20%	3.590	40%	2.550
Frondosas	4.600	20%	3.331	40%	2.340
Serrines y virutas					
Coníferas	4.880	15%	3.790	35%	2.760
Frondosas autóctonas	4.630	15%	3.580	35%	2.600
Frondosas tropicales	4.870	15%	3.780	35%	2.760
Corteza					
Coníferas	5.030	20%	3.650	40%	2.650
Frondosas	4.670	20%	3.370	40%	2.380
Vid					
Sarmientos	4.560	20%	3.280	40%	2.310
Ramilla de uva	4.440	25%	2.950	50%	1.770
Orujo de uva	4.820	25%	3.240	50%	1.960
Aceite					
Hueso	4.960	15%	3.860	35%	2.810
Orujillo	4.870	15%	3.780	35%	2.760
Cáscaras frutos secos					
Almendra	4.760	10%	3.940	15%	3.690
Avellana	4.500	10%	3.710	15%	3.470
Piñón	4.930	10%	4.060	15%	3.830
Cacahuete	4.250	10%	3.480	15%	3.260
Paja de cereales	4.420	10%	3.630	20%	3.160
	4.420	30%	2.700		
Cascarilla de arroz	4.130	10%	3.337	15%	3.150
Girasol					
Residuo de campo	4.060	10%	3.310	15%	3.090

El **PCI** (poder calorífico inferior) es el calor de la combustión que no aprovecha la energía de condensación del agua.

El **PCS** (poder calorífico superior) aprovecha esta energía y por tanto, con la misma cantidad de combustible, se genera más calor.

Para el cálculo del PCI se considera un contenido de hidrógeno en base seca del 6%.

Fuente: IER / Biomasa. Manuales de Energías Renovables 5. IDAE. 1992.

Poder calorífico de la biomasa

COMBUSTIBLE	PODER C. MEDIO kJ/kg
Bagazo húmedo	10500
Bagazo seco	19200
Cáscara de cacahuete	17800
Cascarilla de arroz	13800
Celulosa	16500
Corteza escurrida	5900
Cosetas de caña	4600
Madera seca	19000
Madera verde (*)	14400
Paja seca de trigo	12500
Paja seca de cebada	13400
Serrín húmedo	8400
Viruta seca	13400
	P. C. SUPERIOR kJ/kg
Cáscara de almendras	36800
Cáscara de nueces	32000
Cáscara de arroz	15300
Cáscara de pipa de girasol	17500
Cáscara de trigo	15800
Corteza de pino	20400
Corcho	20930
Orujillo de aceituna	17900
Orujo de uva	19126
Papel	17500
Jara (8% humedad)	18900 (P.C.I.)

(*)El poder calorífico de la madera verde disminuye si aumenta la humedad de la misma. En la siguiente figura se da el coeficiente por el que hay que multiplicar el poder calorífico para obtener el valor real

En general, se puede considerar que el **poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre las 3000 (3,5kWh/kg) y 3500 kcal/kg (4,1kWh/kg) para los residuos lignocelulósicos** (residuos forestales y otros desechos de plantas), entre las 2000 y 2500 kcal/kg **(2,3-2,9 kWh/kg)** para los residuos urbanos y, finalmente, desde las 10000 kcal/kg **(11,6 kWh/kg)** para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos.

Estas características, juntamente con el bajo contenido de azufre de la biomasa, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente.

Poder calorífico de la biomasa

Tipos de combustibles

PELLETS | HUESO DE ACEITUNA | CASCARA ALMENDRA | CASCARA AVELLANA | ASTILLAS MADERA

Combustibles	PCI seco MJ/kg	Humedad (% b.h.)	Uso
Astillas	14,4-16,2	20 a 60	Doméstico, Residencial, Industrial
Pelets	18-19,5	<12	Doméstico, Residencial
Hueso de aceituna	18	12 a 20	Doméstico, Residencial, Industrial
Cáscara de frutos secos	16,7	8 a 15	Doméstico, Residencial, Industrial
Poda de olivar	17,2	20 a 60	Doméstico, Residencial, Industrial
Poda de vid	16,7	20 a 60	Doméstico, Residencial, Industrial

Poder calorífico de la biomasa

Biocombustibles para calefacción	Pelets de madera	Astillas de madera	Residuos agroindustriales
Poder calorífico inferior (Gj/t)	17	13,4	14,6 a 16,7
Poder calorífico por kg (kWh/kg)	4,7	3,7	4 a 4,7
Poder calorífico en volumen (kWh/m³)	3.077	744	744 a 2.500
Humedad (%)	8	25	10 a 40
Densidad (kg/m³)	650	200	200 a 500
Contenido en cenizas (%)	0,5	1	1 a 2

COMBUSTIBLES

Pellets:
Producto derivado de los residuos de madera. Aproximadamente, 2 kg de pellets proporcionan la misma energía que 1L de gasóleo y 2,2 kg proporcionan la energía de 1 m³ de Gas.

Cereales:
2,5 kg de cereales tienen la equivalencia energética de 1L de gasóleo.

Astillas de madera:
Leña triturada de dimensiones comprendidas entre 5 – 50 mm 2,9 kg de astillas de madera, proporcionan la misma energía que 1L de gasóleo.

ÖNORM M 7133 (Austria) astillas de madera para generación de energía

Clases en función del tamaño						
Tipo astilla	Porciones de tamaños admisibles				Valores extremos admisibles	
	max. 4%	max. 20%	60-100%	max. 20%		
	Tamaño de astilla (mm)				Media (cm^2)	Longitud (cm)
G30	< 1,0	1,0-2,8	2,8-16,0	>16,0	3,0	8,5
G50	< 1,0	1,0-5,6	5,6-31,5	>31,5	5,0	12,0
G100	< 1,0	1,0-11,2	11,2-63,0	>63,0	10,0	25,0

ÖNORM M 7133 (Austria) astillas de madera para generación de energía

El contenido en humedad previo de las astillas condiciona de manera muy importante su poder calorífico

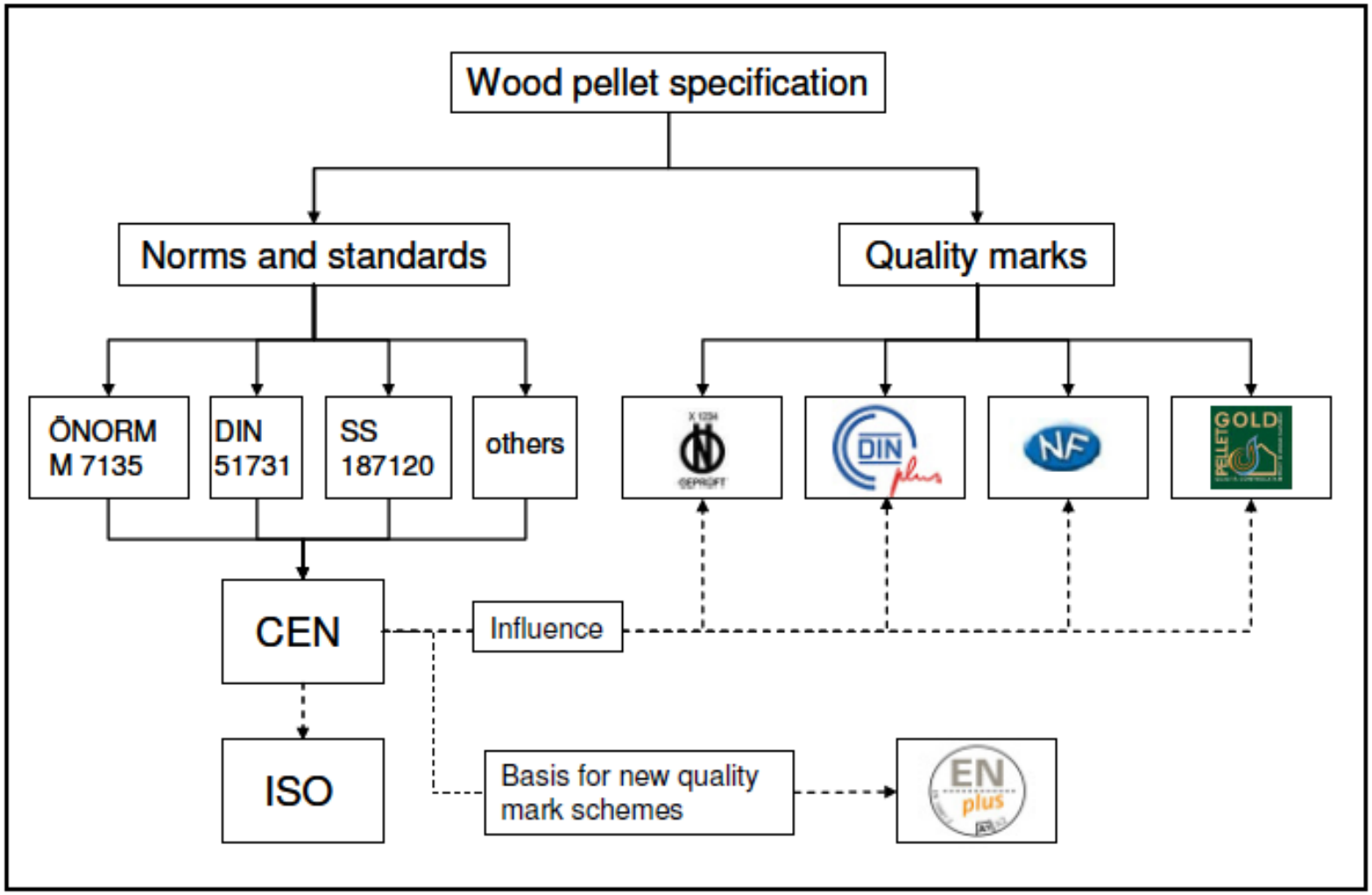
Condición de la madera	Humedad	PCI (H_u)
Recién cortada	50 – 60 %	2,0 kWh/kg
Almacenado un año	25 – 35 %	3,4 kWh/kg
Varios años de almacén	15 – 25 %	4,0 kWh/kg

Por encima del 30% de humedad, las astillas no son almacenables. Deben utilizarse astillas secas (W20 o inferior) o astillas almacenables (W30 o inferior)

Poder calorífico de la biomasa

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
PELLETS	• Combustible estandarizado con alta fiabilidad de operación. • Menor espacio de almacenamiento.	• Alto coste del combustible. • Menores beneficios para la economía local.
ASTILLAS DE MADERA	• Pueden estar disponibles localmente. • La producción fomenta el empleo local. • Son más baratas que los pellets.	• Mayor espacio para el almacenamiento. • Difícil aseguramiento de la calidad y de la uniformidad.
RESIDUOS AGRO-INDUSTRIALES	• Posibilidad de disponibilidad local. • Más baratos que los anteriores.	• Mayor espacio para almacenamiento. • Pueden dar problemas de emisión o corrosión de la caldera.

Normalización . Pellets



Normalización . Pellets

	Unit	DIN plus[4]	DIN 51731[5]	Ö NORM M 7135[6]
Diameter	mm	4 - 10	4 - 10	4 - 10
Length		< 5 x D	< 50 mm	< 5 x D
Density	Kg / dm^3	> 1.12	1.0 - 1.4	> 1.12
Water content	%	< 10	< 12	< 10
Abrasion	%	< 2.3	--	< 2.3
Ash content	%	< 0.5	< 1.5	< 0.5
Energy content	MJ / kg	> 18	17.5 – 19.5	> 18
Sulphur content	%	< 0.04	< 0.08	< 0.04
Chlorine content	%	< 0.02	< 0.03	< 0.02
Nitrogen content	%	< 0.3	< 0.3	< 0.3
Heavy metals	%	regulated	regulated	not regulated

Figure 2: Comparison of selected German and Austrian requirements on wood pellets

Como la norma DIN no mostró ser útil, DIN CERTCO desarrolló los DINplus sistema de certificación de pellets de madera de alta calidad en 2002. Combina características tanto de la norma alemana DIN 51731 (por ejemplo, pruebas de contenido de metales pesados) y la Austriaca ÖNORM M 7135 (por ejemplo, los requisitos de alta calidad en general) (Figura 2). Este plan incluye el establecimiento de una gestión de calidad interno y anual, controles externos sin anuncio

Pellet Gold (Italy)

Parametro	U.M.	LIMITI AIEL	Grado di tolleranza
Contenuto idrico (tal quale)	% su	<10	--
Ceneri	% ss	≤1	+0,05
PCI	MJ/kg	≥16,9	-0,2
Azoto - (N)	% ss	≤0,3	--
Cloro – (Cl)	% ss	<0,03	--
Zolfo – (S)	% ss	<0,05	--
Massa sterica	Kg/m^3	>600	--
Durabilità meccanica	%	≥97,7	--
Formaldeide (HCOH)	Mg/100g	≤1,5	+0,5
Radioattività	Bq/kg	<6	--
Agenti leganti	<2%	Indicare valore	--

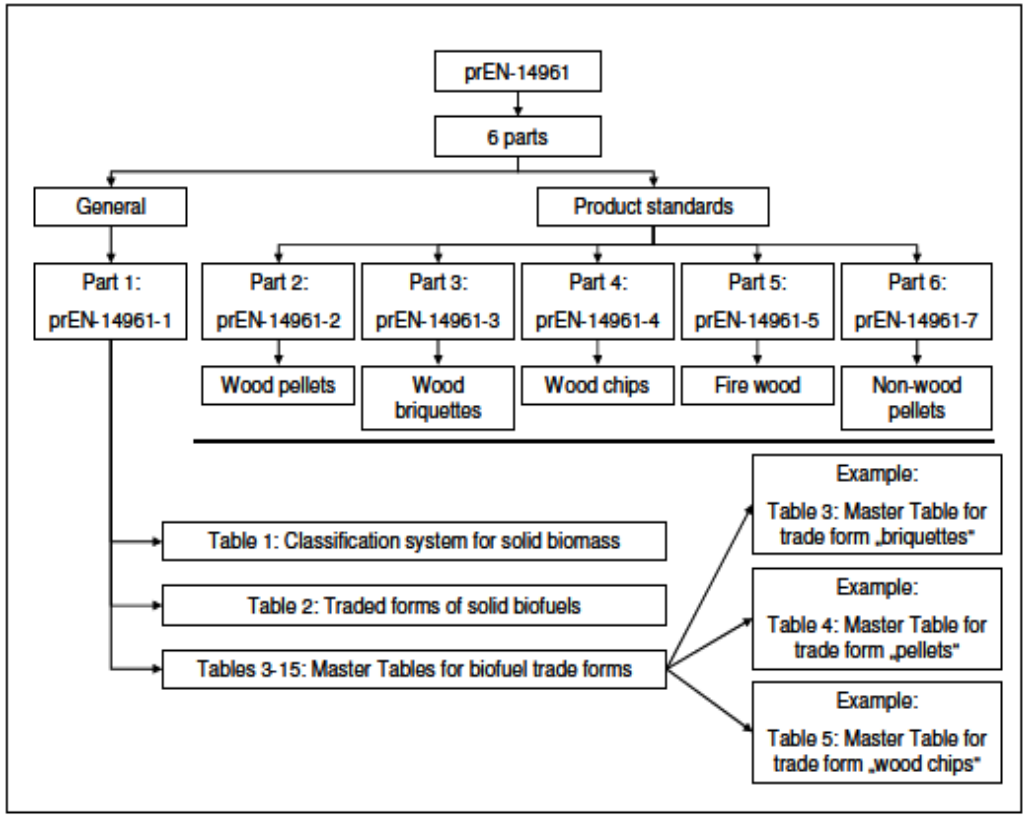
Figure 6: Quality requirements on fuel pellets, according to Pellet Gold (Italy);

Desarrollo de normas relacionadas con pellets europeos

Esta norma consistirá en 6 partes. La primera parte proporciona el marco para una método de clasificación común y claro para los biocombustibles sólidos. El objetivo es crear una lenguaje común para los proveedores de biomasa, procesadores, clientes y también por ejemplo, fabricantes de equipos. Las otras 5 partes son normas de producto para comúnmente formas negociadas de biocombustibles como pellets de madera, agropellets, briquetas y astillas

EN 14961 (Partes 1 a 7) (2010). De ella deriva la UNE-EN-14961 (Partes 1 a 5) (2012) que fue anulada en 2014. Actualmente es la <u>UNE-EN 15234</u> Biocombustibles sólidos. Aseguramiento de la calidad del combustible

Especificación de combustible y clases - prEN 14961



Proceso de combustión

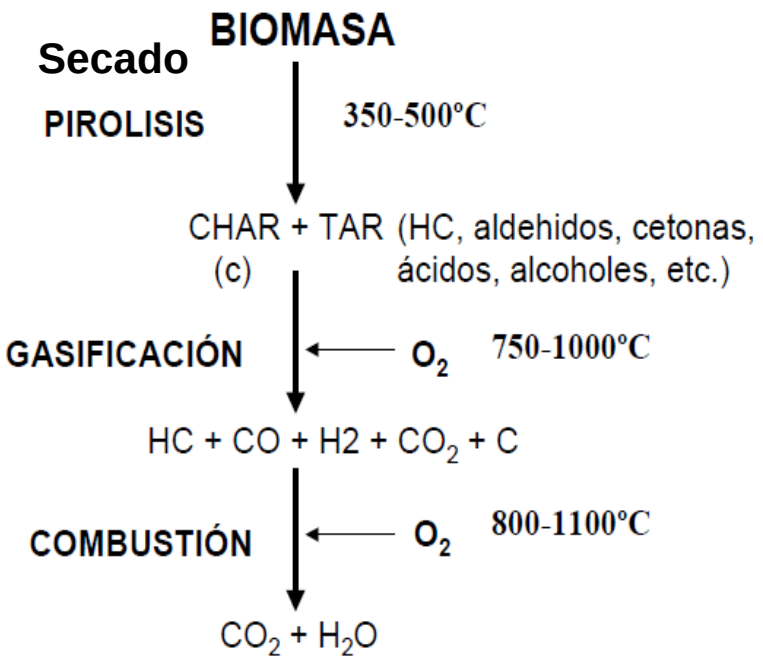
La combustión es una reacción química relativamente rápida, mediante la cual se combina el oxígeno del aire (**comburente**) con los **diferentes elementos oxidantes del combustible** originándose un desprendimiento de calor.

Por tanto, para que se produzca este proceso químico deben confluir cuatro circunstancias:

- Debe haber una **cantidad suficiente de combustible**, es decir, de biomasa.
- Debe hacer una **cantidad suficiente de aire comburente**, que contiene el oxígeno necesario para oxidar o reaccionar con el combustible.
- La **temperatura debe ser la suficiente como para que se produzca y se mantenga la reacción**. Si la temperatura no supera un determinado valor, denominado temperatura de inflamación, comburente y combustible no reaccionan.
- Debe haber un iniciador de la combustión, normalmente una llama preexistente. Esto significa que **en el encendido del sistema de combustión participan normalmente otros elementos**, incluso otros combustibles

Proceso de combustión

El aire primario impulsa la combustión (fase de gasificación), con la formación de un estrato de brasas en contacto de la rejilla y la liberación de gases combustibles procedentes de la pirolisis del combustible (sobre todo monóxido de carbono e hidrógeno). Los gases liberados son arrastrados que con la adición del aire secundario permite que se complete la combustión. Factores esenciales para obtener una combustión óptima son una cantidad de aire adecuada, temperatura y turbulencia elevadas en la cámara de combustión, y la permanencia de los gases calientes en el hogar por un tiempo suficiente para que se completen las reacciones termoquímicas de combustión



Proceso de descomposición térmica de la biomasa y Temperaturas indicativas de los procesos.

Mejora de la combustión

Disponer de una caldera de combustión de biomasa regulada y optimizada en todos sus parámetros de funcionamiento no es tarea fácil ya que depende del tipo de combustible y de su grado de humedad

Los parámetros de una caldera de combustión que deben ser **OPTIMIZADOS** son:

- el valor de la **depresión** o tiro,
- la **cantidad de aire de combustión** (aire primario y secundario),
- la **distribución** del aire de combustión (turbulencia),
- la **temperatura** del **aire** de combustión,
- la **calidad y estado** de conservación del **material refractario** (si existe),
- la **calidad y estado** de conservación de los **materiales interiores** (parrillas),
- la **temperatura** del **hogar** de combustión,

A grandes rasgos, se trata de mejoras energéticas, que incluyen:
el **ahorro de combustibles**, el ahorro de **energía eléctrica**, mejoras **medioambientales** y minimización de **emisiones** atmosféricas

Tiro:

El tiro o extracción en la cámara de combustión es probablemente el factor que más influencia tiene en el funcionamiento y en el rendimiento de una instalación de combustión. Este puede ser forzado o natural.

Ventajas del tiro forzado:

- menor número de sobrepresiones en el hogar, lo que evita la salida de humos, chispas o llamas por los huecos del hogar de combustión (puertas de carga y toberas);
- mejor respuesta de la caldera y, por lo tanto, mayor capacidad térmica;
- mayor refrigeración de parrillas.

Inconvenientes del tiro forzado:

- posible arrastre de materiales ligeros (cenizas, inquemados);
- mayor consumo de la caldera en términos de kg/h de material alimentado al hogar (este punto, en algunos casos, podría ser una ventaja);
- mayor consumo eléctrico del motor ventilador de tiro.

El valor idóneo de depresión (presión negativa) es función de múltiples factores: tipo de material a quemar y su grado de humedad, granulometría, poder calorífico; sistema de alimentación, ya sea con carga manual, carga automática; potencia de la caldera (Kcal/h),…

Cantidad, distribución y temperatura del aire de combustión

Para facilitar la combustión de la biomasa en el hogar, es necesario garantizar la presencia de suficiente cantidad de oxígeno comburente para completar el proceso de combustión. Si la cantidad de aire en el hogar es inferior a la que el combustible requiere, se produce una combustión incompleta: humo negro, inquemados, monóxido de carbono (CO), etc

Si la cantidad de aire en el hogar es muy superior a la que el combustible requiere, se produce un enfriamiento del hogar, que a su vez es compensado con aporte adicional de combustible: aumento del consumo.

El aire de combustión que se aporte al hogar se debe distribuir de tal forma que se garantice que todas las partículas de combustible estén "rodeadas", en todo momento, de oxígeno comburente para completar el proceso de combustión

El aire de combustión que se aporte al hogar puede hacerse a temperatura ambiente o por medio de aire precalentado aire de combustión antes de su inyección al hogar a una temperatura de unos 100 °C, puede suponer un ahorro de combustible cercano al 5%.

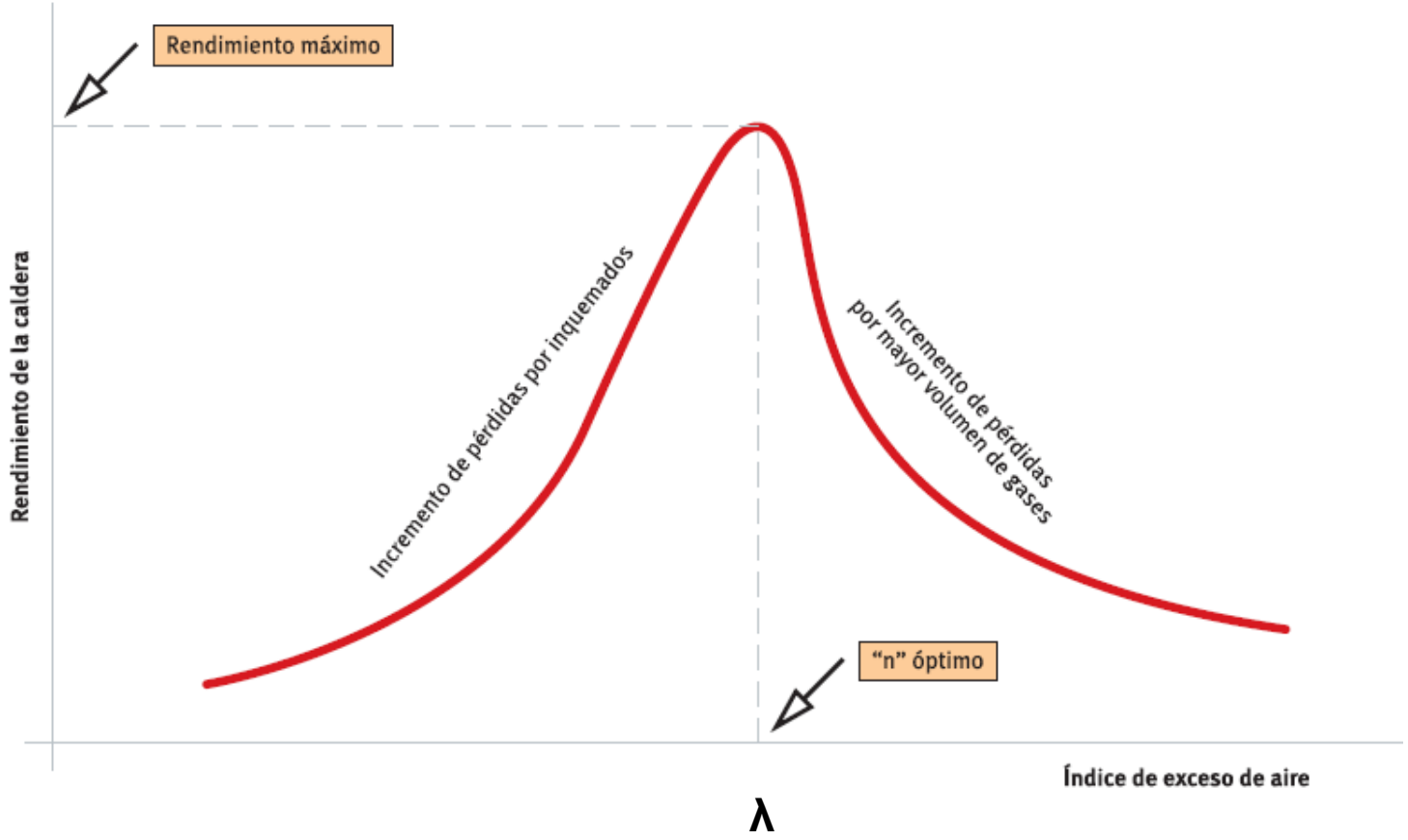
Temperatura del hogar

Para obtener buenos rendimientos de combustión, es imprescindible mantener los niveles térmicos en valores elevados de temperatura. Cuando un hogar está en fase de arranque o está muy sobredimensionado, se ha sobrecargado de combustible o tiene entradas parásitas de aire ambiente, la temperatura del mismo será baja

Las elevadas temperaturas provocan el secado y la descomposición de la materia orgánica con que está formada cualquier tipo de biomasa. Se comienzan así a desprender gases, los cuales, a su vez, también sometidos a las altas temperaturas, comienzan a arder y a generar llama, iniciando el proceso de combustión.

Como norma general, las cámaras de combustión de las calderas de biomasa tienen un rango de temperatura de trabajo óptimo situado entre los 600 y 900ºC. Por debajo de esa temperatura los inquemados y CO aumentan de forma muy patente. Y en el caso contrario, por encima de esa temperatura, se disparan los niveles de NOx por oxidación del nitrógeno del aire, y también provocan la necesidad de usar materiales más resistentes y costosos en la construcción de las cámaras

Mejora de la combustión



Mejora de la combustión

	O2	CO2	CO
GAS NATURAL	2-6%	8-11%	80-100ppm
GASOIL	2-5%	11-14%	80-150ppm
BIOMASA	5 - 10%	11-14%	14 - 272ppm

	GASES / GASOIL		BIOMASA
TIRO	ATMOSFERICAS	ESTANCAS	0,05 - 0,20hPa
	0,03 - 0,10hPa	0,12 - 0,20hPa	

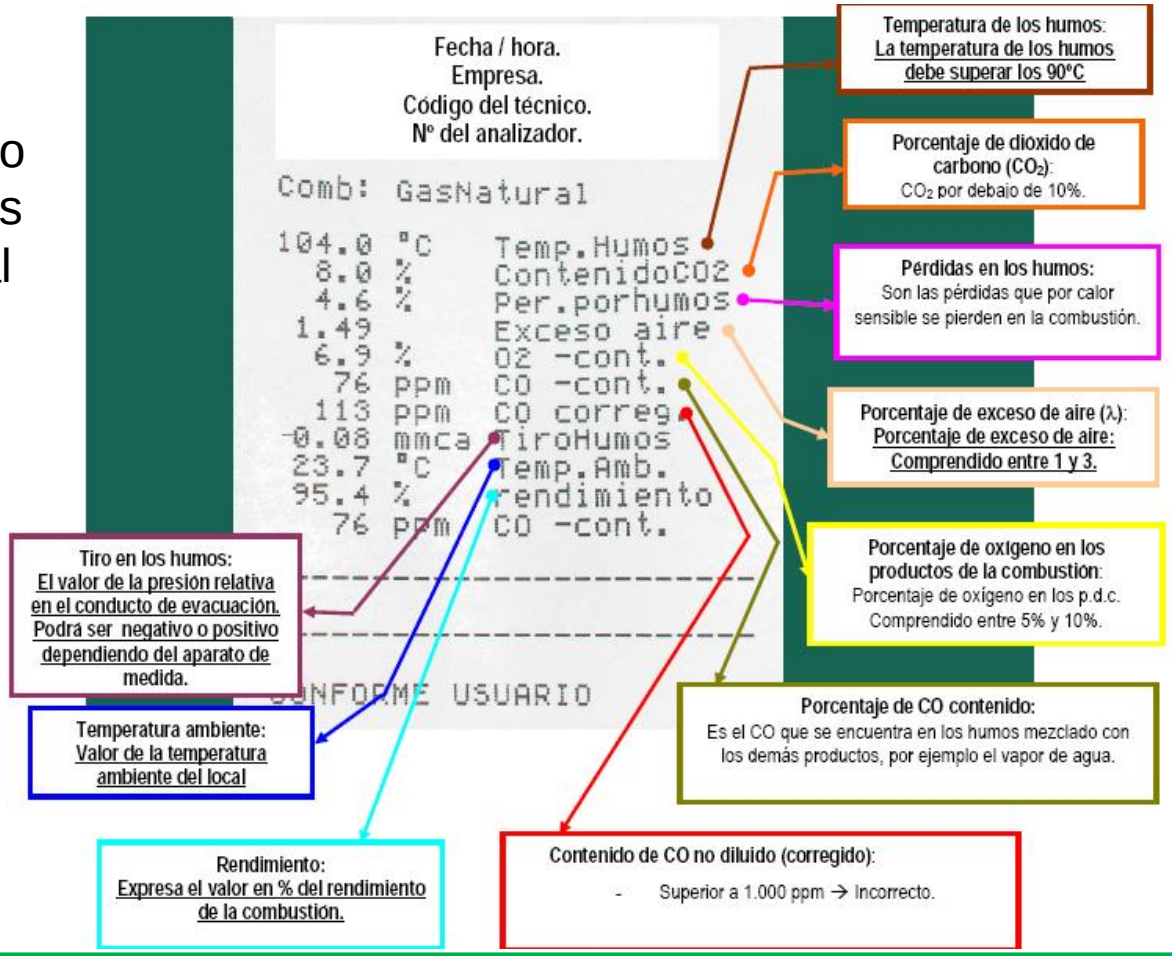
	GASES / GASOIL		BIOMASA
Temp HUMOS	No Condensación	Con Condensación	70 - 150ºC
	90 -150ºC	55 - 65ºC	

	GASES / GASOIL		BIOMASA
RENDIMIENTO	No Condensación	Con Condensación	>90%
	>85%	>95% típico > 100%	

	GASES	GASOIL	BIOMASA
EXCESO DE AIRE λ	1,1 - 1,15	1,15 - 1,30	1,5-2

Mejora de combustión

Ejemplo con gas natural



DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO POR EL CALOR ÚTIL APORTADO AL AGUA (Método directo)

Este procedimiento exige medir el caudal de agua que circula por la caldera, y su temperatura a la entrada y a la salida de la misma. El rendimiento vendrá definido por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T}{F \cdot PCI}$$

donde:

η : Rendimiento (%)
$\dot{m}$: Caudal de agua en la caldera (kg/s)
c_p: Calor específico del agua (kJ/kg °C)
ΔT= Ts - Te (°C)
Ts: Temperatura del agua a la salida de la caldera (°C)
Te: Temperatura del agua a la entrada de la caldera (°C)

F: Consumo de combustible (kg/h)
PCI: Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

Con la instalación de un contador de kilocalorías se puede medir el rendimiento estacionario

DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO POR LAS PÉRDIDAS EN CALDERA Y EN GASES DE COMBUSTIÓN (Método indirecto)

Pérdidas a través del cuerpo de la caldera

Este valor de pérdidas está entre el 1,5 y el 5%, y en calderas de baja temperatura y condensación entre un 0,5 y un 2%. En ambos casos el desplazamiento por el intervalo dado es inversamente proporcional a la potencia de la caldera, es decir, el valor de las pérdidas por convección y radiación disminuye al aumentar la potencia de la caldera

Pérdidas de calor sensible en los humos

Estas pérdidas suelen estar comprendidas entre el 6 y el 10% de la potencia nominal, incrementándose notablemente este valor en caso de mantenimiento deficiente **(LIMPIEZA DEL INTERCAMBIADOR)**

$$P_h = \frac{\dot{m} \cdot c_{pm} \cdot \Delta T}{F \cdot PCI} \quad \text{o} \quad P_h = \frac{\dot{v} \cdot c_{pv} \cdot \Delta T}{F \cdot PCI}$$

Ph : Pérdidas en humos (%)
$\dot{m}$: Caudal másico de los humos (kg/s)
$\dot{v}$: Volumen másico de los humos (m^3/s)
c_{pm}: Calor específico de los humos (kJ/kg °C)
c_{pv}: Calor específico de los humos (kJ/m^3 °C)
$\Delta T = T_h - Ta$ (°C)
T_h: Temperatura de los humos a la salida de la caldera (°C)
Ta: Temperatura del aire ambiente de la sala de calderas (°C)
F: Consumo de combustible (kg/h)
PCI: Poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg)

DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO POR LAS PÉRDIDAS EN CALDERA Y EN GASES DE COMBUSTIÓN (Método indirecto)

Pérdidas por inquemados

En los combustibles líquidos y sólidos la producción de inquemados suele ser visible por la aparición de humos negros. Para estos combustibles también es de aplicación el método BACHARACH que permite la detección de los inquemados sólidos: la muestra de gases se hace pasar por un dispositivo donde los inquemados "manchan" un patrón cuyo nivel de ennegrecimiento comparado en una escala aporta la cantidad de inquemados contenidos en los humos

Índice de BACHARACH	1	2	3	4	5	6
% de pérdidas sobre el combustible	0,7	1,3	2,4	3,5	4,7	6

Con todo ello, el **rendimiento energético de la caldera** vendrá definido por la expresión:

$$\eta = 100 - (P_{rad+conv} + P_h + P_i)$$

DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO POR LAS PÉRDIDAS EN CALDERA Y EN GASES DE COMBUSTIÓN (Método indirecto)

En la práctica, en el sector de la edificación se suele **determinar el rendimiento de la combustión** en lugar del **rendimiento de la caldera**, es decir, se obvia en los cálculos las pérdidas por el cuerpo de la caldera (radiación y convección) dada la dificultad de su medición y la baja incidencia respecto a los parámetros que interesa controlar y que son la cuantía de las distintas materias contenidas en los humos y su temperatura.

De esta forma, el rendimiento de combustión queda simplificado a la expresión:

$$\eta = 100 - (Ph + Pi)$$

Gracias por su atención