

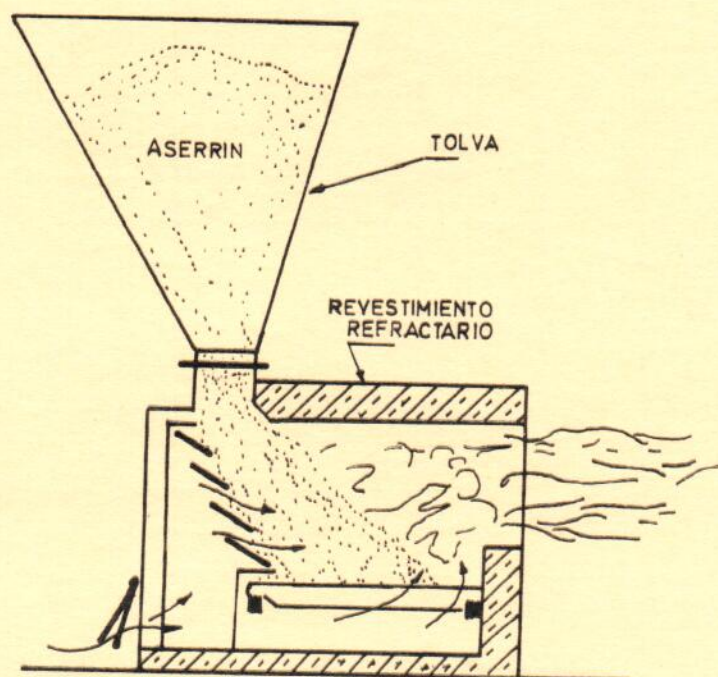


UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

DIRECCION DE EXTENSION

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES

UTILIZACION DE DESHECHOS DE MADERA COMO COMBUSTIBLE



JOSE FERNANDO REYES A.
ING. CIVIL METALURGICO M.Sc.

Departamento de Ingeniería Agrícola

Boletín de Extensión

Nº 8

Chillán , Noviembre de 1985

UTILIZACION
DE
RESIDUOS MADEREROS
COMO COMBUSTIBLE

José Fernando Reyes A.
1985

PROLOGO

El presente boletín pretende contribuir a la difusión de las técnicas disponibles para la utilización de subproductos de la madera con fines energéticos de calefacción, ya sea directa o indirecta y es parte del programa de extensión del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción.

La información tecnológica expuesta aquí, constituye la base para apoyar el diseño y selección a nivel rural especialmente, del equipamiento mecánico para quemar y aprovechar eficientemente este importante recurso energético que muchas veces constituye uno de los insumos más valiosos a nivel pre-dial.

El autor estima que este tipo de contribuciones debería multiplicarse con el objeto de generar información tecnológica energética variada, que sirva para estimular la elevación del nivel de comodidad y productividad del empresario agrícola.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo	Página
1. INTRODUCCION	1
2. CARACTERISTICAS DE LA MADERA	2
2.1 Composición Química	2
2.2 Poder Calorífico	3
2.3 Contenido de Cenizas	4
2.4 Proceso de Combustión	4
2.5 Tamaño del Combustible	5
3. CALCULOS TECNICOS PARA COMBUSTION DE MADERA	6
3.1 Aire Necesario para la Combustión	6
3.2 Exceso de Aire	7
3.3 Productos de la Combustión	7
3.4 Punto de rocío de Gases de Combustión	9
3.5 Temperatura de Combustión Adiabática	9
4. PREPARACION DE LA MADERA COMO COMBUSTIBLE	10
4.1 Proveniencia de los Residuos Madereros	10
4.2 Disponibilidad de Residuos Madereros	11
4.3 Preparación de la Madera	13
5. ALMACENAMIENTO Y MANIPULACION DEL COMBUSTIBLE	16
6. TECNICA DE LA COMBUSTION DE MADERA	17
6.1 Generalidades	17
6.2 Hogares Industriales	20
6.2.1 Horno Holandés	20
6.2.2 Hogar de Celdas en Serie	23
6.2.3 Hogar de Parrilla Inclinada	26

Capítulo	Página
6.2.4 Hogar de Parrilla Escalonada	28
6.2.5 Hogar con Alimentación por Abajo	29
6.2.6 Hogares con Alimentación Mecánica	31
6.2.7 Hogares para Combustión en Suspensión	32
6.3 Hogares para Instalaciones Pequeñas	32
6.3.1 Quemadores de Aserrín	32
6.3.2 Hogares para Leña	35

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	Página
1. Molino de Martillos	14
2. Astillador	14
3. Horno Holandés	22
4. Hogar de Celdas en Serie	22
5. Hogar de Celdas en Serie	25
6. Hogar de Parrilla Inclínada	27
7. Hogar de Parrilla Escalonada	30
8. Hogar con Alimentación, por Abajo	30
9. Hogar para Combustión en Suspensión	33
10. Quemador de Aserrín	33
11. Estufa de Aserrín	36
12. Estufa de Combustión, Ascendente	40
13. Estufa de Combustión Horizontal	40
14. Estufa de Combustión Horizontal con Antehogar	42
15. Estufa de Combustión Descendente	42

1. INTRODUCCION

A raíz del encarecimiento enorme e irreversible del petróleo, todos los países, tanto industrializados como en vías de desarrollo, se han visto en la necesidad de investigar y desarrollar el uso de combustible de reemplazo.

Nuestro país, que cuenta con grandes plantaciones de bosques de pino insigne, aprovechando los residuos que quedan de su explotación, estimamos que puede disponer, como combustible, de una cantidad que alcanza a un equivalente de unas 250.000 toneladas de petróleo al año.

Actualmente, las plantas de celulosa y papel consumen residuos para la generación de vapor. Fuera de ellas existen pocas instalaciones con consumos significativos. El aserrín se aprovecha principalmente en la calefacción de edificios grandes, pero hay sobrantes y, mayores aún, en otros lugares del país donde se elaboran maderas.

Existe un interés cada vez mayor por aprovechar ésta fuente de combustible, debido, principalmente a su bajo precio, aproximadamente un 20% del valor equivalente en petróleo, y por tratarse, además, de un producto renovable. Los sistemas de combustión que se describen abarcan desde quemadores industriales de gran capacidad hasta los pequeños quemadores domésticos. En éstos últimos se ha puesto mayor énfasis en aquellos de combustión continua, que es una técnica que en nuestro medio se ha perdido, pero que ofrece interesantes perspectivas de desarrollo y que en otros países madereros, como Finlandia, es utilizada extensamente.

2. CARACTERISTICAS DE LA MADERA

2.1 Composición Química.

La madera presenta una composición química y propiedades que le dan un carácter especial entre los combustibles.

La composición química elemental no varía mucho entre las diferentes especies forestales. En su composición se pueden distinguir cuatro grupos de componentes: celulosa, hemicelulosas, lignina y extractivos.

La celulosa tiene por fórmula elemental $(C_6H_{10}O_5)_n$, es decir, está formada por unidades de glucosa, en un número que varía entre 700 y 2000. Las hemicelulosas son carbohidratos fácilmente hidrolizables. La lignina es una mezcla de sustancias, relacionadas con los hidratos de carbono, pero con menor contenido de oxígeno. Entre los extractivos se encuentran azúcares, taninos, resinas y otros.

El análisis elemental medio de madera anhidra, sin considerar cenizas corresponde aproximadamente al siguiente:

Carbono 50%, Hidrógeno 6%, Oxígeno 44%

La composición elemental del pino insigne anhidro se ha determinado que corresponde a:

C 50,70% H₂ 5,8%, O₂ 43,00%, N₂ 0,10%, Cenizas 0,4%

El contenido de azufre es prácticamente nulo.

Comparada la madera con otros combustibles sólidos, resalta su elevado contenido de oxígeno, que influye notablemente sobre su poder calorífico y también en el aire necesario para la combustión.

Cuando la madera se somete a calentamiento, desprende gran cantidad de materia volátil, que puede alcanzar a un 80%, o algo más, del peso de la madera seca.

2.2 Poder Calorífico

El poder calorífico de la madera seca de diferentes especies es similar, aunque la presencia, principalmente de resinas, en algunas coníferas, lo hace aumentar.

El poder calorífico inferior, incluyendo al pino insigne, es de 4.400 kcal/kg para madera anhidra, aproximadamente.

El contenido de agua de la madera, es decir, su humedad, tiene gran influencia sobre el poder calorífico, por el calor latente absorbido en su evaporación, que posteriormente no se puede recuperar.

Se puede calcular el poder calorífico inferior mediante la relación:

$$H_{inf} = 4400 - 50 H_m \text{ (kcal/kg)}$$

en la que H_m es el porcentaje de humedad.

La madera con 40% de humedad presenta un poder calorífico de 2400 kcal/kg.

El árbol recién cortado tiene una humedad comprendida entre 50 y 60%.

2.3. Contenido de Cenizas.

El contenido de cenizas de la madera es muy bajo, alrededor de 0,5% en base al peso de la madera seca, lo que constituye una ventaja frente a los otros combustibles sólidos.

El punto de fusión de las cenizas es bajo, alrededor de 880°C, pero en la mayoría de los quemadores, la temperatura a nivel de la parrilla no alcanza a fundirlas.

Su carácter es fuertemente básico por el elevado contenido de carbonato de potasio y sodio y pueden tener efecto corrosivo sobre el material refractario.

2.4. Proceso de Combustión.

En la combustión de la madera se pueden distinguir tres etapas, que, en parte, se traslapan.

La primera etapa es la de secado. Durante el proceso de evaporación del agua hay absorción de calor y la temperatura se mantiene baja, no excediendo de 100°C hasta que termina su evaporación.

La segunda etapa corresponde a la destilación y combustión del contenido de materia volátil. La temperatura aumenta progresivamente y la velocidad de destilación depende de la velocidad con que se suministra calor. El punto de inflamación de los gases es de unos 600°C, de tal manera que en esta etapa, durante una primera fase hay absorción de calor y una vez alcanzada la temperatura de inflamación, en una segunda fase, hay generación de calor.

La materia volátil constituye alrededor de un 80 a 85% del peso de la madera anhidra, por lo que prácticamente casi todo el aire necesario para la combustión es consumido por los gases, sobre la parrilla, como aire secundario.

La tercera etapa se desarrolla después que la mayor parte de la materia volátil se ha desprendido y la superficie del carbón, que queda como residuo, alcanza a la temperatura de ignición, ardiendo a medida que se pone en contacto con el aire.

2.5. Tamaño del Combustible.

Por la forma en que se desarrolla el proceso de combustión, los trozos de madera deben reducirse a un tamaño lo más pequeño posible, limitado por consideraciones técnico-económicas.

El efecto de la reducción de tamaño es que aumenta la superficie del material y su espesor, con lo cual se aumenta la velocidad de evaporación de la humedad y el desprendimiento de la materia volátil, ya que se facilita la transmisión del calor y el transporte de materia.

3. CALCULOS TECNICOS PARA COMBUSTION DE MADERA

3.1. Aire necesario para la combustión.

Partiendo de una composición elemental de la madera de:

C 50,70%, H₂ 5,80%, O₂ 43%, N₂ 0,10% y cenizas 0,4% se supone que todo el oxígeno en el combustible se encuentra en forma de agua, por lo que en 1 kg de madera anhidra hay $0,43 \times (18:16) = 0,484$ kg de agua, o sea el 48,4%.

El hidrógeno libre es $0,058 - 0,054 = 0,004$ kg/kg.

La composición de 1 kg de madera seca es, por lo tanto, la siguiente:

C	0,507 kg
H ₂	0,004 kg
H ₂ O	0,484 kg
N ₂	0,001 kg
cenizas	0,004 kg
<hr/>	
Total	1,000 kg

Para calcular el aire teórico para la combustión, se calcula el peso de oxígeno necesario, que en este caso es de 1,354 kg para el carbono y 0,032 kg para el hidrógeno, total 1,386 kg. El aire está formado por 23% en peso de oxígeno, por lo que el aire para 1 kg de madera seca es de

$$1,386 : 0,23 = 6,03 \text{ kg.}$$

3.2. Exceso de aire.

En la práctica, la combustión de residuos madereros se desarrolla con un exceso de aire, que en la mayoría de los casos oscila entre un 50 y 100% mayor que el aire teórico.

Se define como coeficiente de exceso de aire a la relación entre la cantidad de aire realmente suministrada y la cantidad de aire teórico calculado.

El exceso de aire en la combustión se determina mediante un análisis de los humos con el aparato de Orsat.

El coeficiente de exceso de aire a se puede calcular mediante la relación siguiente:

$$a = \frac{20,4}{\% \text{ CO}_2}$$

El porcentaje de exceso de aire se calcula con la fórmula:

$$\% \text{ exceso de aire} = \left(\frac{20,4}{\% \text{ CO}_2} - 1 \right) 100$$

El contenido máximo de CO_2 en los gases de combustión es de 20,4% en volumen.

3.3. Productos de la combustión.

El peso de los productos de la combustión, por unidad de peso de madera seca (anhidra) debe ser igual a la siguiente suma:

Madera seca	1,00 kg
Agua de humedad (H_m %) de madera	$H_m : (100 - H_m)$
Aire real seco	(Aire Teórico) x (Coef. exceso)
Agua en el aire (H=relac. humedad (Aire Real) x H kg H ₂ O/kg aire seco)	

Suponiendo para el aire de la combustión las siguientes condiciones:

Temperatura	100°C
Humedad	90 %
Relación de humedad	0.007 kg H ₂ O/kg aire seco

La masa de productos de la combustión, por kg de madera seca es:

$$W_C = 1 + H_m : (100 - H_m) + 6,03 \text{ (Coef. exceso)} \times 1.007$$

(kg/kg madera seca)

Por ejemplo:

Calcular el caudal másico de productos de la combustión de 1000 kg/h de residuos madereros que tienen una humedad de 40% en base al peso húmedo.

La combustión se desarrolla con un 100% de aire en exceso.

Solución:

$$W_C = 1 + (40 : 60) + 6,03 \times 2 \times 1.007 = 13,82 \text{ kg/kg}$$

En 1000 kg de madera con 40% de humedad, se tienen 600 kg de madera seca, de tal manera que el caudal de gases de combustión es:

$$W = 600 \times 13,82 = 8.292 \text{ kg/h}$$

La capacidad de generación de calor es:

$$q = 1000 \times 2.400 = 2.400.000 \text{ kcal/h}$$

3.4. Punto de rocío de gases de combustión.

Los gases de combustión de la madera se caracterizan por su alto contenido de vapor de agua, lo que se debe al agua que se forma en la descomposición térmica de la materia que forma la madera y, además, a la humedad que normalmente la acompaña.

El 52,3% de la materia leñosa se desprende en forma de agua.

Debido a esta elevada humedad, el punto de rocío de los gases es más alto que en otros combustibles, tanto líquidos como gaseosos.

El punto de rocío se puede calcular para un rango de exceso de aire desde 0 hasta 100% mediante la siguiente fórmula aproximada:

$$t_r = 51 + 0,38 H_m - 5a \quad \text{°C}$$

Así, por ejemplo, cuando se quema madera con 40% de humedad, en base al peso húmedo, con un 50% de exceso de aire ($a = 1,5$), el punto de rocío de los gases de combustión es de 59 °C.

3.5. Temperatura de combustión adiabática.

La temperatura teórica de combustión de la madera, considerando los calores específicos de los gases a una temperatura media de 600°C y aire para la combustión de

10°C y 90% de humedad relativa, se puede calcular mediante la siguiente relación:

$$t = \frac{4.400 - 50 H_m}{0,00523 H_m + 0,00447 M_m + 0,01633 a M_m} + 10$$

En la que H_m es el porcentaje de agua en la madera, en base al peso;

a es el factor de exeso de aire

La temperatura máxima corresponde a madera seca, $H_m = 0$ y sin exceso de aire, $a = 1$ y alcanza aproximadamente a 2.120 °C.

Madera con 40% de humedad, $H_m = 40$ y con 100% de exceso de aire, $a = 2$ alcanza a una temperatura de 995°C

4.- PREPARACIÓN DE LA MADERA COMO COMBUSTIBLE

4.1.- Proveniencia de los residuos madereros.

El bosque de pino insigne, sin manejo, de 21 a 22 años, se estima que posee 1.300 árboles por hectáreas, los que, al ser cortados, producen 520 toneladas de madera seca de fuste, con corteza.

Como residuos de la explotación maderera, quedan en el lugar 40 toneladas de topes y ramas y unas 10 toneladas de trozos quebrados.

Los desechos en el bosque alcanzan, por lo tanto, a unas 50 toneladas, que pueden ser utilizadas en gran parte como combustible.

La madera de fuste con corteza es utilizada en su mayor parte, alrededor de un 70%, en las plantas de celulosa y papel, es decir, aproximadamente unas 360 t/Ha de las 520 t/Ha. De las 360 t se obtienen unas 36 t de corteza y 7 t de finos, que son utilizados como combustibles para la generación del vapor consumido en los procesos.

La madera procesada en los aserraderos, 160 t/Ha, genera 16 t de corteza, 72 t de madera aserrada, 43 t de astillas y 29 t de aserrín y otros residuos. De las 72 t de madera aserrada, unas 20 t pasan a venta directa y 42 t se elaboran en barracas, produciéndose 8 t de aserrín, virutas y despuntes.

4.2 Disponibilidad de Residuos Madereros.

Por hectárea de bosque de pino insigne, sin manejo, de 21 a 22 años, quedan, en las diferentes etapas de utilización, aproximadamente las siguientes cantidades de residuos:

1. En el bosque, 50 t de madera seca compuestas por topes, ramas y trozos quebrados.
2. En las plantas de celulosa y papel, 43 t, formadas por corteza y finos.
3. En aserraderos y barracas, 53 t, compuestas por corteza, aserrín, virutas y despuntes.

Si se considera que la superficie de bosque explotado anualmente alcanza a 20.000 Ha, la disponibilidad total de residuos que podrían utilizarse como combustible es de $20.000 \times 146 = 2.920.000$ t de madera seca, lo que es equivalente a 700.000 toneladas de petróleo aproximadamente.

Sólo en las plantas de celulosa y papel, los residuos son utilizados, casi en su totalidad, como combustibles para generar el vapor y parte de la energía eléctrica que se consume en los procesos.

Los residuos de aserraderos y barracas se aprovechan en forma muy limitada, lo que se debe principalmente a que la mayor parte de las plantas generadoras de vapor, ya sea para calefacción o potencia han sido diseñadas y construídas para quemar petróleo.

En cuanto a los residuos que quedan en el bosque, éstos, actualmente, se pierden en su totalidad. Para su utilización como combustible es necesario convertirlos previamente en astillas, lo que significa inversión adicional de capital. A éstos se puede agregar la madera que queda en los bosques incendiados.

Es razonable estimar que por razones de transporte, el aprovechamiento, tanto de los residuos de la elaboración de la madera, como los que quedan en el bosque pueden alcanzar a un 50% del total, lo que daría $20.000 \times 103 \times 0,5 = 1.050.000$ t, equivalentes a 250.000 t

de petróleo anuales, lo que corresponde aproximadamente a un 15% del petróleo combustible total consumido en el país.

4.3 Preparación de la madera.

El aserrín y virutas provenientes de la elaboración de la madera en aserraderos y barracas se puede utilizar como combustible sin mayor procesamiento.

El resto de los desechos, como las ramas, topes y trozos quebrados que quedan en el bosque y la corteza que se separa, tanto en los aserraderos como plantas de celulosa y papel, requieren de una reducción de tamaño, ya sea en astilladoras (chippers) o molinos de martillos (hogs). El material astillado facilita su alimentación a los quemadores, una combustión más rápida, y, el transporte y almacenamiento.

La densidad del producto molido varía entre 140 y 300 kg por metro cúbico, dependiendo de la especie, el contenido de humedad y la cantidad de aserrín y virutas que hay en la mezcla.

El tamaño medio de las astillas es de aproximadamente 3/4 de pulgada.

En los Estados Unidos de Norteamérica se utiliza ampliamente el molino de martillos como el que se muestra en corte en la Fig. 1. Al girar el rotor a alta velocidad, los martillos toman una posición radial por la fuerza centrífuga y trituran los trozos de madera golpeándolos y

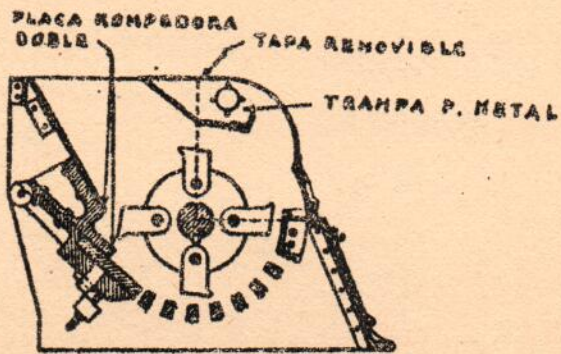


Fig. 1 Molino de martillos

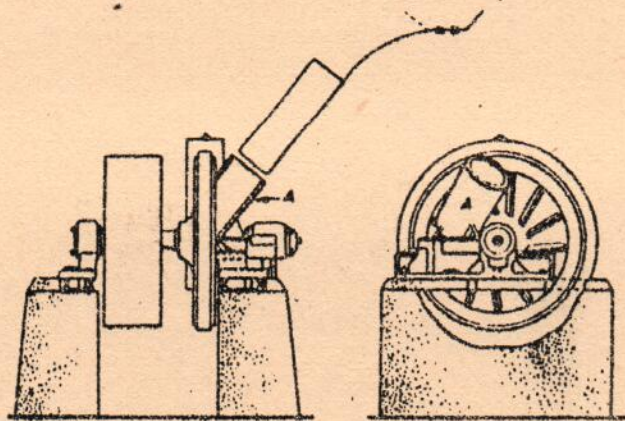


Fig. 2 Astillador

y lanzándolos contra una placa rompedora. La capacidad y el tamaño de las astillas se puede cambiar, alterando el número de revoluciones y el espacio entre las barras que forman la parrilla fija del fondo. Con velocidades periféricas de 56 m/s (11.000 ft/min) y diámetros de rotores (diámetro exterior de martillos) de 24 a 36 pulgadas, las capacidades son de alrededor de 2 a 6 t/h de astillas. El accionamiento es mediante correas o acoplamiento directo a motores eléctricos, con potencias desde 40 hasta 200 HP.

El astillador con cuchillas montadas radialmente sobre un disco giratorio es el equipo de uso universal. Un esquema se muestra en la Fig. 2.

Los trozos se alimentan a través de un tubo inclinado A hacia un disco rotatorio, robusto, vertical, que está provisto de cuchillas radiales, las que cortan y cizallan la madera, transformándola en astillas, las que pasan a través de ranuras detrás de las cuchillas y son arrastradas neumáticamente por un tubo de descarga.

El tamaño de las astillas se puede regular ajustando las cuchillas.

Existe una gran variedad de tipos de astilladores, con capacidades que abarcan desde 5 hasta 200 t/h.

Durante los últimos años se han desarrollado astilladores portátiles, que pueden ser utilizados en los bosques.

El consumo de energía de los astilladores es de 6 a 7 kWh/t y depende de la densidad de la madera, de su humedad, tamaño de astillas y estado de los cuchillos.

Se ha estimado que el costo de astillas producidas con desechos del bosque es de US\$ 6 por tonelada de madera con 20% de humedad y poder calorífico 3.500 kcal/kg.

5. ALMACENAMIENTO Y MANIPULACION DEL COMBUSTIBLE

El combustible se maneja con los mismos equipos y sistemas utilizados para astillas (chips) en las plantas de celulosa y papel.

En una planta típica generadora de vapor, el combustible astillado y mezclado con aserrín y virutas es entregado en una pila de almacenamiento por camiones con sistemas propios de descarga.

Después de descargado el material, se distribuye sobre la pila mediante bulldozers, los que a su vez lo apisonan con lo que disminuye el peligro de incendio. En épocas secas se puede rociar agua para eliminar el polvo producido por el movimiento de los camiones.

El combustible es transportado desde la pila mediante correa transportadora, la que es alimentada por el operador del bulldozer, para pasar a un harnero vibratorio, en el que se separa el material de tamaño superior a 75 mm. Este material de rechazo es transporta

do en una correa a un molino de martillos, con espaciado de barras de 25 mm. La correa transportadora al molino debe estar provista de un detector de metal y un sistema para su detención, antes que ésta alcance a llegar a él y pueda ser retirado manualmente.

El combustible que pasa por el harnero vibratorio es transportado a uno o varios silos cubiertos para su almacenamiento, los que están provistos de descargadores de gusanos múltiples en el fondo.

El combustible puede también ser transportado directamente a la sala de calderas desde la planta de harneado, sin pasar por los silos de almacenamiento, en caso de necesidad.

Cada caldera, a su vez, está provista de un silo o tolva, que es alimentado mediante un transportador repartidor para que la carga se efectúe en una capa uniforme.

6. TECNICA DE LA COMBUSTION DE MADERA

6.1. Generalidades.

Las grandes variaciones de las características de la madera astillada, utilizada como combustible, plantean una tarea difícil para el diseño de una combinación eficiente de hogar y generador de vapor. En uno de los países en que se han utilizado residuos madereros como combustible, en forma ininterrumpida, a lo largo de muchos años, como los Estados Unidos de Norteamérica, se ha llegado a

desarrollar hogares normalizados.

En el diseño de un hogar se debe considerar la forma en que se desarrolla el proceso de combustión y al mismo tiempo es necesario contemplar un margen de exceso de capacidad apropiado para absorber las variaciones debidas a cambio de especies, tamaño y, principalmente, humedad.

Un hogar debe tener flexibilidad suficiente para quemar combustible húmedo y, al alimentarse temporalmente, con madera seca, tanto la parrilla, como el material refractario, deben soportarlo sin sufrir daños que puedan ser de alto costo.

Otro factor importante que debe considerarse es el hecho que la materia volátil de la madera constituye más del 80%, por lo que, prácticamente, todo el aire necesario para la combustión debe ser suministrado sobre el lecho del combustible. Muchos hogares requieren una cámara secundaria de combustión, en la que se completa la combustión de los productos gaseosos.

La experiencia ha demostrado que un hogar para quemar madera húmeda, con 40% o más de agua, no funciona bien con combustible seco, y, al revés un hogar para combustible seco, con menos de 30% de humedad, puede no alcanzar a una carga normal si se alimenta con madera húmeda.

En aquellos casos en que no se puede recurrir al mezclado del combustible, la madera extremadamente seca

se rocía con agua para ajustar su humedad a la que tiene el combustible para el cual fue diseñado el hogar originalmente.

Para la combustión de madera húmeda es necesario proporcionar al combustible la mayor cantidad posible de calor radiante con el objeto de mantener una elevada velocidad de gasificación y evitar la extinción de la llama. Como la temperatura de combustión es baja, no se plantean mayores problemas en relación al material refractorio y al enfriamiento de parrillas.

En el caso de combustible seco, con humedad alrededor del 20%, es necesario aplicar otras consideraciones en el diseño. El problema del enfriamiento de la cámara de combustión es de gran importancia debido a las elevadas temperaturas de combustión. Bajo estas condiciones, la sílice y otros componentes alcalinos de la ceniza de la madera reaccionan, produciéndose una escoria de bajo punto de fusión, que erosiona al material refractario. En la mayoría de los casos se recurre al empleo de paredes refrigeradas con tubos de agua. La localización de las superficies enfriadas con tubos de agua se debe estudiar cuidadosamente con el objeto de mantener una temperatura suficientemente elevada en el hogar para que la combustión sea completa, sin producción de humo, y, a su vez, evitar la destrucción del material refractario.

El volumen del hogar tiene gran importancia para que los gases alcancen a quemarse completamente. Un volumen insuficiente del hogar o de la cámara secundaria da por resultado una combustión incompleta de los gases, produciéndose gran cantidad de humo, aún cuando se trabaje con bastante exceso de aire. Las capacidades de liberación de calor son:

Para madera húmeda astillada	90.000 - 100,000 kcal/m ³
Para madera seca	130.000 kcal/m ³
Para madera seca en hogar enfriado con tubos de agua	220.000 kcal/m ³

6.2 Hogares Industriales

6.2.1 Horno Holandés (Dutch-oven)

Es uno de los hogares más utilizados para la combustión de residuos madereros húmedos, principalmente cuando se trata de corteza.

Consiste en una cámara rectangular, provista de una parrilla horizontal o ligeramente inclinada. El combustible es alimentado a través de una abertura circular, en el centro de la bóveda, y forma un cono, cuyo vértice termina a 15 pulgadas de la bóveda.

Las dimensiones más utilizadas para la parrilla son: 8 pie de ancho por 9,5 pie de largo.

El lecho de combustible en forma de cono, como se puede apreciar en la Fig. 3, no permite el paso

de aire necesario para la combustión. Casi todo el aire, alrededor del 90%, se introduce por toberas en la pared frontal y las paredes laterales, sobre la parrilla. La combustión se desarrolla en la superficie del cono de combustible y los chorros de aire ayudan, además, a barrer la capa de vapor que cubre la superficie, pero su velocidad no debe alcanzar a levantar las partículas que arden o arrastran cenizas.

Para aumentar la radiación de la bóveda sobre la pila de combustible, ésta se inclina a la salida de la celda.

Los gases no alcanzan a quemarse en el hogar, por lo que su combustión completa se consigue en una cámara secundaria, cuyas paredes, generalmente, son refrigeradas con tubos de agua, en calderas de más de 30.000 kg/h de vapor. El volumen de la cámara secundaria se basa en un factor de 1 m^3 por 90.000 a 105.000 Kcal/h de calor entregado al vapor. Al utilizarse aire precalentado se puede disminuir en un 15%.

La intensidad de tiro sobre la parrilla es de aproximadamente 0,5 pulgadas de columna de agua.

La capacidad de combustión de una celda con las dimensiones indicadas en la Fig. 3 depende de la humedad del combustible y de la especie de madera y varía entre 8,5 y $17 \text{ m}^3/\text{h}$.

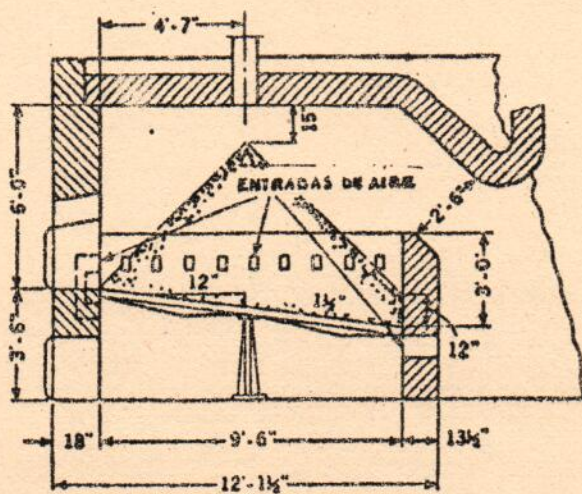


Fig. 3 Horno Holandés

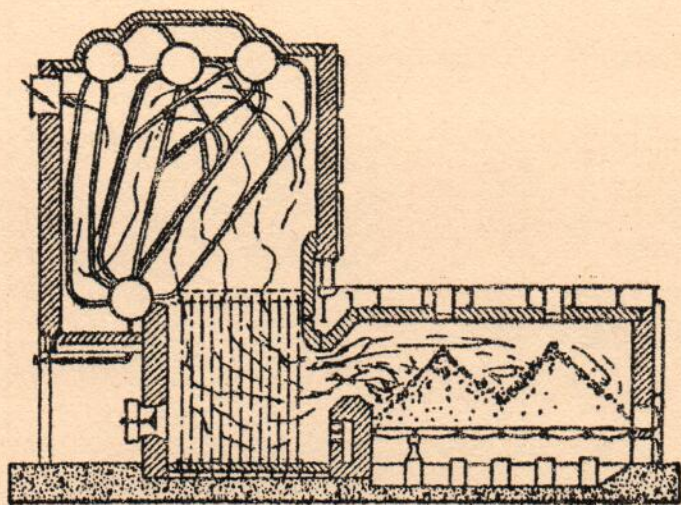


Fig. 4 Hogar de celdas en serie

Para un combustible con 48% de humedad, la capacidad de combustión es de unos $13 \text{ m}^3/\text{h}$ y el calor generado alcanza a unos 5.500.000 kcal/h.

Cuando la cantidad de calor requerida por una unidad generadora de vapor es mayor que la que proporciona una celda, se puede instalar las celdas necesarias en paralelo, lado a lado, con paredes divisorias que separan las pilas y que tienen la altura del altar. Los hogares quedan interconectados.

6.2.2 Hogar de celdas en serie

Se han construido hornos holandeses de forma alargada con 2 ó 3 orificios de alimentación, tal como se muestra en la Fig. 4.

El combustible forma una pila alargada de conos que se traslapan.

Las dimensiones de la parrilla son: 8 pie de ancho por 18 ó 24 pies de largo.

Este diseño permite una gran capacidad de combustión de madera con un ancho reducido, pero su funcionamiento es menos satisfactorio que en las celdas con un sólo orificio de alimentación. En general, su capacidad de combustión, por unidad de superficie de parrilla, se estima en un 90% de la capacidad de las unidades simples.

Una celda, con dos bocas de alimentación y superficie de parrilla de 2 m de ancho por 5,5 m de largo, quemando madera con 50% de humedad, proporciona una capaci-

dad de generación de vapor de 15.000 kg/h a 17,5 kg/cm² de presión y 390°C.

Los gases pasan a una cámara secundaria de combustión, con paredes refrigeradas con tubos de agua, tal como se puede apreciar en la Fig. 4. En la pared del fondo de la cámara secundaria hay instalados quemadores de petróleo, que se utilizan durante períodos de escasez de residuos madereros. Esta pared también es refrigerada con tubos de agua, los que se doblan para dejar libres las bocas de los quemadores.

En la Fig. 5 se muestra otro diseño de celda que ha sido utilizado en plantas de celulosa y papel para quemar residuos húmedos, principalmente corteza. La unidad generadora de vapor está provista además de quemadores para carbón pulverizado en la cámara secundaria de COMBUSTION.

El hogar está formado por dos celdas del tipo horno holandés, con parrillas horizontales de 1,5 m (5 ft) de ancho por 3,65 m (12 ft) de largo.

Quemando una mezcla de corteza, aserrín y otros residuos, con una humedad del 60%, se generan en forma continua 25.000 kg/h de vapor.

Los quemadores de carbón pulverizado pueden funcionar simultáneamente con los de residuos de madera o, en forma independiente, cuando éstos últimos se dejan fuera de servicio.

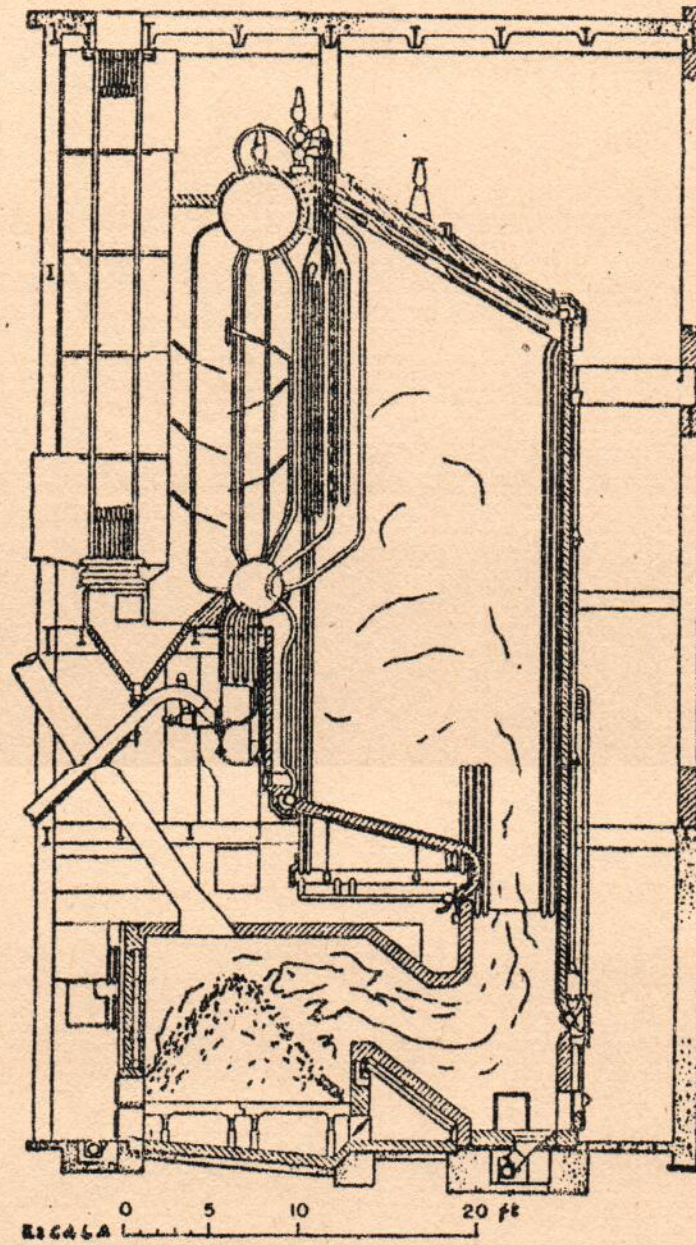


Fig. 5 Hogar de celdas en serie

6.2.3 Hogar de parrilla inclinada.

Para la combustión de residuos con elevado contenido de humedad, se ha encontrado que un hogar provisto de parrilla inclinada trabaja en forma más eficiente que uno de parrilla horizontal con el combustible ardiendo en forma de pila.

Un hogar de este tipo se puede apreciar en la Fig. 6. El combustible se alimenta en la parte superior del frente, a todo el ancho, deslizándose sobre una primera sección de la parrilla, que está formada por una placa inclinada a unos 50° con la horizontal, de material refractorio. En esta sección se produce el secado del combustible. El grosor de la capa de combustible se regula con una compuerta, a la entrada, cuya posición, una vez regulada, no es necesario cambiar.

La sección media de la parrilla está formada por barras fundidas inclinadas en un ángulo de 45° provistas de cortas aletas laterales, que permiten el paso del aire en dirección horizontal.

La sección inferior tiene una inclinación algo menor de 45° y puede estar provista de empujadores de combustible. El fondo de la parrilla está formado por placas abisagradas o deslizantes, que permiten la descarga de las escorias y cenizas y que se extienden hasta el altar.

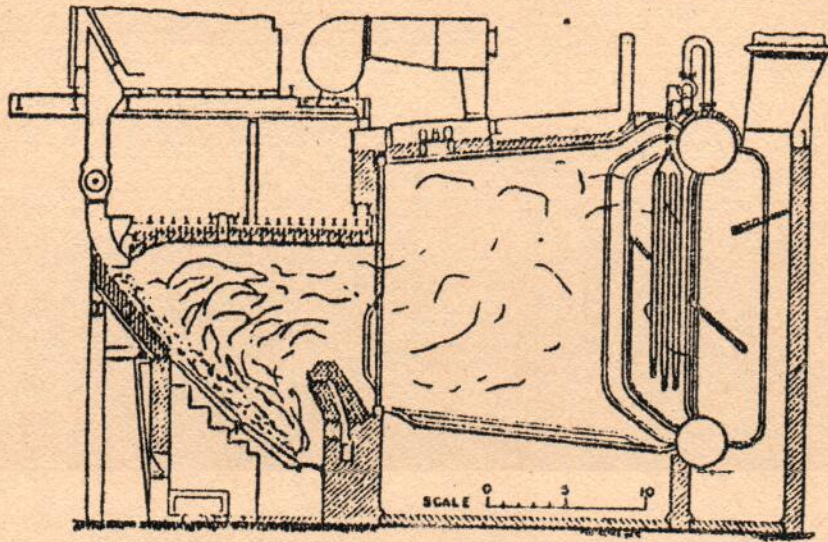


Fig. 6 Hogar de parrilla inclinada

La inclinación variable a lo largo de la parrilla permite mantener una capa pareja, ya que al secarse el combustible, cambia el ángulo del talud.

Parte del aire para la combustión atraviesa las dos secciones inferiores de la parrilla y el resto, se introduce a través de toberas desde la cara frontal del altar, la que es inclinada para que los gases de combustión del fondo circulen hacia atrás y se mezclen con los que se generan en la sección de secado.

La capacidad de combustión de éstas parrillas con un combustible cuya humedad es de 55 a 60%, es de 150 a 220 kg/h por m² de sólidos secos.

6.2.4 Hogar de parrilla escalonada

Son similares a los hogares de parrillas inclinadas y han sido utilizados ampliamente para la combustión de toda clase de combustibles de bajo poder calorífico. La inclinación de la parrilla es la que corresponde al talud natural del combustible. Tiene rendijas de aire horizontales, de manera que el material que se quema no puede caer a través de ellas.

La parrilla está formada por placas de unos 500 mm de largo, 150 mm de ancho y 12 mm de grueso, apoyadas de modo que queda entre ellas una separación de 20 a 30 mm, que permite observar bien el fuego y atizarlo. Los apoyos laterales de las placas son de fundición y tienen salientes sobre las que ellos se apoyan. El fondo termina

en un emparrillado o placas de unos 500 mm de largo, a través del cual se puede descargar los residuos por deslizamiento o giro de las placas.

En la Fig. 7 se puede observar un hogar de parrilla escalonada, tal como se utiliza para madera húmeda como bagazo. La inclinación de la parrilla es de aproximadamente 50°C. El altar lleva toberas para inyección de aire, el que induce gran turbulencia y barre la superficie de la capa de combustible.

Para la combustión de residuos madereros secos, con humedades de alrededor de 25%, el hogar debe ser modificado. La inclinación de la parrilla es menor, entre 45 y 40° y debido a la mayor temperatura y velocidad de combustión de los gases, se puede prescindir de la cámara **primaria** separada de combustión. Las paredes de la cámara de combustión se protegen, en muchos casos, con tubos de agua, para evitar el desgaste excesivo del refractario.

La capacidad de generación de calor de estas parrillas, con residuos madereros, es de 400.000 a 600.000 kcal/h m² con tiro natural, la que puede aumentarse en un 30% con tiro forzado.

6.2.5. Hogar con alimentación por abajo (Stoker)

Se han desarrollado hogares con alimentación por abajo para la combustión de madera triturada, los que han dado excelentes resultados, alcanzándose a capacidades de combustión de 1.000 kg/h m² de residuos con 50% de humedad.

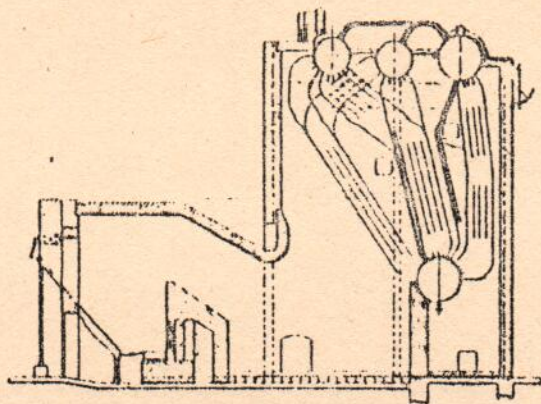


Fig. 7 Hogar de parrilla escalonada

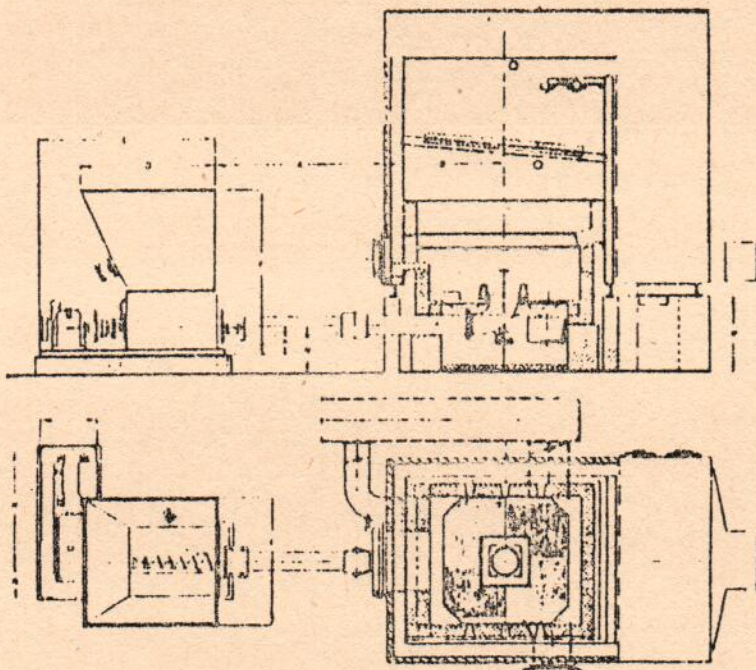


Fig. 8 Hogar con alimentación por abajo

Un émbolo de movimiento alternativo o un gusano impulsa a la madera desde una tolva o silo, a través de un tubo, hasta la retorta, en la cual es presionada, desde abajo hacia arriba, desparramándose sobre la parrilla. El aire para la combustión es suministrado tanto por debajo de la parrilla, como por encima, mediante un ventilador de tiro forzado, tal como se puede apreciar en la Fig. 8.

El funcionamiento puede ser automatizado para mantener la proporción correcta de combustible y aire. La combustión se puede desarrollar en una sola cámara con las paredes enfriadas por tubos de agua.

6.2.6. Hogares con alimentación mecánica

Residuos de madera astillados se pueden quemar sobre parrillas fijas con accionamiento oscilante de descarga o parrillas móviles, desparramándolos sobre ellas mediante lanzadores mecánicos o neumáticos. Las partículas finas de madera se queman antes de alcanzar la parrilla, para lo cual, los lanzadores se ubican en una posición generalmente más elevada que al utilizarse con carbón.

Estos sistemas permiten el empleo alternativo de combustibles, tanto residuos madereros, como carbón o carbonillo.

A la cámara de combustión se inyecta aire por toberas para provocar una mezcla intensa de la masa de gas a medida que se desprende del lecho de combustible.

La granulometría del combustible es importante para asegurar una alimentación uniforme y combustión rápida. El combustible no puede ser excesivamente húmedo.

6.2.7 Hogares para combustión en suspensión

Son hogares en los que se puede quemar aserrín, virutas y astillas de madera seca. La combustión se desarrolla en una sola cámara rectangular y de altura relativamente grande, alimentándose el combustible por tubos colocados en la parte superior de la pared frontal, como se puede apreciar en la Fig. 9. A medida que cae la mayor parte se quema suspendido en los gases y las partículas grandes llegan al fondo donde arden, formando una pila sobre el piso. El aire llega a la cámara a través de toberas ubicadas en la parte de abajo de los muros laterales y sopla sobre la pila de combustible, produciendo además turbulencia que evita la estratificación de los gases de combustión.

El volumen de estos hogares se dimensiona en base a una capacidad de liberación de calor de $135.000 \text{ kcal/h m}^3$. En cámaras con todas las paredes enfriadas por tubos de agua se puede alcanzar a $220.000 \text{ kcal/h m}^3$.

6.3. Hogares para Instalaciones Pequeñas

6.3.1. Quemadores de aserrín

El aserrín puede ser utilizado como combustible

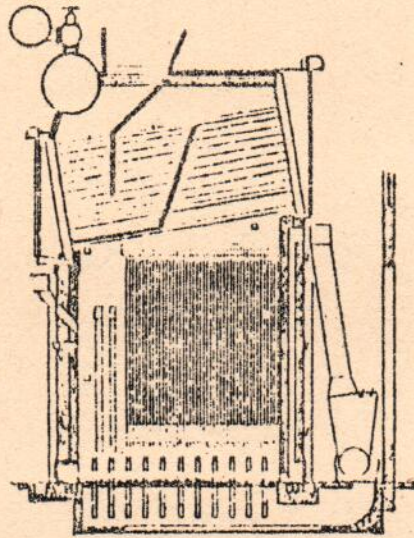


Fig. 9 Hogar para combustión en suspensión

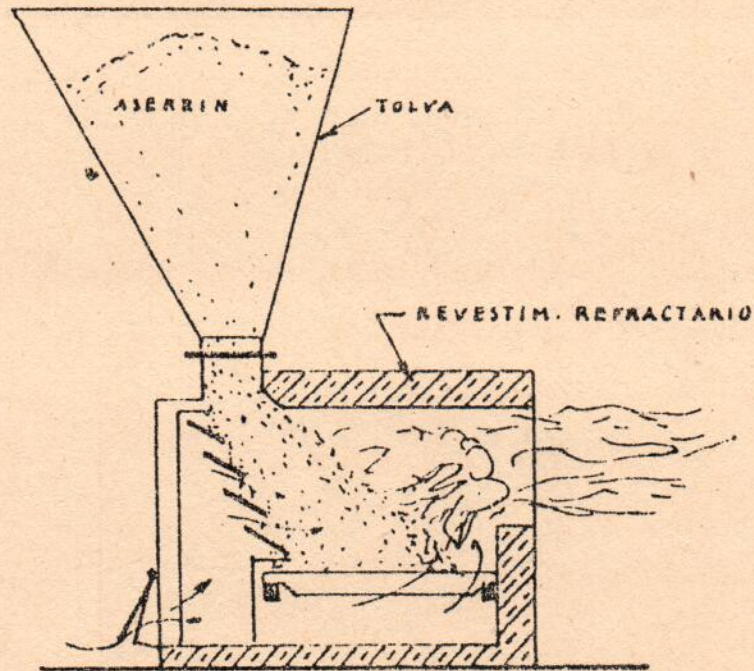


Fig. 10 Quemador de aserrín

para sistemas de calefacción domésticos y también en calderas industriales para la generación de vapor.

En general, los quemadores de mediana y pequeña capacidad están formados por una cámara de combustión, la que contiene parrillas y revestimiento de material refractario. El aserrín escurre hacia la cámara desde un tolva colocada sobre ella, tal como puede apreciarse en la Fig. 10.

En muchos casos, los quemadores se instalan frente a la puerta del cenicero de las calderas (calderas Kewanee) y a éstas se les retira la parrilla que tienen para quemar carbón. El recubrimiento refractario del hogar se une con el del quemador, de tal manera que queda un conducto de humos con un recubrimiento continuo entre el quemador y el hogar.

Cuando el quemador se utiliza para una caldera provista de hogar tubular, como el tipo de caldera escocesa, es necesario utilizar un tubo de conexión revestido interiormente de refractario.

El funcionamiento y control de estos quemadores es simple. A medida que se quema el combustible en toda la superficie inclinada que presenta, dentro de la cámara de combustión, escurre por gravedad combustible fresco desde la tolva. El revestimiento refractario de la cámara hace que se mantenga dentro de ella una elevada temperatura y con un suministro adecuado de aire

secundario, la combustión es completa. El aire secundario se puede introducir sobre el combustible o alrededor de él.

La intensidad de la combustión se controla por el aire admitido al quemador. El tiro óptimo es de 2 a 3 mm de columna de agua sobre la parrilla. La capacidad de combustión es de aproximadamente 150 kg/h m^2 de parrilla, de madera con 30% de humedad.

Para uso doméstico se construyen estufas de aserrín de funcionamiento intermitente, tal como se muestra en la Fig. 11. El aserrín se carga dentro de un recipiente cilíndrico, provisto de un agujero en el fondo. A la carga de aserrín se le deja una chimenea cónica en el centro, la que se forma colocando un tubo, que posteriormente se retira. El recipiente de plancha de acero, cargado, se coloca dentro de la estufa y se enciende por la chimenea de la carga, arriendo progresivamente el aserrín desde adentro hacia afuera.

6.3.2 Hogares para leña.

La combustión de madera en trozos no es muy eficiente en hogares grandes por las siguientes razones: apertura frecuente de las puertas de carga para introducir el combustible y dificultad para mantener un lecho uniforme. Se han ensayado sistemas para alimentar trozos de madera redondos, del mismo largo, abarcando todo

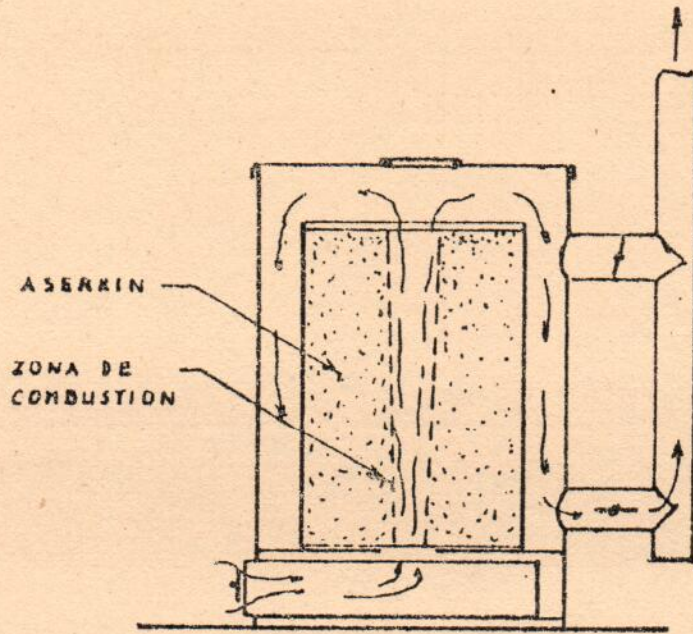


Fig. 11 Estufa de aserrín

el ancho del hogar, pero no han resultado satisfactorios por los excesivos huecos que se forman y que impiden el control del aire para la combustión.

Para uso doméstico, en cambio, la leña, utilizada en trozos pequeños, presenta ventajas, por su mayor facilidad de manejo y almacenamiento y gran simplicidad técnica de los hogares.

Algunos de los problemas que se presentan en quemadores domésticos derivan del hecho que trabajan bajo cargas fluctuantes, de acuerdo con las condiciones meteorológicas, o con las necesidades de una cocina, o calentador de agua u otras. Bajo esas condiciones, resulta difícil mantener permanentemente en el hogar una temperatura superior a la de ignición y, como resultado de ello, los componentes volátiles pasan sin quemarse a la chimenea, produciendo humo y, a veces, condensación del vapor de agua, junto con creosota y alquitrán.

En el diseño y construcción de sistemas domésticos para la calefacción con leña se debe dar primordial importancia a los siguientes factores:

- a) Estanqueidad del hogar. El aire debe llegar al hogar en forma totalmente controlada. Un exceso de infiltración de aire por mal ajuste de puertas hace imposible controlar la velocidad de combustión, sobre todo a baja carga.

b) Dimensionamiento correcto del hogar, parrilla y chimenea.

El hogar debe tener el volumen necesario para que la combustión de los gases sea completa, antes de alcanzar la chimenea. Para mantener, además, una temperatura alta en su interior, debe estar revestido de material refractario y su profundidad debe ser algo mayor que el largo de los trozos de leña que se cargan dentro de él. La parrilla ocupa un espacio menor que la sección del hogar y su largo, generalmente, se ajusta al largo de la madera y se dimensiona en base a las siguientes capacidades de producción de calor:

Estufas	90.000-200.000 kcal/h m ²
Cocinas	200.000-250.000 kcal/h m ²
Calefactores centrales	250.000-300.000 kcal/h m ²

En la mayoría de los casos se prefiere parrillas planas con barrotes que deben tener un espacio abierto entre ellos entre el 25 y 35% de la superficie total. La chimenea debe tener como dimensiones mínimas 20 cm por 20 cm o circular de diámetro de 20 cm y la altura mínima recomendable es 6 m. La intensidad de tiro es de 1 a 3 mm de columna de agua sobre la parrilla. Para calcular la sección transversal se puede utilizar la fórmula:

$$A = \frac{0,04 q}{H} \text{ cm}^2$$

en la que A es la sección transversal en cm²

q es la potencia térmica en kcal/h

H es la altura de la chimenea en m.

c) Suministro suficiente de aire secundario.

Para la combustión completa de los gases es necesario suministrar en suficiente cantidad, aire secundario, el que se debe mezclar intensamente con los gases en las zonas en que estos tienen una elevada temperatura, superior a la de ignición.

Se distinguen tres tipos diferentes de hogares, según la forma en que se desplaza el combustible en relación al aire y gases de combustión.

1. Hogares de combustible Montante o Ascendente. Como se puede apreciar en la Fig. 12, la combustión se desarrolla en todo el lecho de combustible. Es el sistema más simple y más antiguo y para mantener una producción de calor determinada, es necesario cargar continuamente combustible al hogar, de otra manera, la combustión es discontinua.

2. Hogares de Combustión Horizontal. En éstos hogares, el aire primario y el secundario penetran por la puerta del cenicero, a través de una entrada común. El fuego se desarrolla sobre un lecho de brasas en la parrilla y los gases salen por una o más aberturas al lado, en el fondo del hogar, como se muestra en la Fig. 13. En estos hogares se puede desarrollar una combustión regular durante períodos que pueden alcanzar a 24 horas o más.

La Fig. 13 representa una estufa de combustión horizontal. Al fondo de la parrilla, la pared del recipiente de combustible, el que tiene una capacidad de unos 10 kg de madera, se levanta para dar salida a los gases de combustión, los que

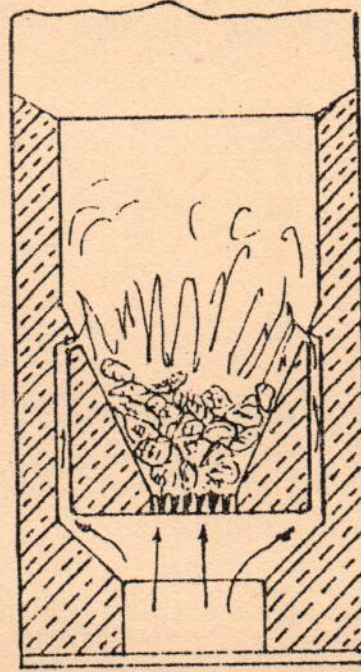


Fig.12 Estufa de combustión ascendente.

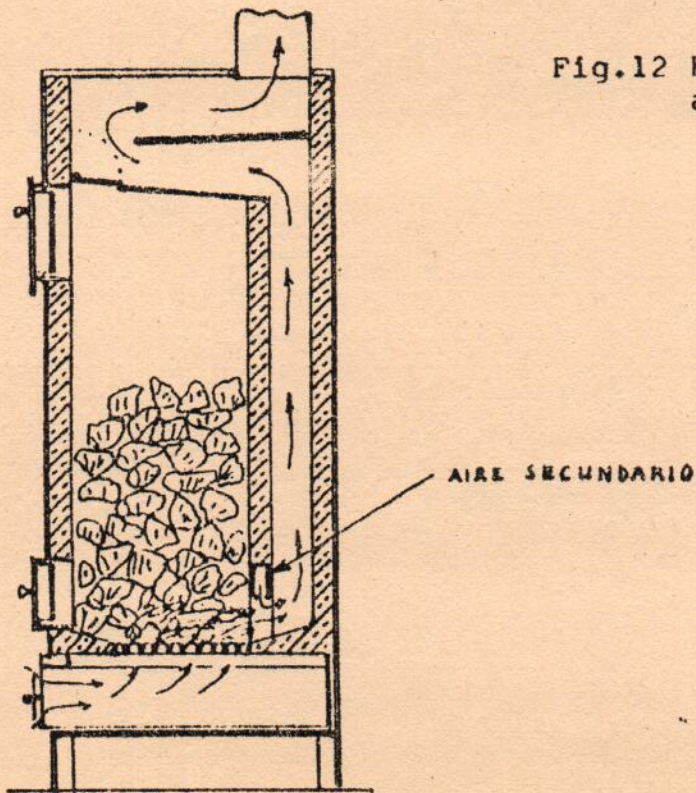


Fig.13 Estufa de combustión horizontal

reaccionan con aire secundario precalentado. Se puede obtener con esta estufa un fuego continuo durante 8 a 12 horas y la eficiencia térmica es del orden de 75%.

La Fig. 14 representa un antehogar con combustión horizontal que entrega calor a una caldera de agua caliente en un sistema de calefacción. Con un volumen de cámara de combustible de $0,8 \text{ m}^3$ se puede mantener calefaccionada una casa habitación de unos 160 m^2 durante 24 horas.

3. Hogares para Combustión Descendente o Invertida.

Son hogares en los que también se puede mantener una combustión continua durante largos períodos. La característica de este sistema, como se puede apreciar en la Fig. 15, es que la combustión se dirige hacia la parrilla, la que está formada por barrotes refractarios para soportar la alta temperatura de la llama. El aire primario se introduce por encima de la parrilla y el secundario llega a los gases desde abajo. Con exceso de aire primario se puede disminuir y aún anular el flujo de aire secundario.

Son hogares poco utilizados para aplicaciones domésticas.

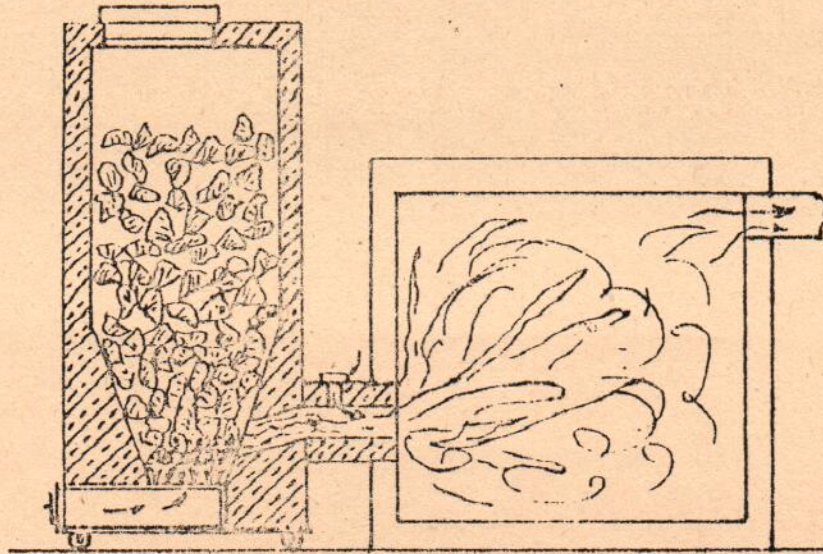


Fig. 14 Estufa de combustión horizontal con antehogar

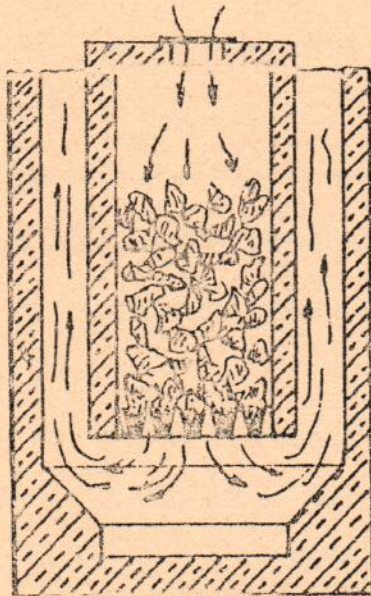


Fig. 15 Estufa de combustión descendente