

APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE RESIDUOS FORES  
TALES PARA OBTENCION DE CARBON VEGETAL

TOMO I - MEMORIA Y PLANOS

PEN

FEBRERO 1984

empresa nacional adaro de  
investigaciones mineras, s.a.  
enadimsa

50301

TITULO	<u>APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE RESIDUOS FORES</u> <u>TALES PARA OBTENCION DE CARBON VEGETAL</u> TOMO I - MEMORIA Y PLANOS
CLIENTE	PEN
FECHA	FEBRERO 1984

Referencia: P-12710

Departamento: UNIDAD DE RESIDUOS SOLIDOS

I N D I C E

	<u>Págs.</u>
1.- INTRODUCCION .....	1
2.- APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE LA BIOMASA .....	4
2.1.- BIOMASA POTENCIAL .....	4
2.2.- PROPIEDADES MAS IMPORTANTES QUE HAN DE CO NOCERSE PARA CUALQUIER TIPO DE TRANSFORMA CION ENERGETICA .....	5
2.3.- RECOLECCION, TRATAMIENTO PREVIO, TRANSPOR TE Y ALMACENAMIENTO .....	10
3.- RECURSOS FORESTALES DE LAS PROVINCIAS DE CACE RES, GUADALAJARA Y HUELVA .....	17
3.1.- CACERES .....	17
3.2.- GUADALAJARA .....	18
3.3.- HUELVA .....	19
4.- CONSIDERACIONES TECNICAS DE LOS TRATAMIENTOS - TERMOQUIMICOS .....	22
4.1.- CONCEPTOS BASICOS .....	22
4.2.- REACCIONES DE PIROLISIS .....	25
4.3.- PRODUCTOS DE LA PIROLISIS .....	26
4.4.- CATALIZADORES DE LA PIROLISIS .....	27
4.5.- PIROLISIS DE RESIDUOS LEÑOSOS .....	29
4.6.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LOS PRO DUCTOS DE LA PIROLISIS .....	30
4.7.- NECESIDADES ENERGETICAS DE LA PIROLISIS .	33

INDICE (CONTINUACION)

	<u>Págs.</u>
4.8.- MATERIA PRIMA .....	33
4.9.- RENDIMIENTOS Y CARACTERISTICAS DE LOS PRO DUCTOS DE PIROLISIS .....	34
5.- PRINCIPALES SISTEMAS DE PIROLISIS .....	45
5.1.- SISTEMA DE LECHO FIJO .....	47
5.2.- SISTEMA DE LECHO AGITADO .....	50
5.3.- SISTEMA DE LECHO FLUIDO .....	52
5.4.- SISTEMA DE LECHO ARRASTRADO O TRANSPORTADO	57
5.5.- SISTEMA DE LECHO VOLTEADO .....	60
6.- PROCESOS DE CARBONIZACION TRADICIONALES .....	62
6.1.- HORNO MISSOURI .....	63
6.2.- HORNO BEEHIVE .....	67
6.3.- HORNO MARK V .....	69
6.4.- RETORTA CONSTANTINE .....	75
7.- PROCESOS DE PIROLISIS .....	79
7.1.- PROCESO TECH-AIR .....	79
7.2.- PROCESO PYRO SOL .....	95
7.3.- PROCESO BAILIE .....	102
7.4.- PROCESO DAUVERGNE .....	104
7.5.- PROCESO ANDCO-TORRAX .....	108
7.6.- PROCESO OCCIDENTAL .....	110
7.7.- PROCESO MONSANTO LANDGARD .....	113
7.8.- PROCESO PAN AMERICAN LANTZ .....	114
7.9.- PROCESO ENTERPRISE .....	116

INDICE (CONTINUACION)

	<u>Págs.</u>
7.10.- PROCESO ERCO .....	119
7.11.- PROCESO PUROX .....	120
7.12.- PROCESO BHP .....	126
7.13.- PROCESO FOREST FUELS .....	129
7.14.- PROCESO CARBON INTERNATIONAL, LTD .....	143
7.15.- PROCESO CARBOTECNICA .....	162
7.16.- PROCESO THERMEX-REACTOR .....	167
7.17.- PROCESO CROSSET .....	175
7.18.- PROCESO REICHERT .....	175
7.19.- PROCESO LAMBIOTTE .....	177
7.20.- PROCESO CONSTANTINE .....	179
7.21.- PROCESO NICHOLS-HERRESHOFF .....	181
8.- CARBON VEGETAL .....	193
8.1.- INTRODUCCION .....	193
8.2.- PRODUCCION .....	195
8.3.- ALMACENAMIENTO .....	201
8.4.- MERCADO .....	203
8.5.- ASPECTOS ECONOMICOS .....	239
8.6.- CONSECUENCIAS DE LAS EXPORTACIONES DE CAR BON VEGETAL PARA LOS PAISES EN VIAS DE DE SARROLLO .....	248
8.7.- FABRICACION DE BRIQUETAS .....	266
8.8.- SITUACION ACTUAL DEL CARBON VEGETAL EN ES PAÑA .....	270

INDICE (CONTINUACION)

	<u>Págs.</u>
9.- ACEITE DE PIROLISIS .....	275
10.- GAS DE PIROLISIS .....	285
11.- ESTUDIO TECNICO DE IMPLANTACION DE UNA UNIDAD - DE CARBONIZACION-GASIFICACION EN ESPAÑA .....	288
11.1.- INTRODUCCION .....	288
11.2.- DATOS TECNICOS BASICOS .....	289
11.3.- DESCRIPCION TECNICA DE LAS INSTALACIONES	292
11.4.- CALCULO DE INVERSIONES .....	294
11.5.- CALCULO DE RENTABILIDAD .....	302
12.- RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	318
12.1.- RESUMEN .....	318
12.2.- CONCLUSIONES .....	331

\* \* \* \* \*

## 1.- INTRODUCCION

La dependencia de nuestro país de los recursos energéticos del exterior hace que las investigaciones sobre nuevas fuentes alternativas de energía adquieran cada día mayor importancia.

En tal sentido, la Empresa Nacional ADARO de Investigaciones Mineras, S.A. (ENADIMSA) ha efectuado numerosos ensayos y experimentos en lo que se refiere a las técnicas de astillado y de combustión directa.

Por tal motivo el Plan Energético Nacional encargó al Departamento de Operaciones de Residuos Sólidos de ENADIMSA, en colaboración con el Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza la realización del Proyecto "Aprovechamiento Energético de Residuos Forestales para Obtención de Carbón Vegetal", por tratarse de una tecnología de gran interés y futuro inmediato, con la que se pretende alcanzar una serie de beneficios energéticos, ecológicos y sociales.

El objetivo fundamental es la obtención de un combustible sólido de muy bajo contenido en azufre y óptimas propiedades para ciertos procesos de fabricación industrial -el carbón vegetal- y un gas de posible aplicación en diversas fábricas e industrias como sustituto del fuel-oil o cualquier otro combustible que consuman.

Asimismo se intenta conseguir una mejora del monte, con reducción de los riesgos de incendios, disminución del número e intensidad de plagas e incremento del rendimiento maderero, además de utilizar una cantidad considerable de mano de obra.

La biomasa es una riqueza renovable que podría desempeñar un importante papel a la hora de satisfacer las necesidades energéticas de cada país. Actualmente se están desarrollando un cierto número de procesos para la transformación energética de la biomasa, tales como la combustión, gasificación, pirólisis y conservación bioquímica.

Su utilización como fuente energética varía de unos países a otros, dependiendo de la disponibilidad de recursos naturales, del grado de desarrollo tecnológico local, del nivel de industrialización y del de vida de cada uno de ellos.

No obstante, la pirólisis de la biomasa no es una idea nueva. Esta técnica se practicó desde los tiempos más remotos de la humanidad. Constituye un proceso no contaminante que transforma los productos y residuos sólidos en unos compuestos limpios, tales como el carbón vegetal, el aceite y el gas.

A finales de la década de los sesenta se realizaron muchos trabajos sobre el contenido celulósico de los residuos sólidos urbanos. Sin embargo, a mitad de los setenta la pirólisis de los residuos agrícolas y forestales adquirió una mayor importancia.

En este informe, primera fase del proyecto, se realiza un estudio de viabilidad técnico-económico y de gestión sobre los residuos forestales de las provincias de Guadalajara y Huelva - respectivamente, tratándose únicamente de todo lo relacionado con la pirólisis o carbonización de dicho tipo de residuos.

En plena ejecución del mismo, se sugirió al Departamento de Operaciones de Residuos Sólidos de ENADIMSA, por parte de SODIEX y algunos particulares interesados en el tema del carbon vegetal, la posibilidad de que el proyecto incluyera también a la Región de Extremadura. Consultada esta petición al ICONA de Madrid, fué aceptada muy favorablemente, sustituyéndose la provincia de Huelva por una de las dos de la Región - de Extremadura, la que fuera más idónea tanto desde el punto de vista de existencia de materia prima (residuos forestales) como desde el técnico (aplicación del gas producido a una determinada fábrica o industria).

Por otra parte, en la provincia de Huelva no se causaba ningún perjuicio, al estar muy avanzado el tema del astillado y su aplicación directa como combustible (combustión directa).

## 2.- APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE LA BIOMASA

### 2.1.- BIOMASA POTENCIAL

Los compuestos a procesar o tratar son bastante numerosos y variables, si bien conviene recalcar que no todos los elementos integrantes de la biomasa son idóneos para el proceso de pirólisis. La selección se debe realizar sopesando muy detenidamente sus propiedades termoquímicas y los aspectos económicos de su recolección y tratamiento previo, antes de penetrar en el horno o retorta.

Los más importantes a considerar son los siguientes:

- Residuos agrícolas de naturaleza leñosa o celulósica.
- Masas y residuos forestales.
- Residuos de las industrias de la madera, tales como serrines, cáscaras y cortezas de árboles, etc.
- Residuos de la pulpa de madera y de las industrias dedicadas a la preparación de alimentos, como las cascarillas de arroz, los huesos de las frutas, las cortezas de los cocos, las cáscaras de cacahuete, etc.
- Cultivos agroenergéticos

Todos estos productos pueden ocasionar serios problemas a la hora de eliminarlos, constituyendo una buena fuente -

potencial para la obtención de combustibles. Por ello, los diferentes programas de transformación energética son un método muy adecuado desde el punto de vista ecológico para la eliminación de todos estos residuos, disminuyendo por otra parte la dependencia de los crudos de importación.

En los bosques se podrían aprovechar otros elementos constituyentes de la biomasa. De esta manera, el rendimiento maderero se podría duplicar eliminando aquellas especies de árboles poco maderables y con escaso o nulo valor comercial. Un plan de transformación energética que tuviera en consideración el aclareo de las especies arbóreas no maderables, serviría para obtener energía de aquellos elementos no deseables de la biomasa, a la vez que contribuiría a un mejor y más rápido crecimiento del bosque en general.

## 2.2.- PROPIEDADES MAS IMPORTANTES QUE HAN DE CONOCERSE PARA CUALQUIER TIPO DE TRANSFORMACION ENERGETICA.

En la selección y obtención de materia prima adecuada para el proceso de pirolisis, es necesario conocer algunas de sus propiedades más significativas, tales como:

- Análisis inicial y final
- Poder calorífico
- Calores de combustión y formación
- Análisis de cenizas

En el análisis inicial se determinan sus porcentajes de humedad, elementos volátiles, cenizas y carbono fijo.

El contenido de humedad representa únicamente el agua libre o ligada físicamente. El agua que se origina al reaccionar químicamente los componentes que contienen hidrógeno y oxígeno, res-

pectivamente, forma parte de los volátiles. El contenido acuoso de la materia prima verde es, por regla general, elevado. El efecto de la humedad sobre la cantidad de calor que se recupera de la materia prima tratada, se refleja en las necesidades caloríficas que se requieren para su evaporación y recalentamiento.

Los datos de algunos análisis iniciales, efectuados en Estados Unidos, con algunos tipos de materias primas carbonosas, fueron los siguientes:

Materia prima	% en peso sobre materia seca		
	Elem. volat.	Carbono fijo	Cenizas
<b>Carbones:</b>			
- Bituminosos de Illinois ...	43,4	44,9	11,7
- Lignitos .....	43,0	46,6	10,4
<b>Maderas secadas al horno:</b>			
- Abeto Douglas o pino del Pacífico .....	86,2	13,7	0,1
- Especies blandas de pino amarillo .....	87,0	12,8	0,2
- Cedro .....	77,0	21,0	2,0
<b>Cascaras y cortezas secadas al horno:</b>			
- Abeto Douglas o pino del Pacífico .....	70,6	27,2	2,2
- Especies blandas de pino amarillo .....	73,4	25,9	0,7
- Cedro .....	86,7	13,1	10,2

De esta tabla se desprende, que los materiales constituyentes de la biomasa poseen un contenido en elementos volátiles mucho más alto que los carbones minerales. Esta propiedad los hace

muy útiles y apropiados para los procesos de pirólisis. Dichos materiales se pueden desvolatilizar fácilmente, obteniéndose un gas combustible y menos residuos con carbono fijo. Su menor contenido en cenizas, significa, que menos partículas se arrastran con los gases producidos en la pirólisis. Asimismo, el problema de eliminación de cenizas es menos grave en la pirólisis de la biomasa - que en el caso de los carbones minerales. Por ello, muchos ingenieros creen que los hornos o retortas se pueden acoplar de forma compacta a las cámaras de combustión, y quemar el combustible sin necesidad de instalar dispositivos anticontaminantes.

Los análisis finales identifican la composición química de la materia prima, utilizándose para calcular el balance químico, necesario en cualquier proceso de transformación termoquímica. - Por regla general se refieren sobre materia seca, pues de lo contrario, el contenido de humedad figuraría como hidrógeno y oxígeno adicional.

Los resultados de los análisis finales efectuados en Estados Unidos con diferentes especies de maderas duras, blandas y carbones minerales, se resumen en la siguiente tabla:

Elementos	Madera dura (% en peso)	Madera blanda (% en peso)	Carbón min. (% en peso)
Carbono ....	50,8	52,9	61,37
Hidrógeno ..	6,4	6,3	5,73
Oxígeno ....	41,8	29,7	17,52
Nitrógeno ..	0,4	0,1	1,02
Azufre .....	Inapreciable	Inapreciable	4,00
Cenizas ...	0,9	1,0	10,36
C/H .....	7,93	6,39	10,71

Al observarla se ve que la relación Carbono/Hidrógeno de los elementos constituyentes de la biomasa es bastante inferior a la de los carbones minerales, siendo la de la madera dura mayor que la de la madera blanda. Esto significa que los carbones minerales tienen mayor poder calorífico, siendo análogamente más elevado el de la madera dura que el de la madera blanda. Puesto que el contenido en azufre de la biomasa es prácticamente insignificante y el de nitrógeno y cenizas es mucho menor que el de los carbones minerales, resulta ser un combustible más puro y limpio que éstos. Por consiguiente, la pirólisis de los elementos constituyentes de la biomasa apenas contaminará el medio ambiente en cuanto a  $SO_x$ ,  $NO_x$  y otro tipo de partículas. El contenido en oxígeno de la biomasa es muy superior al de los carbones minerales. Por tanto, el aceite que se produce en la condensación de los gases desprendidos en la pirólisis será un líquido con gran riqueza en oxígeno y muy ácido. A causa de esto, la cantidad de aire que se necesita para la oxidación de un kilo de biomasa es inferior a la que se requiere para el caso de los carbones minerales.

Los datos de los análisis finales son muy útiles para calcular el poder calorífico de la materia prima. Se conocen dos ecuaciones para determinar su poder calorífico superior a partir de dichos datos. Estas ecuaciones son las siguientes:

- Ecuación de Dulong-Berthelot:

$$\text{Poder calorífico superior (B.T.U/lb)} = 146,76 C + 621 H - \frac{N + O - 1}{8} + 39,96 S$$

- Ecuación I.G.T.

$$\text{Poder calorífico superior (B.T.U/lb)} = 146,58 C + 568,78 H + 29,45 - 6,58. \\ \text{cenizas} - 59,53 (O + N)$$

Los valores de C, H, O, N, S, y cenizas se expresan como porcentaje en peso al efectuar los cálculos que se indican en ambas ecuaciones.

El poder calorífico que se calcula en una bomba calorimétrica es el superior. El inferior es un valor ficticio que se alcanza cuando el vapor de agua de los productos de combustión se puede enfriar a 77°C, permaneciendo completamente en estado de vapor. Por eso, el poder calorífico inferior de un combustible es igual al calor latente mínimo de evaporación del agua. El poder calorífico de los elementos constituyentes de la biomasa no cambia al aumentar el contenido de humedad. No obstante, la disponibilidad de calor lo hace cambiar, al haber menos combustible por peso unitario de materia prima. Por consiguiente, el calor que se recupera de un determinado compuesto con un contenido de humedad del M%, se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Calor recuperado} = (1 - M\%) \times \text{peso de materia prima fresca} \times \text{poder calorífico superior.}$$

De aquí que el poder calorífico de un combustible sea el calor que se libera por unidad de peso cuando se quema y los productos de la combustión se vuelvan a enfriar a la temperatura inicial de la mezcla combustible.

El calor de combustión, la potencia calorífica y el calor de reacción son a veces sinónimos del poder calorífico. El calor que se libera o absorbe cuando un compuesto se forma a partir de sus elementos se denomina calor de formación. Los productos leñosos corrientes, tienen un calor de formación de unas -1.200 Kcal/Kg. El calor de formación de otros elementos constituyentes de la biomasa, tal como la paja y la cascarilla de arroz oscila alrededor de las -1.500 Kcal/kg. En definitiva, el calor de formación dependerá de la relación carbono/hidrógeno que posea la materia prima.

### 2.3.- RECOLECCION, TRATAMIENTO PREVIO, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

Los factores técnicos y económicos relacionados con la recolección, tratamiento previo, transporte y almacenamiento de materia prima, dependen por regla general, de los siguientes hechos y circunstancias:

- Situación de la planta a instalar, según se encuentre próxima a la zona donde exista abundante materia prima o lejos de ella.
- Fuentes de suministro (por ejemplo, si se produce como un producto natural o como subproducto de un proceso industrial).
- Propiedades de la materia prima procedente de la industria, tales como tamaño, densidad, combustibilidad y contenido de humedad.
- Diversidad de materiales: sólo o mezclados entre sí
- Condiciones climáticas de la zona
- Grado de industrialización del País (si es posible mecanizar las industrias existentes).
- Estado de las carreteras, características del terreno y accesos a las fuentes y recursos de materia prima
- Mercados de los productos obtenidos en la pirólisis (carbón, aceite, y gas).
- Nivel de desempleo, alcance de los salarios y formación técnica de los operarios.
- Tiempo de funcionamiento de la instalación (continuo u 8 h/día)

#### 2.3.1.- Tratamiento previo

A diferencia de los residuos de las serrerías, los de las explotaciones forestales no se generan en un lugar determinado, estando generalmente diseminados por todas las regiones de bosques de

un país. Para su utilización conviene prepararlos in situ, mediante el empleo de astilladoras o trituradoras, hasta el tamaño deseado, transportándolos a continuación a la planta de pirólisis por medio de remolques acoplados al tractor.

Los residuos de los aserraderos raras veces necesitan un tratamiento previo si se exceptua la desecación.

En el caso de los agrícolas, como ocurre con los zuros y mazorcas del maíz y con las cañas de arroz y trigo, bastará una sencilla operación de trituración o partición. En las empresas privadas estos materiales se cortan mediante utensilios manuales, utilizando mano de obra barata.

Para mejorar el rendimiento de la recolección y el empleo de los residuos de las explotaciones forestales, se emplean grandes equipos mecanizados. Muchos de ellos se diseñan para astillar árboles enteros. Este proceso de astillado elimina los residuos situados en llano o en terrenos ligeramente inclinados. La recuperación de los procedentes de cortas seleccionadas o de los ubicados en terrenos con bastante pendiente, es más difícil con el empleo de astilladoras mecanizadas.

La reducción de tamaño se realiza comúnmente mediante trituradoras. Las hay de muchos tipos y tamaños. Las que más se utilizan para los residuos son las constituidas por cuchillas y molinos de martillos.

Otro tipo de máquina que también se emplea para estos menesteres son las astilladoras. Constan de un canal de admisión, unas chapas de frotamiento y desgaste, unos yunques y discos, y unas cuchillas. Por regla general, se usan unas cribas o tamices para separar las astillas demasiado grandes y las muy pequeñas.

Tanto las trituradoras como las astilladoras son máquinas - que no precisan mucho mantenimiento. No obstante, conviene señalar que sus cuchillas han de mantenerse afiladas, pues de lo contrario, la máquina se puede atascar y dejar de funcionar.

### 2.3.2.- Transporte

Una vez que se ha efectuado la trituración o astillado, se transporta el material en camiones hasta los silos o depósitos de almacenamiento de la planta de pirólisis. Para largos recorridos se puede acudir al ferrocarril como medio de transporte. También se suelen emplear camiones autobasculantes con una capacidad variable, entre 1,5 y 15 t.

El transporte es el costo más importante que hay que realizar para el suministro o abastecimiento de la planta. En los casos de grandes trayectos se tiende a compactar los residuos triturados o astillados. Esta operación se complica algunas veces en tiempo lluvioso, de nieve o hielo.

### 2.3.3.- Almacenamiento

La cantidad de residuos a almacenar dependerá de la materia prima que se pueda previamente preparar, así como de la calidad y capacidad del equipo que se emplee y de las necesidades del horno o retorta.

Es bastante frecuente almacenar los compuestos previamente tratados, al igual que las cáscaras y cortezas. Durante años, las industrias de pastas y papel almacenaron miles de toneladas de astillas frescas. Algunas plantas que utilizan calderas de leña se aprovisionan con diferentes cantidades de residuos ya tratados, oscilando

lando por lo general entre las necesidades correspondientes a 5 y 60 días, o incluso más. La técnica de almacenar se basa en métodos cómodos y baratos que exigen la realización de numerosos tanteos y pruebas.

Para el almacenamiento de la materia prima, como cáscaras, - cortezas, serrines, astillas y otros tipos de residuos frescos, - se deben tener en cuenta las siguientes circunstancias;

- El suelo es un lugar adecuado. Sin embargo, cuando está muy húmedo puede filtrar la humedad al interior de la pila. También son idóneos los hormigones de color oscuro y los bloques de mampostería.
- Si el diseño se realiza para un largo periodo de tiempo, se deberá instalar dentro de la pila un intercambiador de calor, con el fin de extraer el calor que se produzca en la combustión espontánea.
- Se deben construir dispositivos de ventilación para las pilas. El hielo que se forme sobre su superficie se ha de romper y eliminar.
- Han de evitarse las grandes acumulaciones de partículas pequeñas, procedentes de las cáscaras y cortezas, por ser un gran peligro de fuego.
- En la pila se debe disponer un sistema que registre las diferentes temperaturas de sus distintas zonas. Cuando la temperatura de la pila supere los 93°C, habrán de disponerse dispositivos de rápida ventilación.
- Para pilas muy altas se recomienda diseñar un permanente sistema de ventilación interior. El calor que se desprenda se podrá

emplear para la calefacción de las casas y fábricas durante los meses fríos del año.

En definitiva, se ha comprobado que mediante el adecuado diseño de la pila, el almacenamiento convencional de la materia prima al aire libre puede ser un buen método práctico.

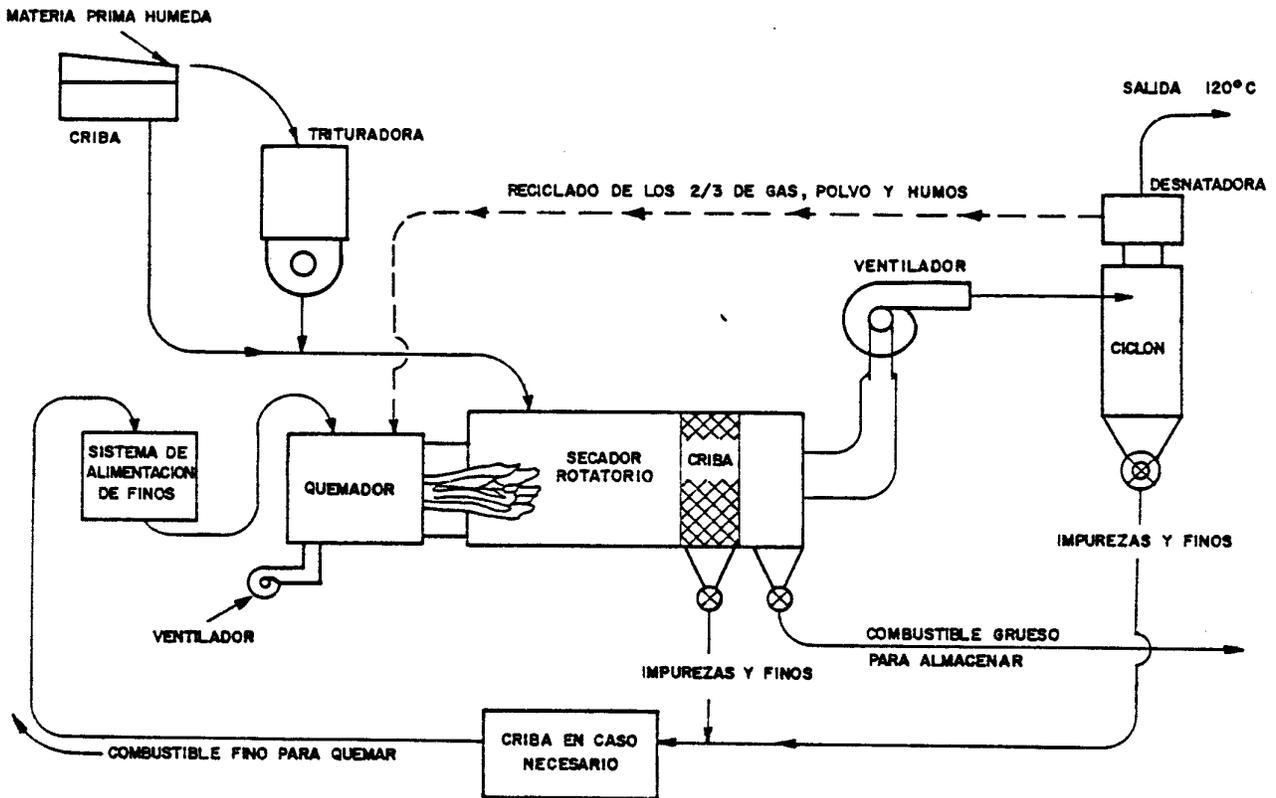
#### 2.3.4.- Secado

En las grandes plantas de pirólisis, la desecación de la materia prima se realiza, por regla general, en un secadero horizontal de tambor giratorio. En la Fig. 1 se muestra uno de los típicos sistemas de desecación rotatorios.

La energía térmica que necesita el secadero se suministra por medio de una cámara de combustión, situada fuera del mismo. Esta cámara puede emplear un combustible fósil, como gas o petróleo, aunque también se puede diseñar para los residuos leñosos secos y para los productos obtenidos en la pirólisis. El proceso de secado es muy caro, con un alto coste de mantenimiento, por regla general.

En las pequeñas plantas, las operaciones de secado se completan en parte mediante la exposición de los residuos al sol y en parte mediante el perfeccionamiento del diseño del secadero de bandejas. Estos secaderos se podrían abastecer con el aire caliente procedente de la refrigeración del aceite de pirólisis o con el producido en el intercambiador de calor con los gases de la combustión. También se podrían alimentar con los propios productos de la combustión.

TIPICO SISTEMA ROTATORIO DE DESECACION



### 2.3.5.- Alimentación y transporte en la planta

La materia prima, una vez desmenuzada y seca, se separa de la corriente de gases calientes que se suministra al secadero mediante un ciclón, para recogerse en un depósito de compensación o almacenamiento. Su transporte al horno o retorta, dependerá de las especificaciones de funcionamiento de estos equipos, Para los depósitos de almacenamiento de fondo móvil es corriente utilizar un transportador de tornillo sin fin. En la industria también se emplean los depósitos con fondo de cadena y accionamiento hidráulico.

El transporte desde zonas exteriores o libres, de productos como los costeros, se realiza comúnmente mediante transportadores de cadena, de cinta y de tornillo sin fin. Para llevar los materiales hasta el transportador, se utilizan también motoniveladoras y palas de carga frontal.

El éxito del proceso de pirólisis dependerá de la velocidad con que se alimente el transportador, que deberá ser lo más uniforme posible. De aquí que sea de una gran importancia la adecuada selección del sistema de transporte de la materia prima hasta el horno o retorta.

3.- RECURSOS FORESTALES DE LAS PROVINCIAS DE CACERES, GUADALAJARA Y HUELVA

Los técnicos de ICONA proporcionan, para incorporar a este informe, los siguientes trabajos que se adjuntan íntegramente - en su totalidad dentro del Anejo nº 2:

- Estimación de las existencias leñosas de pino en los montes de una zona de unos 100 Km alrededor de la ciudad de Plasencia (Cáceres).
- Inventario de Repoblaciones de la provincia de Guadalajara.
- Evaluación de residuos orgánicos para su aprovechamiento integral en la provincia de Huelva.

3.1.- CACERES

En el primero de ellos se realiza una estimación de las existencias leñosas de pino, en montes a cargo del Servicio - Provincial del ICONA de Cáceres, en una zona de unos cien Kms. alrededor de la ciudad de Plasencia.

En dicha estimación se han tenido en cuenta las existencias actuales y su crecimiento probable en el decenio 1984-1993, contando con la continuidad de la ejecución de tratamientos selvícolas, como hasta ahora. En ella se indica el número de referencia de cada monte, sus existencias leñosas de posible extracción durante el periodo citado, y las de cada término municipal considerado, con un total de unos 478.000 m<sup>3</sup> de leña (1984-1993).

### 3.2.- GUADALAJARA

En el segundo de los trabajos se resumen a nivel de monte, grupo y provincia, los datos del inventario de repoblaciones de Guadalajara, que afecta a un total de 84 montes distribuidos en 4 grupos, con una superficie de 15.119 ha y un volumen maderable de 438.452 m<sup>3</sup>. Esta superficie y volumen maderable se desglosan de la siguiente manera:

	<u>Superf. inventariada</u> (ha)	<u>Volúmen maderable</u> (m <sup>3</sup> )
Pinus silvestris	3.059	83.755
Pinus laricio	4.465	122.109
Pinus halepensis	2.564	76.297
Pinus pinaster	5.031	156.291

La información se concreta en los cuatro apartados siguientes:

- Existencias, en donde se indica:

- . La superficie inventariada (en ha)
- . El número de pies (por ha y totales)
- . El área basimétrica (por ha y totales, en m<sup>2</sup>)
- . El volumen maderable c/c (por ha y totales, en m<sup>3</sup>)

- Composición específica, en donde se indican los porcentajes de superficie inventariada y de área basimétrica, por especies.
  
- Composición diamétrica, en donde se indica:
  - . Los porcentajes de pies por clases diamétricas (10 y 15; 20 y 25, 30 y 35)
  - . El diámetro medio (en cm.)
  - . La altura media (en m)
  
- Datos del muestreo, en donde se indica:
  - . La superficie inventariada (en ha)
  - . El número de parcelas relascópicas
  - . El área basimétrica relascópica (en m<sup>2</sup>)
  - . El área basimétrica circular (en m<sup>2</sup>)
  - . El coeficiente de variación de áreas basimétricas relascópicas (en %)
  - . El error típico de muestreo de áreas basimétricas relascópicas (en %)

### 3.3.- HUELVA

En el tercer trabajo se evalúan los restos leñosos procedentes de montes a cargo de ICONA, bien en propiedad, consorciados, o de utilidad pública, susceptibles de aprovechamiento comercial, es decir residuos potencialmente disponibles.

El estudio se realiza en los montes situados en un radio de 20 Km alrededor del pueblo de Niebla, por considerarse este punto centro de una gran masa forestal (100.000 ha), estar bien comunicado, y con centros de consumo del producto que se obtenga en sus proximidades.

En primer lugar se efectua una clasificación de los distintos tipos de residuos forestales según su procedencia y forma de aprovechamiento, indicándose a continuación la distribución superficial de la masa forestal de la zona, así como los fundamentos teóricos y el método operativo llevado a cabo. Posteriormente se calculan por hectárea y año los residuos procedentes de la selección de brotes y cortas de las plantaciones de Eucaliptus, los de las entresacas y cortas de Pinares, los de las podas de los Montes de Quercineas, y los correspondientes a las operaciones de desbroce, con una generación total de 185.103.995 Kg de materia seca al año, que se desglosa de la siguiente manera:

Especie	Superficie (ha)	kg/ha/año	kg/año
Eucaliptus globulus	34.165	2.180	74.479.700
Eucaliptus rostrata	25.735	1.257	32.348.895
Pinus pinea	35.800	2.041,5	73.085.700
Quercus ilex	600	1.636	981.600
Quercus ruber	1.950	2.158	4.208.100

Seguidamente se analizan los costes que representa el aprovechamiento de estos residuos orgánicos mediante el estudio de los tiempos empleados en los trabajos (su realización con azadas hachas, y motosierras, su recogida a mano, y su traslado manual al cargadero) y el cálculo de lo que supone en jornales por hectárea.

Los tiempos medios que se emplean en estos trabajos son los siguientes:

Trabajo	Tiempo (minutos/ha.)
Selección de brotes	1.393
Corta de eucaliptus	1.593
Entresaca de pinar	1.980
Corta de pinar	62
Poda de Quercineas	1.553
Desbroces	643

El número de jornales por hectárea que hay que invertir para realizar estos trabajos es el siguiente:

Especie	Trabajos	Nº jornales/ha
Eucaliptus	Selección de brotes	14,50
	Corta	16,50
Pinares	Entresaca	20,50
	Corta	0,65
Quercineas	Podas	16,20
En todas	Desbroces	6,70

Por último, se estima el rendimiento calorífico de los mis mos, exceptuando los procedentes de los desbroces por no disponer de ningún tipo de dato, con un poder energético medio anual alrededor de las 460.000 MKcal.

#### 4.- CONSIDERACIONES TECNICAS DE LOS TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS

##### 4.1.- CONCEPTOS BASICOS

La pirólisis o destilación seca de los compuestos combustibles sólidos, es un proceso de descomposición térmica in completo, como consecuencia de la transmisión de calor en una atmósfera carente de oxígeno, con la consiguiente formación de diversos líquidos condensables, gases, alquitranes y carbón ve getal.

En realidad es un fenómeno previo a la gasificación. La gasificación de productos carbonosos como la hulla , el lignito, la biomasa, etc., no es más que una pirólisis a la que siguen complejas reacciones, a más alta temperatura, entre el oxígeno y el carbón vegetal, alquitranes y ácidos piroleñosos, previamente producidos. En aquellos casos en que la pirólisis se produce con una gran rapidez, no está muy clara la diferencia entre este proceso y el de la gasificación.

La pirólisis tiene lugar o por aplicación indirecta de calor, como ocurre en el caso de las retortas, o por su utili zación directa, merced a las reacciones de oxidación parcial y de otro tipo que se producen en el interior de los hornos.

Actualmente se engloban bajo el nombre de pirólisis mu chos de los procesos de descomposición térmica que se originan

en una atmósfera pobre de oxígeno o aquellos otros que se producen por transmisión de una parte del calor requerido como consecuencia de la combustión parcial del carbón vegetal y gases producidos.

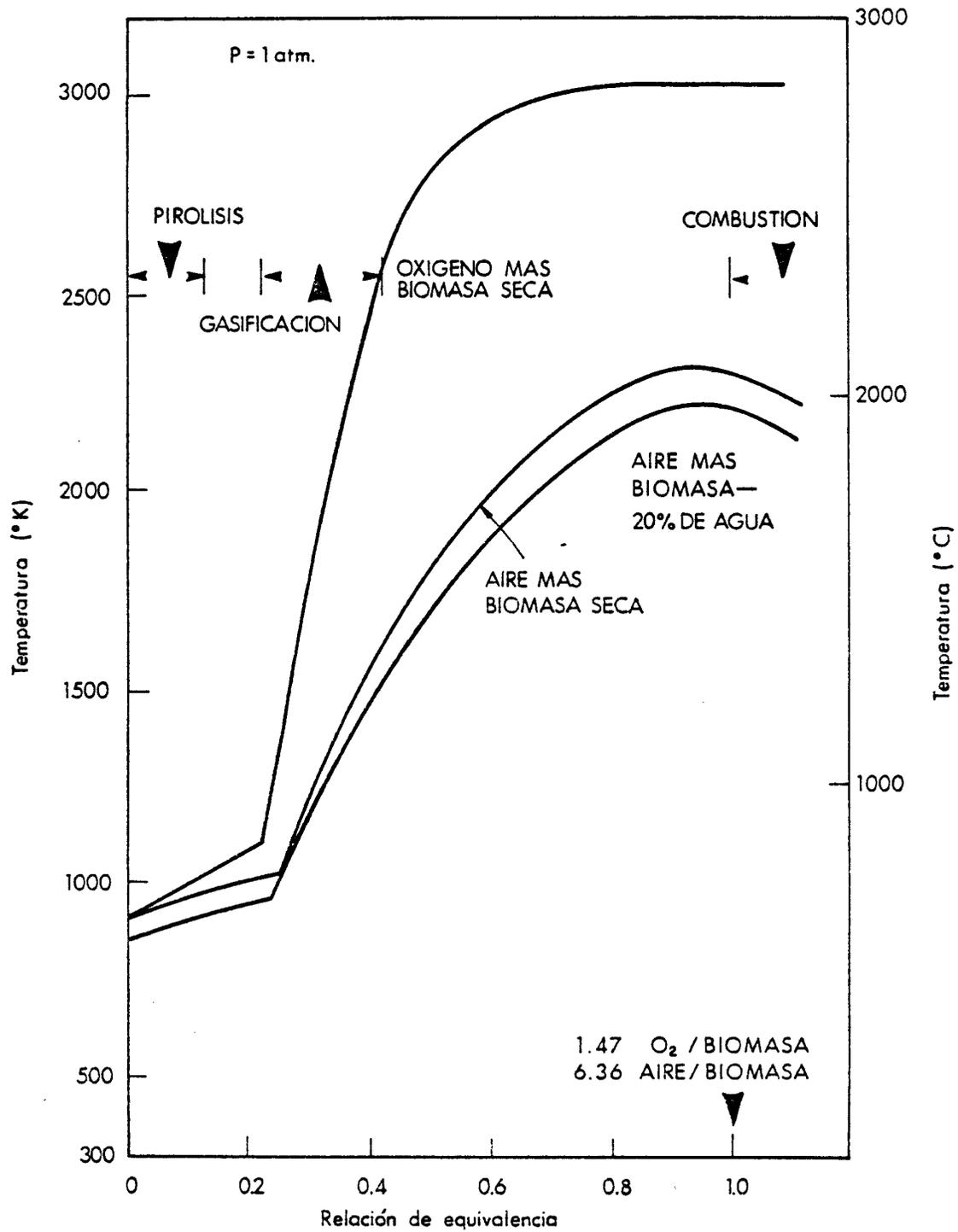
T. Reed y D. Jantzen, han explicado la controversia entre los términos de pirólisis, gasificación y combustión, afirmando que la principal diferencia entre estos procesos es la cantidad de aire utilizado en relación con la cantidad de producto a tratar.

R. Lesrosiers calculó las temperaturas de las reacciones del equilibrio adiabático de los productos leñosos, para varias relaciones de aire/producto a tratar, indicándose los resultados obtenidos en la Figura 2. En ella se observan perfectamente delimitadas las zonas de pirólisis, gasificación y combustión, respectivamente.

La pirólisis se produce cuando el contenido de oxígeno del aire suministrado es inferior al 20% del que se requiere para la combustión teórica completa. Cuando dicho contenido está comprendido entre el 25 y el 50%, tiene lugar la gasificación, mientras que cuando es igual o superior al 100%, se habla de combustión propiamente dicha.

También se indican las temperaturas de las reacciones adiabáticas de los productos leñosos frescos y desecados que se alcanzan en los reactores al inyectar aire y oxígeno, respectivamente. Se observa que dichas temperaturas son más elevadas en el primer caso que en el segundo, como consecuencia de la dilución del nitrógeno.

TEMPERATURAS DE LAS REACCIONES ADIABATICAS DE LA BIOMASA



$\frac{\text{Contenido de Oxígeno del aire que se suministra}}{\text{Oxígeno que se necesita para la combustión completa}}$

#### 4.2.- REACCIONES DE PIROLISIS

Cuando cualquier elemento constituyente de la biomasa se somete a un proceso de pirólisis, se producen las siguientes reacciones:

Biomasa + calor → Carbón vegetal + Crudo (líquidos orgánicos de elevado y medio peso molecular) + otros compuestos oxigenados orgánicos condensables.

Líquidos orgánicos + calor → Compuestos orgánicos aromáticos + líquidos orgánicos de bajo peso molecular + CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O y otros.

CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O → CO + 3H<sub>2</sub> (reacción endotérmica)

CO + H<sub>2</sub>O → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> (reacción ligeramente exotérmica)

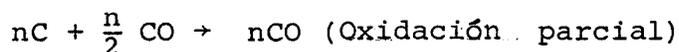
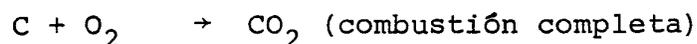
Por otra parte, las reacciones que se producen durante la gasificación del carbón vegetal son por lo general las siguientes:

C + 2H<sub>2</sub>O → CO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub> (reacción endotérmica)

C + H<sub>2</sub>O → CO + H<sub>2</sub> (reacción endotérmica)

C + CO<sub>2</sub> → 2CO (reacción endotérmica)

Los procesos de pirólisis y gasificación necesitan para su realización del aporte calorífico que suministran las siguientes reacciones:



#### 4.3.- PRODUCTOS DE LA PIROLISIS

Los rendimientos de los productos de la pirólisis dependen de las características de los componentes a tratar, tales como estructura química, tamaño, estado, temperatura de descomposición térmica y velocidad de calentamiento. Aproximadamente el 45-60% de dichos productos se presentan en forma líquida o gaseosa.

La pirólisis es un proceso endotérmico o exotérmico, según las circunstancias. Existen dos tipos de pirólisis: lenta y rápida. Una pirólisis lenta, a elevada temperatura y orientada hacia la producción de carbón vegetal, es un proceso exotérmico. Por el contrario, una pirólisis rápida y orientada principalmente hacia la producción de gas, es un proceso endotérmico.

La producción de líquidos orgánicos de elevado y medio peso molecular, se puede maximizar por calentamiento rápido y de corta duración (500-550°C), y posterior enfriamiento de los gases y vapores condensables. Es precisamente este rápido enfriamiento el que evita la desintegración térmica de los líquidos orgánicos.

La producción de gases incondensables se puede maximizar por pirólisis del carbón vegetal y de los componentes volátiles, a elevadas temperaturas (700-1.000°C) y altas velocidades de calefacción.

La pirólisis de los productos leñosos a bajas temperaturas y velocidades de calefacción (del orden de 0,1-2°C/seg.) , origina.. altos rendimientos en la producción de carbón vegetal. Cuando tiene lugar a la temperatura de 510°C, se obtiene un rendimiento del 32%, aproximadamente, mientras que cuando se eleva a 910°C, disminuye hasta un 25%.

Algunos de los resultados que ocurren al calentar los compuestos combustibles sólidos en un horno o retorta, son los siguientes:

- . Productos leñosos frescos + calor → productos leñosos secos + vapor. La pérdida de la humedad superficial se produce a los 100°C.
- . Productos leñosos secos + calor → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O  
Entre los 100 y 250°C, los compuestos leñosos pierden la mayor parte de su contenido de dióxido de carbono y vapor de agua.
- . Productos leñosos secos + calor → Carbón vegetal + Acidos piroleñosos + Alquitranes + Gases (CO + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + CH<sub>4</sub> + C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>).

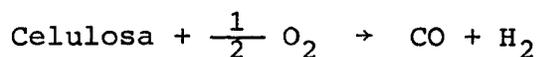
Todos estos procesos tienen lugar a la presión atmosférica.

#### 4.4.- CATALIZADORES DE LA PIROLISIS

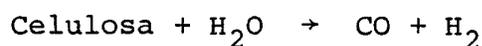
Conviene hacer especial hincapié en que el rendimiento de los productos de pirólisis varía con el empleo de catalizadores, agentes oxidantes (aire, agua y oxígeno), agentes reductores (hidrógeno y monóxido de carbono) y altas presiones.

En estos casos, al tratar la celulosa, se producirían las siguientes reacciones:

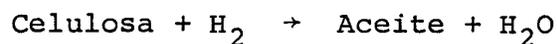
. Proceso de oxidación parcial:



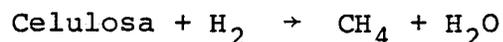
. Proceso de hidrólisis:



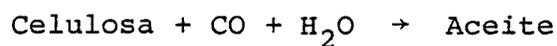
. Proceso de hidrogenación a elevada presión:



. Proceso de hidrogasificación a elevada presión:



. Proceso de hidro-oxigenación a elevada presión:



Cuando la pirólisis tiene lugar a baja temperatura, las reacciones de oxidación parcial e hidrólisis, producen en primer lugar gases combustibles con una gran cantidad de líquidos oxigenados. En el caso de la hidrogenación, cuando se verifica a 300-350°C y 200-300 atm, se obtendrá aceite y gas metano.

Los principales factores que influyen en la pirólisis de los compuestos leñosos son: su composición, clasificación botánica (familia, género y especie), poder autocatalítico (cambio de reactividad, a temperatura constante, que experimentan

los productos leñosos, desde la superficie al núcleo), estructura física y presión a la que tiene lugar el proceso.

#### 4.5.- PIROLISIS DE LOS RESIDUOS LEÑOSOS

El fundamento de la carbonización de la leña es el mismo cualquiera que sea el método de producción que se utilice.

En primer lugar, se necesita evaporar todo su contenido de humedad. La leña fresca puede contener desde un 60 hasta un 120% de agua, sobre una base completamente seca. Mientras que ésto no se consiga, su temperatura no se eleva muy por encima del punto de ebullición del agua. Efectuada esta operación, sube rápidamente a 170°C, temperatura a la que podría encenderse la materia prima en presencia de aire.

En los hornos, en estas condiciones, se enciende ahora una parte de la leña y en el resto de la carga aumenta con gran rapidez la temperatura, una vez que se ha iniciado su proceso de descomposición, hasta alcanzar los 270°C. Se trata de una reacción fuertemente exotérmica que hace que continúe y finalice la carbonización, incrementándose la temperatura a unos 400°C, aproximadamente. Si el control se ha llevado a cabo de una forma correcta, el carbón vegetal que se obtiene contiene por norma general un 75-80% de carbono fijo, escasas cenizas y un 25-20% de elementos volátiles (incluidos los alquitranes y gases, tales como el monóxido de carbono y el metano). Cuando el rendimiento se expresa como porcentaje de la materia prima que entra, está directamente relacionado con su contenido inicial de humedad. Salvo en el caso de que se obtenga una temperatura bastante elevada y durante un largo período de tiempo, parte de la leña se carboniza solo parcialmente, con la formación de unos tizones o teas. Este hecho se puede atribuir a un

calentamiento inadecuado del horno. La producción de carbón vegetal con un 80% de carbono fijo es prácticamente la misma para todos los tipos de leña que tengan alrededor de un 40% de materia seca.

Nuevos aumentos de temperatura, solo posibles en las re tortas, se necesitan para disminuir los volátiles e incrementar el contenido en carbono fijo. Un límite práctico es el del 95% de carbono fijo a una temperatura de 650°C. Después de esto, nuevos incrementos de temperatura solo aumentarán en muy pequeña proporción el contenido en carbono fijo.

#### 4.6.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LOS PRODUCTOS DE LA PIROLISIS

La influencia que ejerce la temperatura que se alcanza en el proceso de carbonización, sobre la composición del carbón obtenido es la siguiente:

Temperatura de carbonización	Rendimiento de carbón vegetal en % sobre peso mat. seca	Contenido en carbono fijo % en peso	Contenido en volátiles % en peso	Contenido en cenizas % en peso	Poder calorífico Kcal/kg
400°C	40	78	21,5	0,5	7.520
450°C	35	82	17,5	0,5	7.910
550°C	31,5	88,5	11,0	0,5	8.100
650°C	28	95	4,5	0,5	8.290

El carbón que se produce en las retortas, se tiene que enfriar en su interior a la temperatura ambiente, o en un recipiente cerrado carente de oxígeno, bien por irradiación externa o más rápidamente haciendo circular por él un gas frío des provisto de oxígeno.

Cuando un carbón bien elaborado se enfría y expone al aire absorbe algo de oxígeno, pero pronto se estabiliza sin experimentar ninguna combustión espontánea. También absorberá alguna humedad de la atmósfera, pero no en gran cantidad si se introduce rápidamente en unas tolvas o depósitos de almacena miento.

Una vital diferencia entre la producción de carbón vegetal en un horno y en una retorta, es la distinta cantidad de materia prima que se requiere para producir la misma cantidad de carbón. En el horno se necesita, aproximadamente, de 2 a 3 veces más toneladas de aire-leña seca, para producir 1 t de carbón vegetal, que en la retorta, siendo esta última un proce dimiento más eficaz desde el punto de vista térmico.

En Australia, una buena retorta necesita de 3,25 a 3,50 t de aire-madera de eucalyptus, con un 25% de humedad, por to nelada de carbón producido.

En trabajos realizados por la F.A.O. en Uganda, con el empleo del horno portátil de acero Mark V, se ha visto que se requieren 12 estéreos de maderas duras tropicales (12 m<sup>3</sup> de leña apilada) para obtener una tonelada de carbón. Por el contra rio, en Estados Unidos, con el horno Missouri se necesitan al rededor de 8 estéros de madera dura, por tonelada de carbón, y en Brasil, con el horno Beehive, unos 7 estéreos de madera de eucalyptus por tonelada de carbón producida.

No obstante, hay que señalar que el peso de un estéreo varía con la especie y contenido de humedad de la madera, así como con el tamaño y forma de los fragmentos o tarugos. El estéreo, que es  $1,43 \text{ m}^3$  de madera apilada en forma de zoquetes, se considera que tiene  $1 \text{ m}^3$  de leña consistente.

#### 4.7.- NECESIDADES ENERGETICAS DE LA PIROLISIS

El funcionamiento de la retorta requiere algún aporte adicional de calor para aumentar la energía calorífica que proporciona la reacción exotérmica que tiene lugar en su interior. Ello se puede conseguir mediante el empleo de los gases que se desprenden en el proceso. Dicho aporte también se puede lograr, según las circunstancias de cada caso concreto, con gas de altos hornos, gas natural, gas pobre, aceite, alquitranes de la madera y gases de combustión.

Las necesidades caloríficas totales de los hornos y retortas, dependen en gran medida del contenido inicial de humedad de la leña. En el secado, se recomienda disminuir su contenido acuoso por debajo del 15%, aunque normalmente se deja en un 20-25%. Bajo unas condiciones apropiadas, la leña con un 8,5% de humedad, se puede carbonizar por completo en la retorta, sin necesidad de aportar calor adicional, una vez que la reacción exotérmica ha empezado.

#### 4.8.- MATERIA PRIMA

Por lo que respecta a la materia prima, se puede clasificar en términos generales en dos grandes grupos: maderas duras y maderas blandas.

La mayor parte de las maderas blandas, como los pinos -

de hoja larga y de hoja corta, las cáscaras de nuez, los huesos de fruta, los residuos vegetales, los de las serrerías y fábricas de papel (serrín, astillas, cáscaras y cortezas), no se pueden destilar provechosa y eficazmente, a excepción de las que contienen resinas. En la destilación de éstas se obtiene trementina, aceite de pino y aceite de colofonia.

Por el contrario, las maderas duras, tales como las de abedul, haya, arce, nogal, roble, etc., son las más apropiadas para este tipo de transformación o tratamiento.

El rendimiento de la madera blanda es inferior en más de un 50%, en el mejor de los casos, al de la dura, por lo que no se suele utilizar.

En Estados Unidos, la relación madera dura/madera blanda que se destila es de 4 a 1.

#### 4.9.- RENDIMIENTOS Y CARACTERISTICAS DE LOS PRODUCTOS DE PIROLISIS

Muchos de los componentes de la biomasa, como es el caso de los compuestos leñosos, están constituidos fundamentalmente por los tres polímeros siguientes: celulosa, hemicelulosa y lignina. Cada uno de ellos tiene una composición química diferente según la función que desempeñen en la vida de las plantas. Estas diferencias son las que dan lugar a distintos rendimientos en los productos de pirólisis. Se puede indicar a título orientativo, que aquellos compuestos leñosos que contengan un 24% de lignina, producirán un 22% de carbón vegetal (un 11% procedente de la lignina y el otro 11% de la celulosa) y un 78% de elementos volátiles (un 13% procedente de la lignina y el 65% restante de la celulosa).

La hemicelulosa es la que se descompone en primer lugar, a 200-260°C, haciéndolo a continuación la celulosa a 240-350°C, y finalmente la lignina a 280-500°C.

En muchos ensayos de laboratorio se ha estudiado el efecto de la temperatura sobre el proceso de descomposición térmica, y la influencia de la velocidad de calentamiento de la celulosa con relación al rendimiento y composición del carbón vegetal. En las Figuras 3 y 4 se expresan los resultados experimentales obtenidos al analizar la influencia de la temperatura sobre el rendimiento y contenido en carbono del carbón vegetal. Asimismo, en la Tabla 1 se indica la incidencia de la velocidad de calentamiento respecto al rendimiento y composición del carbón vegetal.

Análogamente, en las Figuras 5 y 6 se refleja la influencia de la temperatura sobre el rendimiento y poder calorífico de los productos obtenidos en la pirólisis rápida del papel.

Aunque la forma de las curvas de las Figuras no es idéntica, las pendientes principales de dichas curvas sí que son parecidas. Ello se debe a que los compuestos celulósicos experimentan una deshidratación y ruptura de los grupos -OH y -CH<sub>2</sub>OH, a la temperatura de 250°C, seguida de una despolimerización alrededor de 250-370°C. Estos hechos, aumentan en realidad el contenido en carbono del carbón vegetal al incrementarse la temperatura de la pirólisis.

Los datos de la Tabla 1 reflejan la disminución del rendimiento del carbón vegetal, tanto en peso total como en peso de carbono, como consecuencia del incremento de la velocidad de calentamiento. En el caso de la pirólisis de la celulosa se

ha observado que el rendimiento en carbono del carbón vegetal se ha reducido considerablemente, al multiplicar por 100 la velocidad de calentamiento.

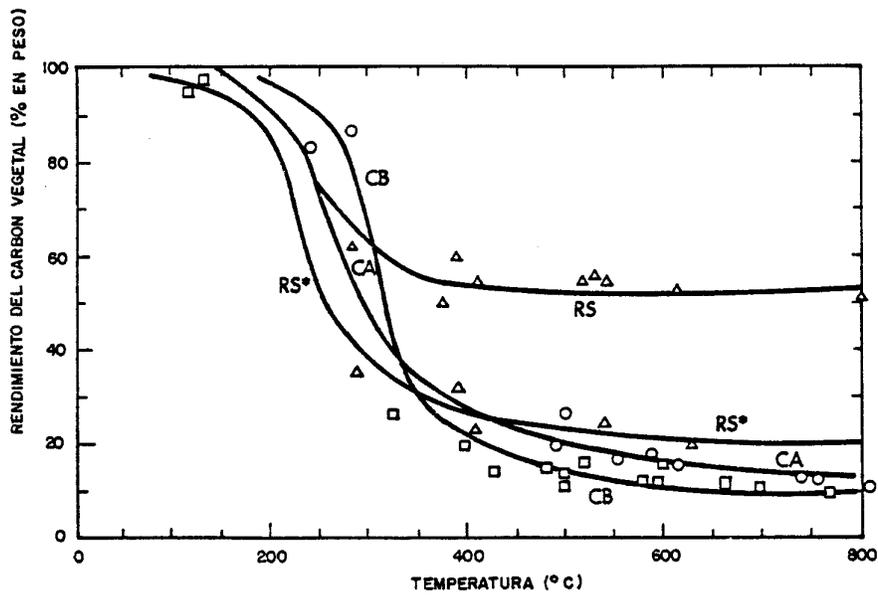
A pesar de que los residuos sólidos urbanos no se consideran aquí como elementos constituyentes de la biomasa, su fracción orgánica es predominantemente celulósica y por consiguiente semejantes a los tipos de biomasa considerados.

En la Tabla 2, se muestran los resultados de los análisis finales de los residuos sólidos urbanos y de diversos elementos constituyentes de la biomasa, como es el caso de los productos forestales.

Para ver la influencia que ejerce la temperatura a que tiene lugar la pirólisis sobre los productos obtenidos en ella y sobre la composición del carbón vegetal así producido, se realizaron varios ensayos de laboratorio con muestras de residuos sólidos urbanos, una vez triturados, desecados y desprovistos de la mayor parte de sus componentes inorgánicos. Los resultados obtenidos se indican en las Tablas 3 y 4. Se puede afirmar, que a medida que aumenta la temperatura de la pirólisis, se produce una disminución en el contenido de elementos volátiles del carbón vegetal y un incremento en los valores de carbono fijo y cenizas.

En las Tablas 5 y 6 se puede ver la influencia de la temperatura de la pirólisis, en relación con la composición del gas y la de los compuestos orgánicos producidos en dicho proceso. Por lo que respecta al poder calorífico del gas, se puede asegurar que primero se incrementa con la temperatura, para disminuir uniformemente a medida que la temperatura sobrepasa más allá de un límite determinado.

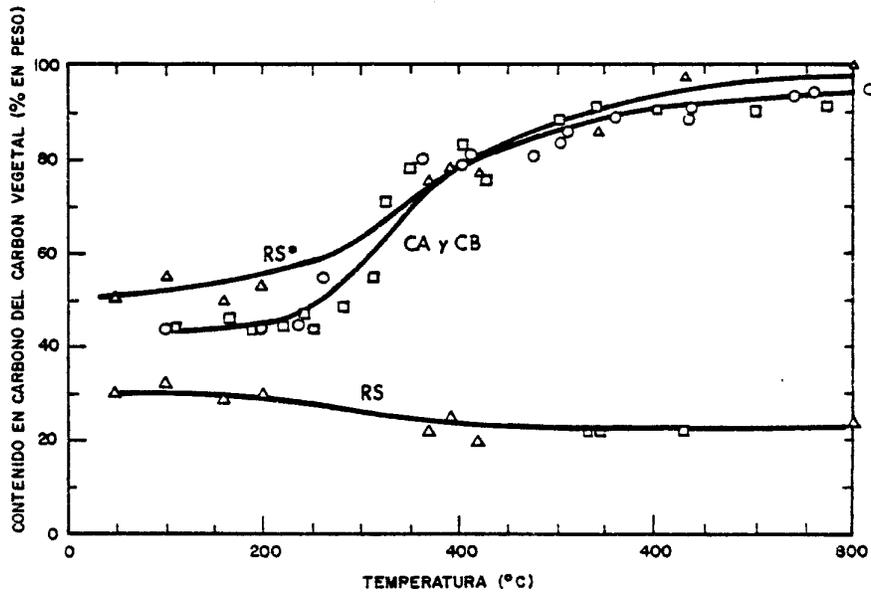
Figura n° 3



LEYENDA

RS: RESIDUO SOLIDO  
CA: CELULOSA A  
CB: CELULOSA B

Figura n° 4



RENDIMIENTOS DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS EN LA PIROLISIS RAPIDA DEL PAPEL

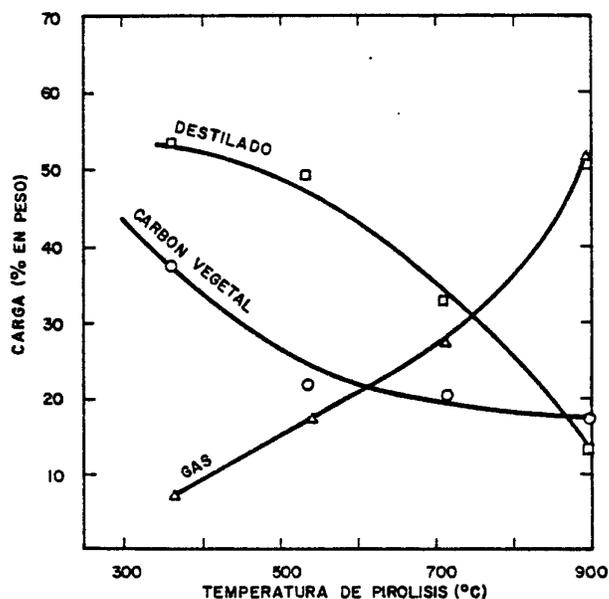


Figura n° 6

VARIACION DEL PODER CALORIFICO DEL GAS SEGUN LA TEMPERATURA A LA QUE SE VERIFIQUE LA PIROLISIS RAPIDA DEL PAPEL

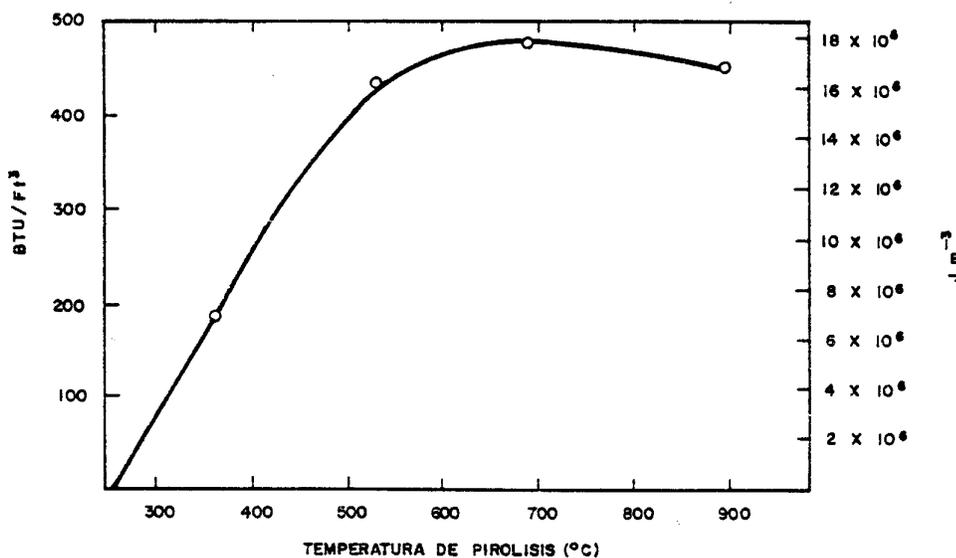


TABLA N° 1.- Influencia de la velocidad de calentamiento sobre el rendimiento y composición del carbón vegetal

Producto	Temp. final (°C)	Velocidad calentam. (°C/min.)	RENDIMIENTO (%)		Contenido en carbono del carbón veg. (% en peso)
			Sobre peso total	en peso carbono	
Celulosa A	540	0,13	31,1	61,9	88,5
		0,14	31,9	65,0	90,6
		0,48	29,3	61,4	93,0
		0,89	28,4	59,7	93,5
		1,59	26,6	55,8	93,3
		2,20	26,5	54,7	91,6
		19,00	19,8	40,4	90,8
		max*	17,2	34,6	89,3
Celulosa A	710	0,2	29,2	62,2	94,8
		0,42	27,0	57,3	94,2
		1,2	25,9	56,4	96,7
		1,7	24,7	53,3	95,9
		43,0	12,2	25,7	94,3
		max*	13,0	27,3	93,5
Residuos sólidos no clasificados	710	0,2	65,3	47,2	16,9
		0,5	65,4	46,9	16,0
		1,1	64,4	42,3	15,4
		32,0	63,2	39,6	14,7

\* Las muestras se calentaron a la temperatura final de la pirólisis a la máxima velocidad posible, introduciéndolas en un horno después de haber sido precalentadas a las temperaturas señaladas. La velocidad de calentamiento inicial fue de 100°C/min. aproximadamente.

Ref. "Pyrolysis for the production of activated carbon from the cellulosic solid waste"

TABLA N°2.- Análisis de los residuos sólidos y de otros elementos de la biomasa (sobre base seca) (% en peso)

Componentes	Resid. solid.	Cortezas de Abeto	Cáscaras de arroz	Pastizales	Cortezas de pino	Cortezas de roble	Pino	Cedro blanco	Abeto	Ciprés	Fresno blanco	Chopo	Arce
Carbono	47,3	48,3	39,3	45,0	53,4	49,7	51,8	48,8	52,3	54,9	49,7	51,6	50,6
Hidrógeno	5,0	5,3	5,5	6,0	5,6	5,4	6,3	6,4	6,3	6,4	6,9	6,3	6,0
Nitrógeno	1,4	0,2	0,5	0,5	0,1	0,2	0,1	-	0,1	-	-	-	-
Oxígeno	32,6	34,5	36,3	42,4	37,9	39,3	41,3	44,4	40,5	38,1	43,0	41,4	41,7
Azufre	0,2	0	0,2	0,5	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-
Cenizas	13,5	11,7	18,2	55,2	2,9	5,3	0,5	0,4	0,8	0,4	0,3	0,7	1,4
Ratio C/H	9,46	9,11	7,14	7,5	9,53	9,2	8,22	7,66	8,3	8,59	7,17	8,24	8,41

Nota: El valor energético de los gases desprendidos en la pirólisis depende de la relación C/H

Referencias: "From Garbage-oil"

"Energy and Wood Products Industry"

"Riegel's Industrial Chemistry"

TABLA N° 3.- Influencia de la temperatura sobre los productos obtenidos en la pirólisis

Temperatura de la pirólisis (°C)	PRODUCTOS OBTENIDOS EN LA PIROLISIS (% EN PESO)		
	Gases	Componentes volátiles condensables (*)	Otros componentes condensables
482	12,33	43,37	17,71
649	18,64	49,20	9,98
816	23,69	47,99	11,68
927	24,36	46,96	11,74
			Carbón vegetal
			24,71
			21,80
			17,24
			17,64

\* Parte de los elementos volátiles condensables, que se evaporan a los 103°C, incluyendo el agua.

Referencia: "Thermal Processing of Municipal Solid Waste for Resource and Energy Recovery"

TABLA N° 4.- Influencia de la temperatura respecto a la composición del  
Carbón vegetal

Temperatura de la pirólisis(°C)	Composición del carbón vegetal (% en peso)				
	Elementos volátiles	Carbón fijo	Cenizas	Poder calorífico superior	
				cal/gr	Btu/lb
482	21,81	70,48	7,71	6.730	12.120
649	15,05	70,67	14,28	6.840	12.280
816	8,13	79,05	12,82	6.400	11.540
927	8,30	77,23	14,47	6.330	11.400

Referencia: "Thermal Processing of Municipal Solid Waste for Resource and  
Energy Recovery"

TABLA N° 5.- Influencia de la temperatura de la pirólisis sobre la composición del gas

Temperatura de la pirólisis (°C)	482	649	816	927
Composición del gas, (% en volumen)				
. Monóxido de carbono	33,5	30,49	34,12	35,25
. Dióxido de carbono	44,77	31,78	20,59	18,31
. Hidrógeno	5,56	16,58	28,55	32,48
. Metano	12,43	15,91	13,73	10,45
. Etano	3,03	3,06	0,77	1,07
. Etileno	0,45	2,18	2,24	2,43
Poder calorífico total:				
. Cal/N m <sup>3</sup>	2.930	3.780	3.680	3.610
. Btu/SCF	312	403	392	385

Referencia: "Thermal Processing of Municipal Solid Waste for Resource and Energy Recovery"

TABLA N° 6.- Influencia de la temperatura de la pirólisis sobre la composición de los compuestos orgánicos

Temperatura de la pirólisis (°C)	649	816
Compuestos orgánicos condensables (% en peso)		
. Acetaldehído	13,0	10,5
. Acetona	18,0	16,5
. Metiletilcetona	4,3	4,9
. Metanol	20,6	23,5
. Cloroformo	1,0	2,1
. Tolueno	1,3	3,2
. Acido fórmico	14,4	11,2
. Furfural	7,2	8,0
. Acido acético	1,3	2,1
. Metilfurfural	6,9	6,7
. Naftaleno	1,6	1,8
. Fenol	6,5	5,6
. Cresol	2,6	2,5
. Metilnaftaleno	1,3	1,4

Referencia: "Thermal Processing of Municipal Solid Waste for Resource and Energy Recovery"

## 5.- PRINCIPALES SISTEMAS DE PIROLISIS

Los diferentes sistemas de pirólisis se clasifican, por regla general, según los tres factores siguientes:

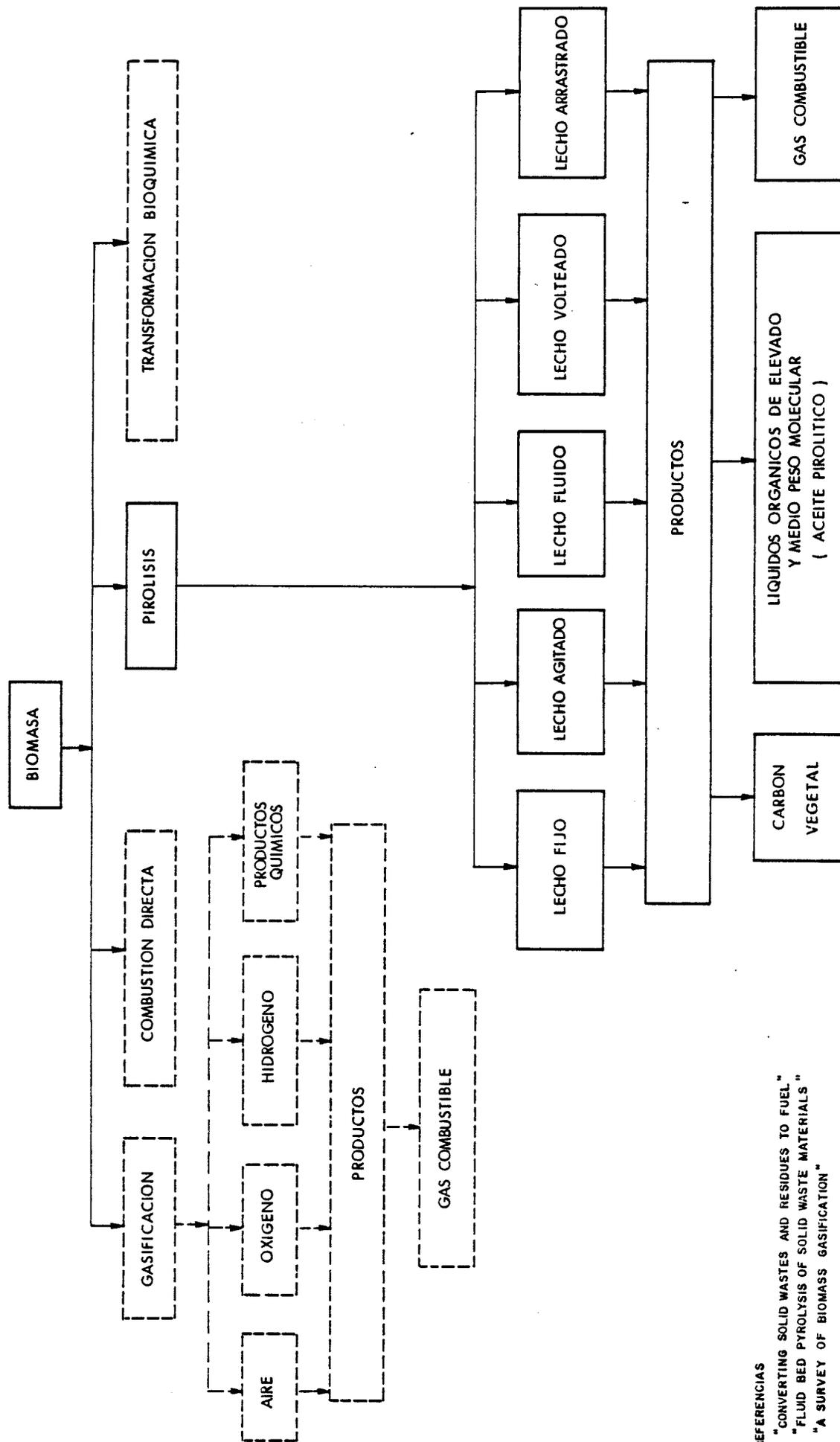
- . Sentidos del flujo gaseoso y de la materia prima a tratar.
- . Mecanismos de transmisión de calor
- . Características de los residuos (según formen o no escorias).

Teniendo en cuenta las direcciones de las corrientes de gas y materias primas a tratar, el mecanismo de transmisión de calor, y la disposición de los hornos o retortas (vertical, horizontal o inclinada), se pueden desarrollar más de doce tipos de equipos diferentes.

En la Figura 7 se exponen de forma esquemática varios procesos de transformación de los distintos elementos constituyentes de la biomasa.

A continuación se pasa a describir brevemente los principales sistemas de flujo continuo.

SISTEMAS DE TRANSFORMACION ENERGETICA DE LA BIOMASA



REFERENCIAS

- "CONVERTING SOLID WASTES AND RESIDUES TO FUEL"
- "FLUID BED PYROLYSIS OF SOLID WASTE MATERIALS"
- "A SURVEY OF BIOMASS GASIFICATION"

### 5.1.- SISTEMA DE LECHO FIJO

Un reactor de lecho fijo (horno o retorta) consta por lo general, de una cuba vertical que se alimenta por su parte superior o lateral, en una posición fija. En su interior, la materia prima va descendiendo, mientras continua el proceso de pirólisis, siendo retenida por unos emparrillados fijos o por un lecho de arena, dispuesto en su parte inferior.

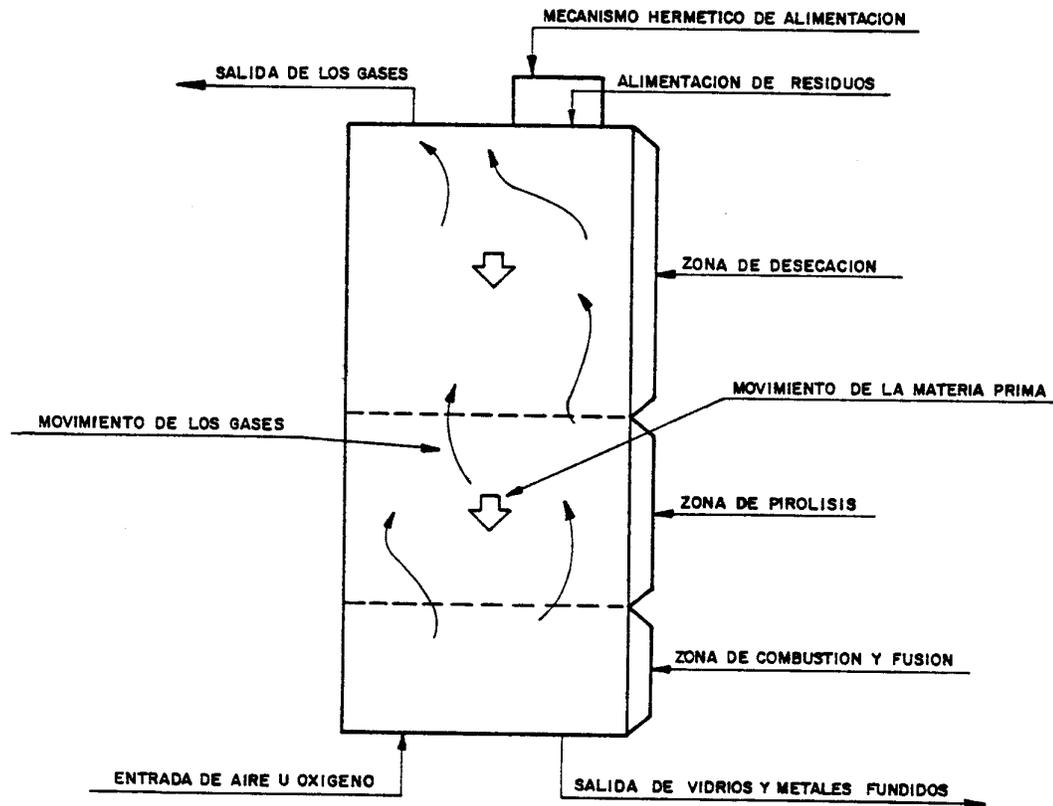
En este tipo de reactor se pueden distinguir dos variantes, según que su calentamiento tenga lugar directamente (hornos) o indirectamente (retortas), como se puede apreciar con más detalle en las Figuras 8 y 9, respectivamente.

En el proceso de calentamiento directo, el reactor dispone de un hogar en donde se verifica la oxidación parcial de la materia prima, con el consiguiente aporte calorífico para el fenómeno de pirólisis. Por el contrario, en el caso de calentamiento indirecto, existe una cámara de combustión, alrededor de la cuba del reactor, en donde se queman los combustibles fósiles (fuel-oil, etc.). En esta variante, la transmisión de calor se produce a través de las paredes del reactor, realizándose la pirólisis en una atmósfera carente de oxígeno.

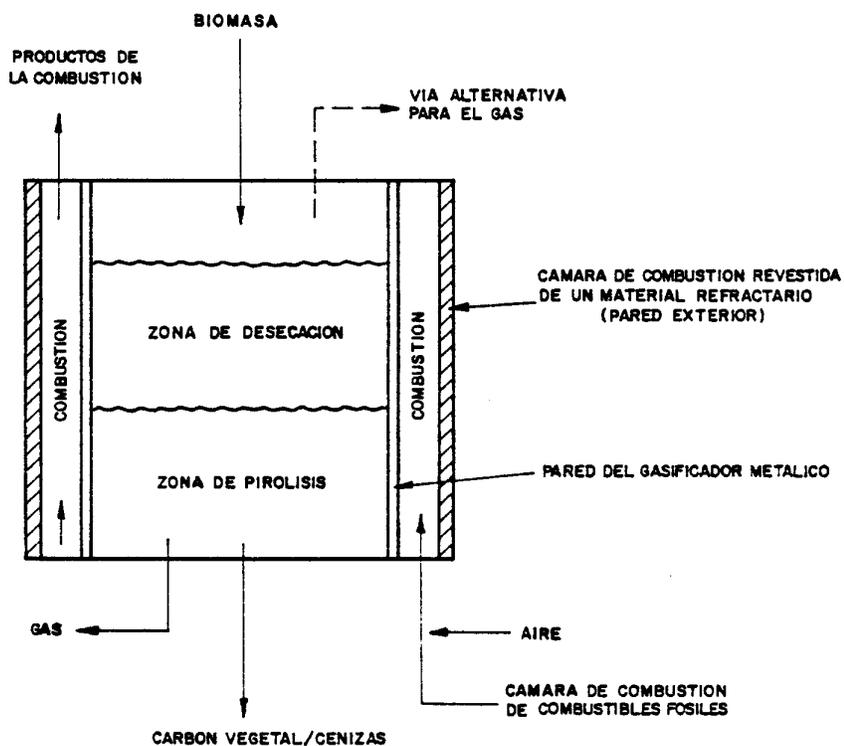
En este sistema, las distintas zonas de reacción están bastante separadas y diferenciadas, dependiendo la altura de las mismas de las características de la materia prima (composición química, contenido de humedad y tamaño de las partículas) y de los parámetros termodinámicos (presión, temperatura y velocidad del flujo de aire que se inyecta al hogar).

Otra clasificación de esta clase de reactores es la que corresponde a la dirección del aire inyectado. Cuando la inyec

REACTOR DE LECHO FIJO Y CALENTAMIENTO DIRECTO



PROCESO TIPO DE PIROLISIS EN UN REACTOR DE CALENTAMIENTO INDIRECTO Y FLUJO VERTICAL



REFERENCIAS. "BIOMASS CONVERSION PROCESSES FOR ENERGY AND FUEL."  
"CONVERTING SOLID WASTES AND RESIDUES TO FUEL"

ción se realiza por la parte inferior de la cuba, el reactor se denomina de tiro ascendente, mientras que cuando la tubería de aspiración se dirige hacia abajo y el aire se inyecta hacia el hogar, se denomina de tiro descendente. Existen también - unos reactores de flujo transversal, en los que como su nombre indica, el paso de aire se realiza transversalmente.

El contenido de partículas sólidas de los gases que se desprenden en este tipo de reactores, es máximo en los de tiro ascendente, mínimo en los de tiro descendente e intermedio en los de tiro transversal. En los gases de los reactores de tiro ascendente, existen también alquitranes y elementos volátiles, siendo su temperatura inferior a la de los que se producen en los de tiro descendente.

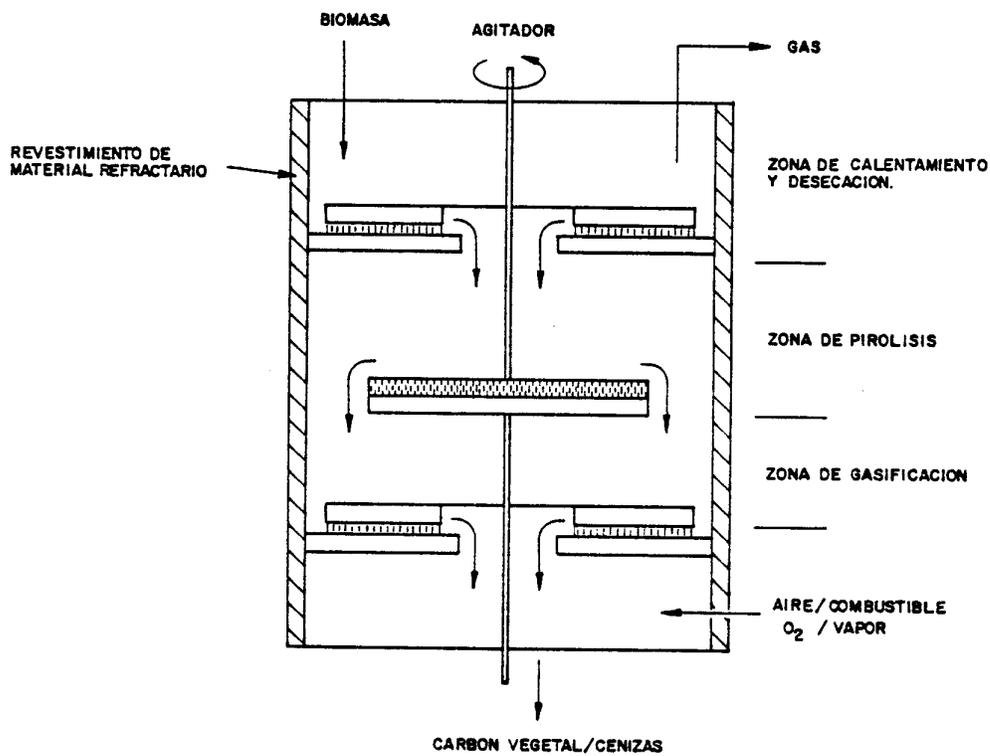
Toda esta gama de reactores es de sencillo diseño, pudiéndose aplicar fácilmente en los países en vías de desarrollo.

## 5.2.- SISTEMA DE LECHO AGITADO

Este tipo de reactor, también llamado horno de hogar múltiple, es un sistema de lecho móvil, a contracorriente y calentamiento directo, según se puede observar en la Figura 10. Consta de una serie de hogares circulares graduados, dispuestos unos encima de otros, en el interior de un cilindro de acero, revestido de un material refractario. En su centro, se dispone un agitador rotatorio que remueve la materia prima, obligándola a seguir una trayectoria en espiral a través de los distintos hogares.

El proceso de carga se realiza por su parte superior, estableciéndose en su interior una doble corriente de sentido

REACTOR DE LECHO AGITADO Y CALENTAMIENTO DIRECTO  
(Horno de hogares múltiples)



contrario. Por una parte, la de la materia prima, en sentido - descendente, que al pasar de unos hogares a otros se calienta progresivamente, y por otra, la de los gases producidos, en dirección ascendente.

Los brazos del agitador desempeñan un importante papel en la agitación y calentamiento uniforme de la materia prima a tratar.

Este sistema no se ha desarrollado mucho a nivel comercial para el proceso de pirólisis de la biomasa. Requiere una elevada inversión y altos costes de mantenimiento.

### 5.3.- SISTEMA DE LECHO FLUIDO

El clásico reactor vertical de lecho fluido, no es más que una cuba revestida de un material refractario, que utiliza como vehículo fluidificante un compuesto inerte, tal como arena, cantos rodados o cenizas. Dicho vehículo se sustenta por medio de una placa perforada, cuyos retículos aseguran la uniforme distribución del aire inyectado.

La fluidificación del lecho tiene lugar mediante el suministro de una corriente de aire u oxígeno a través de dichos retículos. Su velocidad será aquella que haga permanecer al lecho en estado de suspensión. En estas condiciones, la totalidad del mismo tendrá el aspecto de un baño fluido en régimen turbulento. Cada una de sus partículas tendrá la misma temperatura, de modo que cualquier variación de la misma en un punto del lecho, se transmitirá inmediatamente por todo él.

En la Figura 11 se indican los esquemas de dos reactores de este tipo, con sistemas de calentamiento directo e indi

recto, respectivamente. Asimismo, en la Figura 12 se representa el diagrama característico de un reactor vertical de esta clase.

Cuando la alimentación se verifica por la parte superior del reactor, el lecho, actuando como depósito de acumulación de calor, transmite con gran rapidez la energía calorífica necesaria para el proceso de pirólisis. A causa de la gran turbulencia de la mezcla, la velocidad de transmisión de calor desde el lecho a la materia prima, es de diez a cien veces superior, si se la compara al caso de una simple corriente de aire.

Una de las principales exigencias de este sistema es la consecución de una adecuada dispersión de los elementos constituyentes de la biomasa en el interior del lecho, con el fin de dar tiempo suficiente para un rápido calentamiento de la materia prima y para que termine el proceso de pirólisis. Sin embargo, este hecho requerirá una menuda trituración de la materia prima, operación bastante costosa y con grandes inversiones en equipos.

Para un funcionamiento uniforme, la temperatura del lecho se deberá mantener por encima de los  $850^{\circ}\text{C}$  durante las reacciones de oxidación parcial, pero por debajo de los  $1.150^{\circ}\text{C}$  con el fin de evitar la formación de escorias.

Entre las ventajas de este sistema destacan las siguientes:

- . Se pueden tratar materias primas de muy distintas propiedades físicas o estructurales.

- . Un alto contenido de humedad y cenizas de la materia prima no causa graves problemas de funcionamiento.
- . Consecución de una gran capacidad de caída o descenso en el reactor.
- . Obtención de un gas de calidad bastante uniforme.

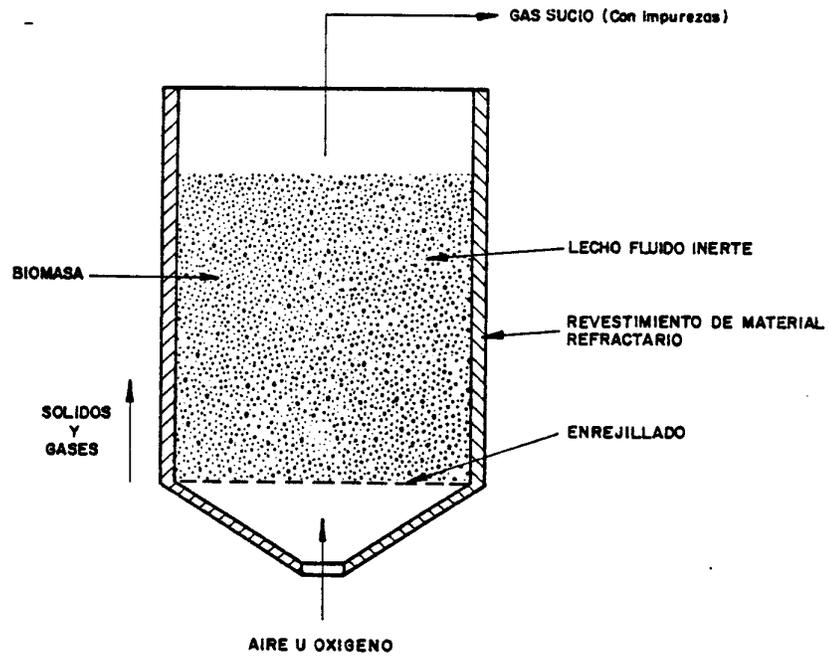
Por el contrario, algunos de los principales inconvenientes que se pueden presentar son:

- . Grandes pérdidas de carbono durante la eliminación de los residuos.
- . Elevado contenido de partículas en los gases producidos.
- . Bajo rendimiento en la transformación energética.
- . Necesidad para el control riguroso del proceso, de una serie de equipos de gran sensibilidad y de un personal altamente especializado.
- . Necesidad de someter la materia prima a un tratamiento previo.

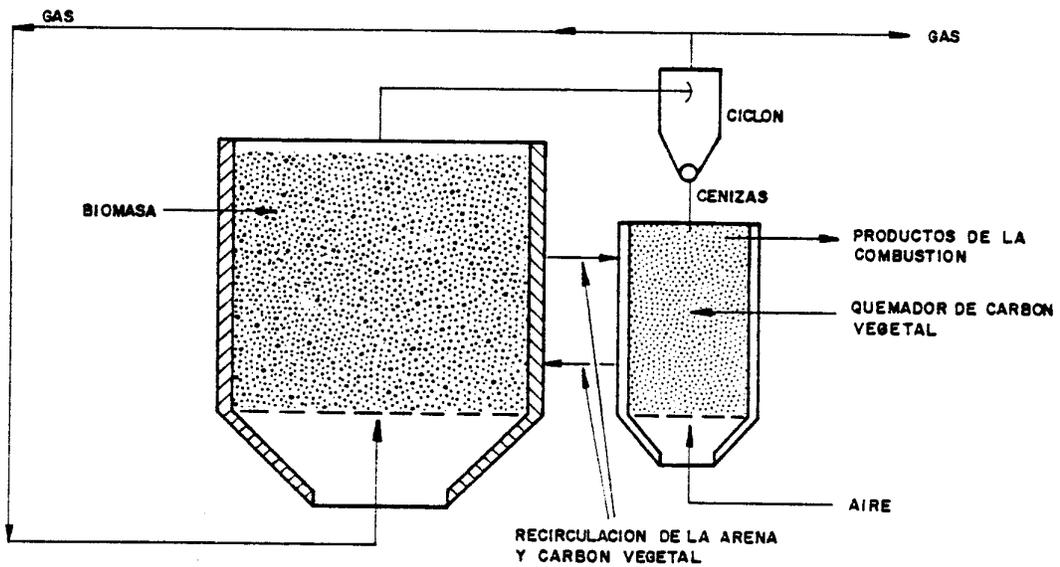
Este reactor no se ha utilizado mucho en Estados Unidos para el proceso de pirólisis de la biomasa, debiéndose investigar más profundamente hasta conseguir el completo desarrollo - de su tecnología. Este aspecto está siendo estudiado actualmente por el Departamento de la Energía de los Estados Unidos, - quien a su vez ha elaborado una serie de ensayos que pronto se llevarán a cabo en el Laboratorio Nacional y en empresas privadas.

REACTOR DE LECHO FLUIDO

DE CALENTAMIENTO DIRECTO

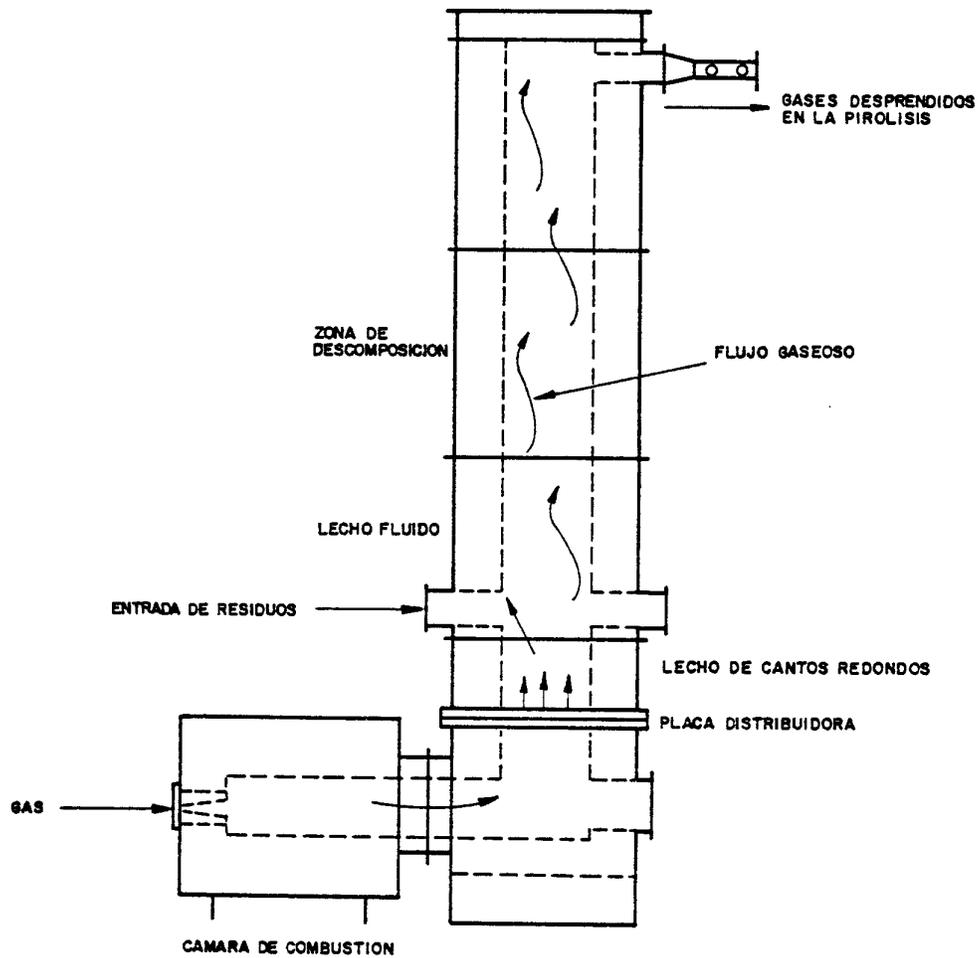


DE CALENTAMIENTO INDIRECTO



REFERENCIAS. "BIOMASA CONVERSION PROCESSES FOR ENERGY AND FUEL"  
 "CONVERTING SOLID WASTES AND RESIDUES TO FUEL"

TIPO REACTOR VERTICAL DE LECHO FLUIDO



REFERENCIA. "RESOURCE, RECOVERY, RESEARCH DEVELOPMENT AND DEMOSTRATION PLAN FOR U.S. DEPARTMENT OF ENERGY URBAN WASTE TECHNOLOGY".

#### 5.4.- SISTEMA DE LECHO ARRASTRADO O TRANSPORTADO

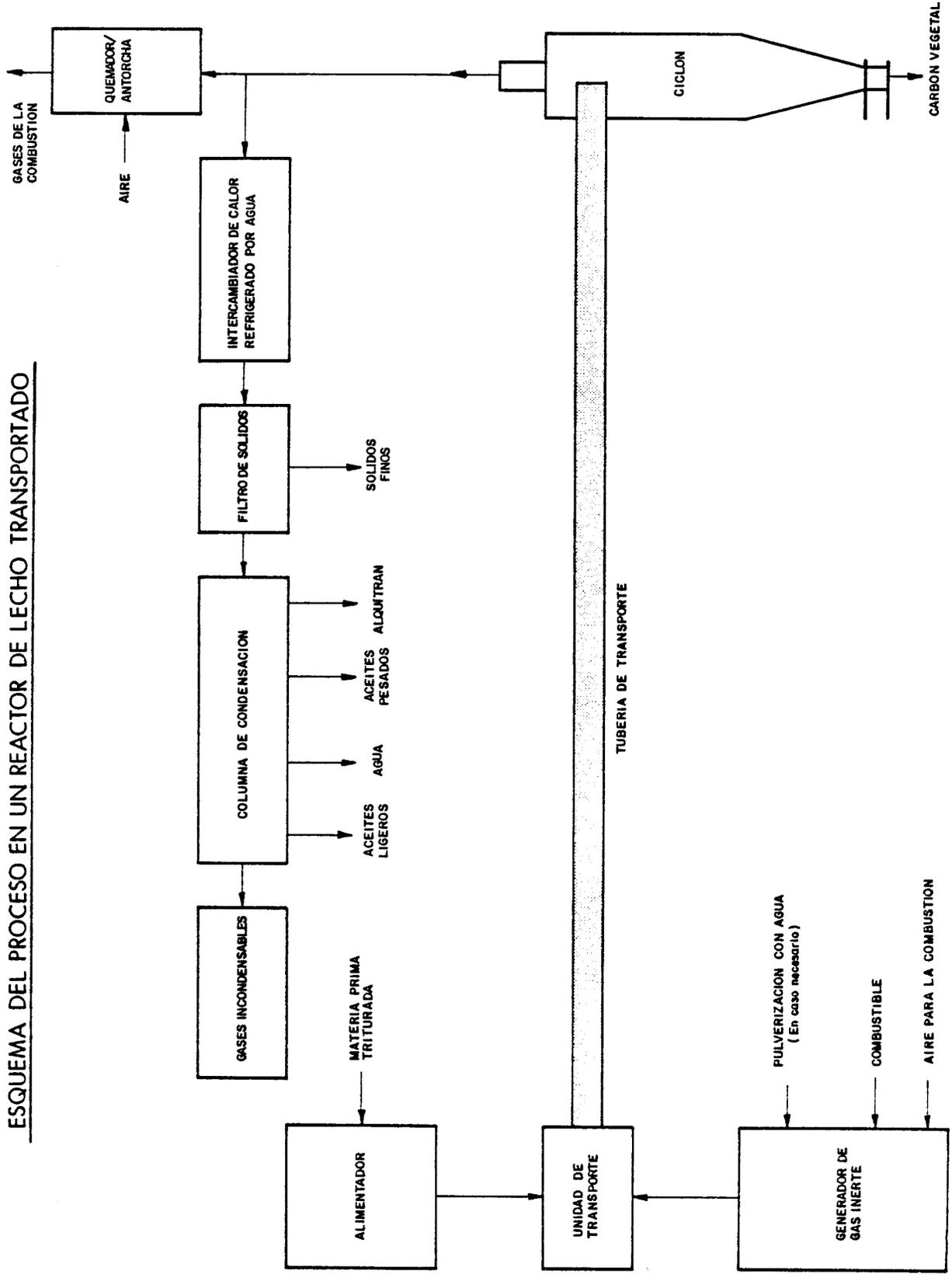
En este sistema se utilizó por primera vez como medio de transporte, los catalizadores de los alambiques empleados en las refinerías, siendo sustituidos más tarde por arena de fundición. El calentamiento de estos elementos se consigue por medio de un quemador de carbón vegetal, situado fuera del reactor. El transporte de la materia prima y del lecho inerte, se realiza por gases inertes como el nitrógeno y por los productos de la combustión (exentos de cualquier contenido de oxígeno).

Este reactor posee unas superiores características de transmisión de calor. Presenta un buen contacto sólido-líquido, pudiendo procesar una amplia gama de materias primas previamente tratadas. Su volumen unitario es también elevado. Uno de sus principales inconvenientes es la necesidad de triturar muy finamente y desecar la materia prima, antes de su incorporación al lecho inerte. En el reactor existe un breve período de tiempo, para evaporación de la humedad e iniciación del proceso de pirólisis.

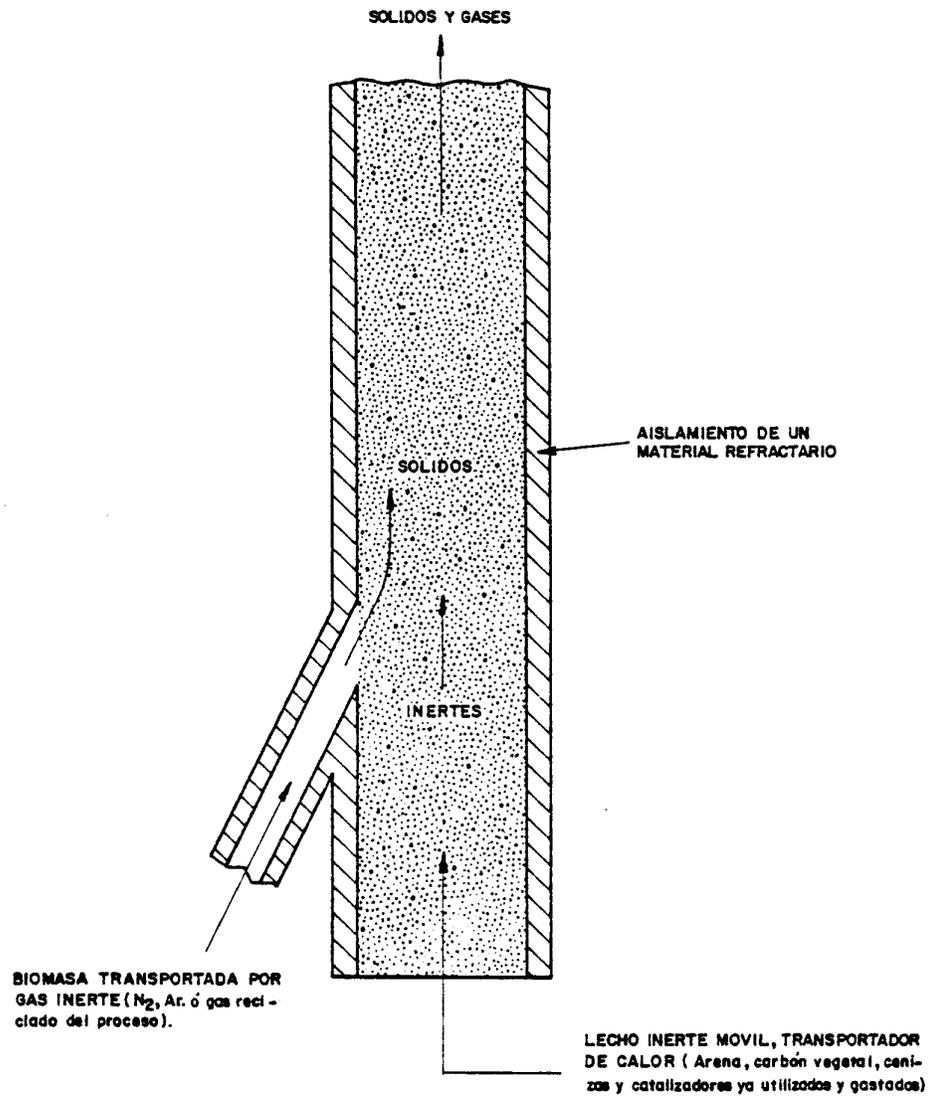
En las Figuras 13 y 14 se representan, respectivamente, un esquema del proceso y una sección genérica de este tipo de reactor.

Su utilización en la pirólisis de la biomasa ha sido muy restringida hasta ahora, no habiéndose desarrollado a escala comercial, por lo que su posible aplicación tendrá que esperar hasta conseguir un nivel de investigación más avanzado.

ESQUEMA DEL PROCESO EN UN REACTOR DE LECHO TRANSPORTADO



REACTOR DE LECHO TRANSPORTADO



REFERENCIAS. "BIOMASS CONVERSION PROCESSES FOR ENERGY AND FUEL"  
"CONVERTING SOLID WASTES AND RESIDUES TO FUEL".

#### 5.5.- SISTEMA DE LECHO VOLTEADO

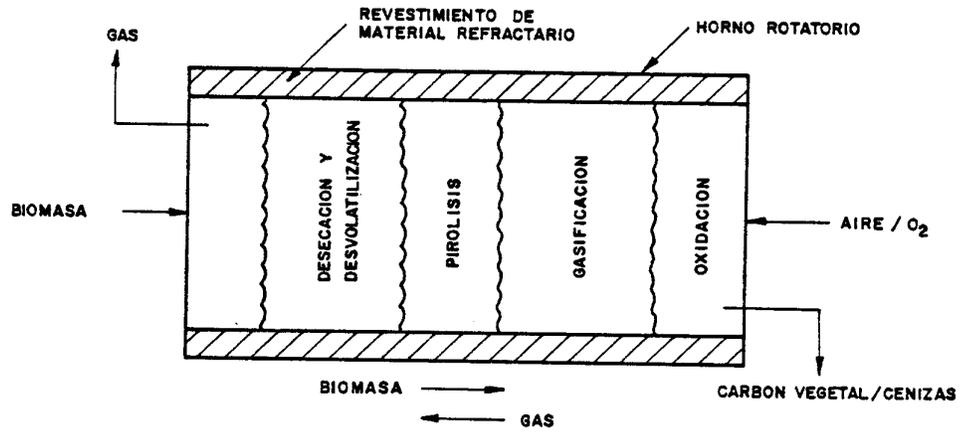
Como se indica en la Figura 15, este sistema consta de un horno rotatorio revestido de un material refractario o de un calcinador rotatorio de paredes metálicas. Por regla general, se dispone horizontalmente o inclinado, girando lentamente, con el fin de voltear la materia prima a tratar. Esta acción de volteo, permite el transporte de la misma, desde la boca de alimentación hasta el punto final de descarga. A veces se utilizan unos dispositivos de transporte mecánico, como los transportadores de tornillo sin fin y los vibratorios, en los reactores de largo recorrido.

En algunas versiones de este sistema, el aporte calorífico que se requiere para el proceso de pirólisis es exterior, mientras que en otras, se produce en su interior el contacto directo del aire caliente o de los productos de la combustión, con la materia prima volteada.

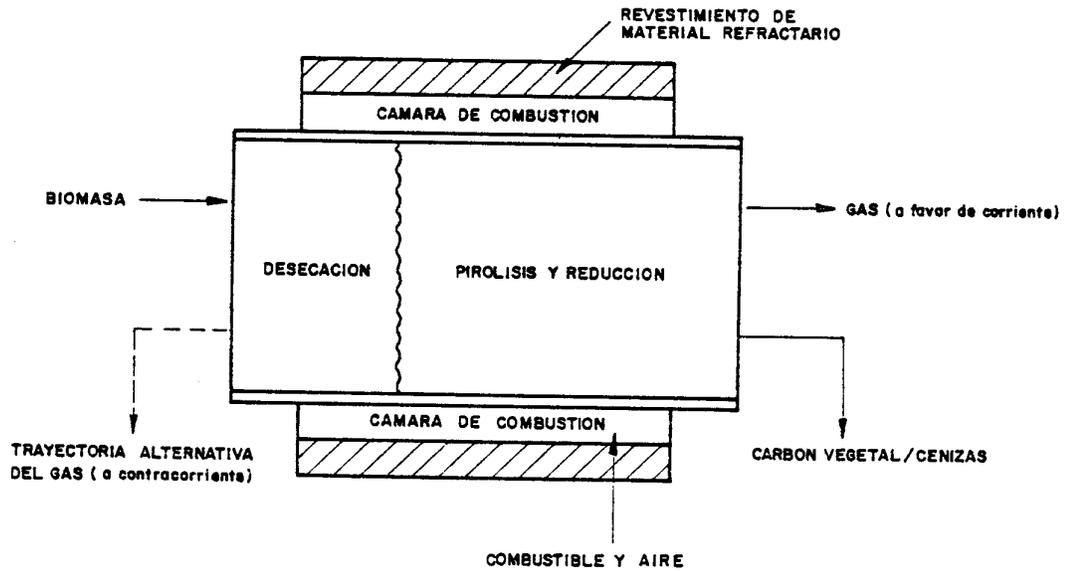
Actualmente, su aceptación en el mercado es muy limitada, habiéndose construido exclusivamente unas cuantas plantas de demostración. En muchos casos, los altos costes de mantenimiento como consecuencia de las frecuentes averías, fueron la causa determinante de la paralización de varios proyectos. Asimismo, otros de los inconvenientes que impiden su buena e inmediata acogida por parte de múltiples empresas, son su elevada inversión y la necesidad de disponer de un personal altamente cualificado.

REACTOR DE LECHO VOLTEADO

DE CALENTAMIENTO DIRECTO



DE CALENTAMIENTO INDIRECTO



REFERENCIAS. "BIOMASS CONVERSION PROCESSES FOR ENERGY AND FUEL"  
 "CONVERTING SOLID WASTES AND RESIDUES TO FUEL"

## 6.- PROCESOS DE CARBONIZACION TRADICIONALES

Desde los primeros tiempos de la humanidad, el hombre fabricó carbón vegetal por medio de los hornos de tierra. Con sistían en unos fosos o excavaciones realizados en el terreno, en donde se acumulaba la madera en montones de 50 a 90 cuer das (1 cuerda =  $3,62 \text{ m}^3$ ), se la prendía fuego y se protegía - con una cubierta, mezcla de lodo y tierra, para limitar la en trada de aire en su interior. Unicamente se incendiaba o pren día una parte de la misma, para elevar la temperatura de la carga total y conseguir la iniciación y desarrollo del proceso de pirólisis por sí solo. Se necesitaban unos veinte días, apro ximadamente, para obtener una producción de carbón próxima al 20% (85-90 kg de carbón/ $\text{m}^3$  de leña). Este procedimiento de que mar la leña exigía días de continua vigilancia por parte del productor, cuyo trabajo aunque humildemente considerado, reque ría no obstante, considerable maña y destreza.

Con la revolución industrial, tuvo lugar la aparición de hornos más sofisticados de ladrillo, y posteriormente de - hormigón y acero, pero sin cambios esenciales en el modo de operar. En todos ellos se produce fundamentalmente una igni ción interna de una parte de la materia prima, para carbonizar se el resto en presencia de una cantidad controlada y reducida de aire. El proceso puede requerir muchos días e incluso más tiempo, en aquellos casos en que el enfriamiento del carbón ve getal tiene lugar por simple exposición al aire. Hay que tener

sumo cuidado en aquellas circunstancias en que el aire accede al carbón caliente, pues se puede prender y quemar por completo.

El siguiente paso fue el desarrollo de las retortas, que adquirió un gran auge en el Siglo XIX, merced a la demanda de los subproductos químicos que se obtenían por condensación de los gases desprendidos en el proceso de pirólisis, los cuales no se podían recuperar eficientemente en los hornos, en virtud de su propia naturaleza.

#### 6.1.- HORNO MISSOURI

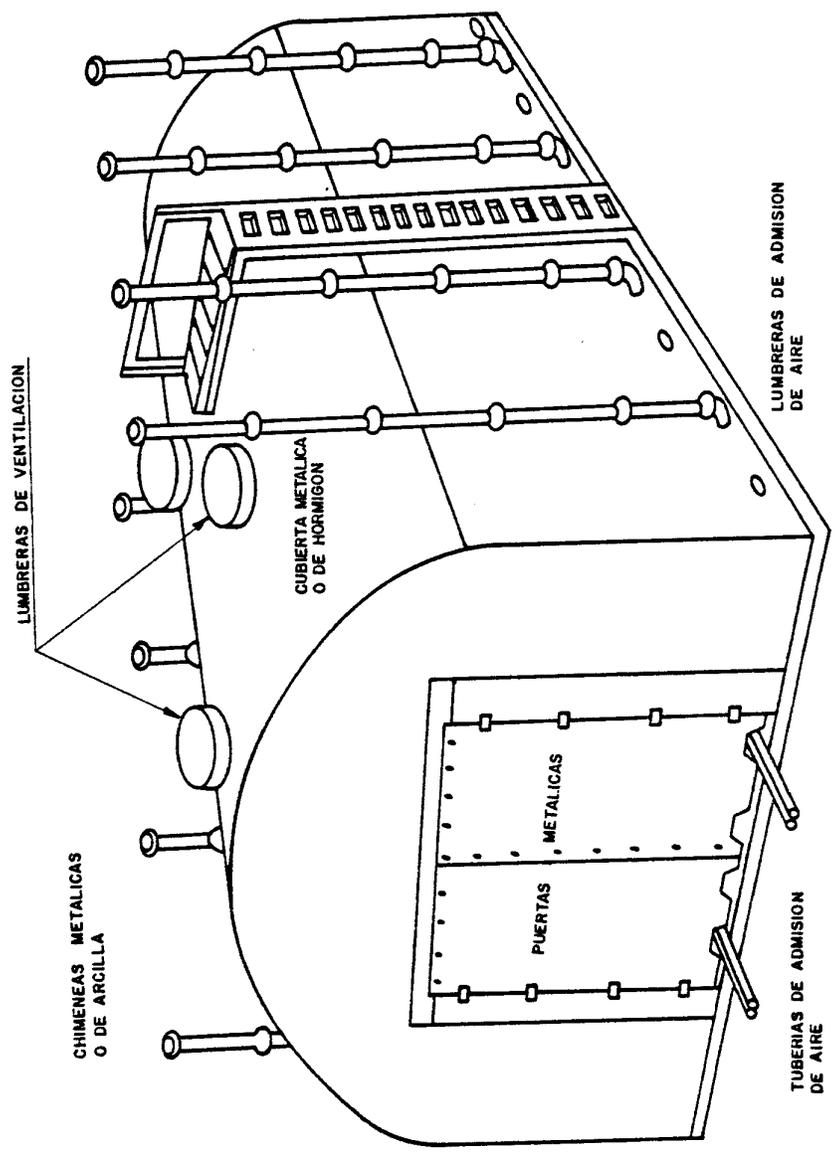
Es el más corriente entre los discontinuos que están funcionando hoy en día.

En la Figura 16 se puede observar una perspectiva genérica del mismo.

Este horno, se construye por lo general de hormigón, con una capacidad de tratamiento de 160-180 m<sup>3</sup> por ciclo, aunque algunos de ellos se han instalado para procesar hasta 360 m<sup>3</sup>. Cada ciclo comprende los períodos de carga, carbonización, enfriamiento y descarga, respectivamente. El tiempo que se requiere para cada uno de ellos varía mucho de unas instalaciones a otras. No obstante, la duración normal de un ciclo se estima entre 10 y 25 días, aproximadamente.

La materia prima se carga por la parte inferior del centro del horno, prendiéndose fácilmente con la ayuda de unos compuestos combustibles que se colocan en esta zona durante el citado proceso de carga, que requiere normalmente de 1 a 2 días.

HORNO MISSOURI TIPICO



Con el fin de obtener el grado de calefacción necesario para que el proceso de pirólisis tenga lugar, se debe de quemar lo más rápidamente posible el combustible inicial de arranque. Para ello se requiere una gran cantidad de aire, que penetra por las lumbreras de las paredes laterales situadas a nivel del suelo o a través de las aberturas provisionales de debajo de las puertas. En algunas ocasiones, las puertas y las lumbreras auxiliares del techo permanecen abiertas hasta que no haya empezado la quema o ignición, de una forma adecuada. Inmediatamente después se reduce la entrada de aire, para evitar la completa combustión de la madera y su consiguiente reducción a cenizas.

La consecución de una buena carbonización, depende sobre todo del mantenimiento de unas condiciones de quema idóneas, en la zona donde va a tener lugar la pirólisis. Por lo tanto, se debe generar calor suficiente para desecar en primer lugar la materia prima y para mantener a continuación las temperaturas necesarias, propias de una eficiente carbonización. La combustión de una parte de los elementos volátiles de la madera produce el calor que se necesita para sostener el proceso de carbonización. En definitiva, el control de la temperatura se logra mediante una mayor abertura o cierre de los dispositivos de admisión de aire. Las temperaturas que se requieren para la obtención de un carbón de calidad, varían por lo general entre 450 y 510°C. En el caso de que persistan temperaturas más elevadas, disminuye la producción, sin mejora alguna de la calidad. También puede ocurrir que si las temperaturas del proceso permanecen bajas, el carbón producido contenga una proporción de madera parcialmente carbonizada, tizones, superior a la normal.

La dirección y amplitud de la zona de carbonización de

pende de una serie de factores tales como el tamaño y contendo de humedad de la materia prima, el apilado de la carga, el caudal de entrada de aire, y la situación de las lumbreras y chimeneas, aparte de otros factores propios del diseño del horno.

La pirólisis empieza por lo general a mayor velocidad - en la parte superior de la carga, al permanecer en esta zona las temperaturas más elevadas durante mayor período de tiempo. Por el contrario, la más lenta, tiene lugar en las inmediaciones de la solera, donde la temperatura media suele ser la más baja de todas.

La carbonización se produce simultáneamente desde la - parte superior de la carga hasta el fondo de la misma, desde el centro a las paredes, y desde la parte frontal a la trasera.

La marcha y desarrollo de la quema se puede determinar por el color del humo que sale del horno, por la temperatura existente a una cierta distancia de las paredes y por el examen visual de la carga a través de las lumbreras de admisión de aire.

El proceso finaliza cuando el fuego llega a la solera del horno, según se puede comprobar al mirar por las susodichas lumbreras de admisión. También se puede saber al producirse una notable disminución en la emisión de humos y un cambio de color, de un amarillo parduzco a un blanco azulado.

Concluída la pirólisis, empieza el proceso de refrigeración o enfriamiento. En primer lugar, se cierran todas las lumbreras de admisión, aunque se dejan abiertas las chimeneas pa

ra evitar cualquier presión innecesaria como consecuencia de los humos que emite el carbón. Las chimeneas permanecen abiertas hasta que no cese la emisión de humos en su práctica totalidad. Una vez que se cierra el horno por completo, se deja que el carbón vegetal se enfríe antes de proceder a su extracción. Esta operación de enfriamiento dura de 1 a 2 horas, a partir del cierre de las lumbreras de admisión.

Los rendimientos que se obtienen oscilan normalmente al rededor del 25% sobre materia prima desecada.

Estos hornos poseen por lo general ocho chimeneas, distribuídas a lo largo de sus paredes laterales.

El tiempo de carbonización y las emisiones que se producen varían con el tipo, capacidad y funcionamiento del horno, con los diferentes operarios, así como con el contenido de humedad y clase de materiales que se utilice.

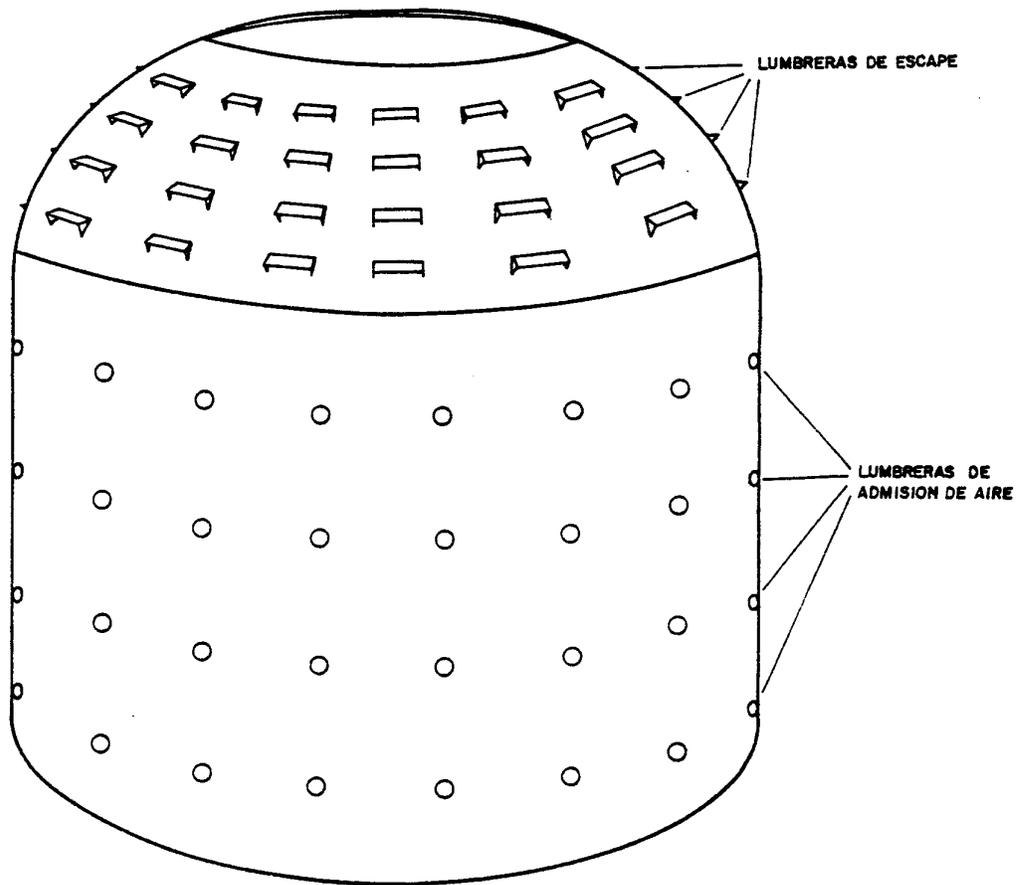
#### 6.2.- HORNO BEEHIVE

Es otro tipo de horno discontinuo que también se utiliza actualmente.

En la Figura 17 se refleja una perspectiva genérica del mismo.

Consta de un cilindro de techo abovedado que se construye por lo general de hormigón. Posee unas lumbreras de admisión de aire distribuídas por todo él, otras de salida dispuestas en el techo, una puerta metálica lateral de carga y descarga, y una abertura circular en la parte superior del mismo, para poder efectuar las operaciones de carga y encendido.

HORNO BEEHIVE TIPICO



Su capacidad de tratamiento oscila comúnmente alrededor de 180-325 m<sup>3</sup> por ciclo. El tiempo de duración de un ciclo normal varía entre 10 y 20 días.

Una vez que se ha cargado, se rocían desde la parte superior unos 60-90 cm de la parte central de la carga, con una pequeña cantidad de combustible, para facilitar el encendido de la misma.

Iniciada la ignición de forma favorable, se cierra herméticamente su parte superior, mientras que la parte inferior de la puerta se hace totalmente estanca. Las lumbreras de admisión y escape se deben manejar diestramente para asegurar la uniforme carbonización de la madera.

Los rendimientos que se obtienen oscilan por lo general alrededor del 25% sobre materia prima desecada.

### 6.3.- HORNO MARK V

Es el resultado de la experiencia adquirida en Uganda con hornos de acero portátiles durante tres años.

En la Figura 18 se indica un diagrama del mismo, con sus principales componentes, así como un detalle de un canal o soporte.

Se compone de dos cuerpos cilíndricos interconectados - de 2,32 m de diámetro y 0,91 y 0,75 m de altura, respectivamente, con una cubierta cónica de 0,46 m de alto en el centro, rematada por una tapadera central. Todo él descansa sobre ocho canales de 15 x 9 x 70 cm, dispuestos radialmente, y provistos de salidas para gases, de abertura variable, y de colleras pa

HORNO MARK V TÍPICO

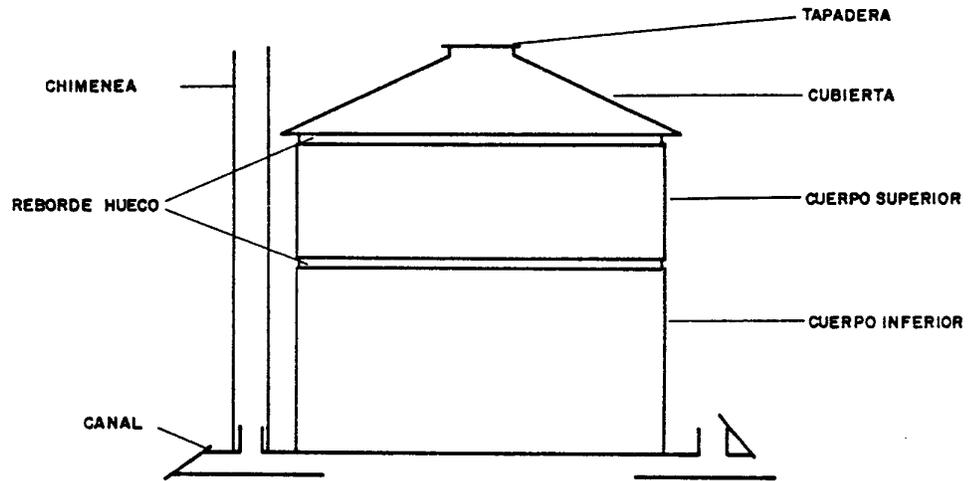


DIAGRAMA GENERICO

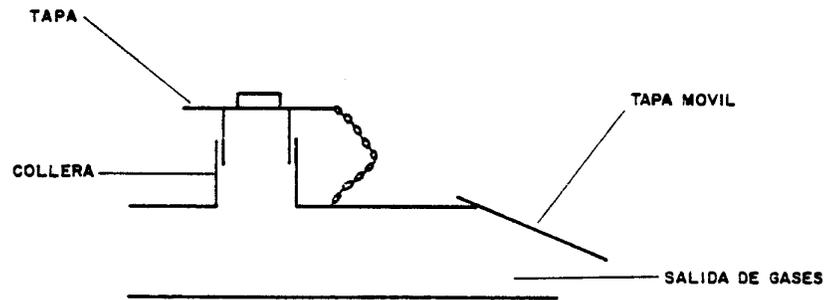


DIAGRAMA DETALLADO DE UN CANAL

ra dejar que entre el aire o que salgan los gases, a voluntad del operador. Las colleras sirven también para sujetar durante el proceso de carbonización las chimeneas o tubos verticales para humos. En el momento de invertir el tiro, se ajustan a estas colleras cuatro chimeneas de hierro galvanizado, de 10 cm de diámetro y 2,30 m de altura.

Aunque algunos tipos de carbón vegetal de uso industrial exigen características particulares, se ha comprobado que es posible producir buen carbón con casi cualquier tipo de madera, como es el caso de los desechos de los aserraderos y los residuos forestales. Sin embargo, debe prestarse atención a los puntos siguientes:

Tamaño: Cuanto más pequeño sea el trozo de madera, con mayor rapidez se obtendrá el carbón. Se ha visto que el tamaño más práctico es el de 30-50 cm de largo y 30 cm de diámetro. Cuando los tarugos sean mayores convendrá partirlos.

Humedad: Durante los primeros tres meses después de la corta, la madera pierde una cuarta parte, aproximadamente, de su peso, siendo esta pérdida, casi por completo, de agua. La humedad que se elimina de la madera apilada es proporcional al tiempo, disminuyendo considerablemente al cabo de tres meses. Transcurrido este tiempo, no se consigue nada con dejarla secar más tiempo al aire libre, pudiendo incluso producirse pérdidas como consecuencia de los ataques de hongos e insectos, que estropean la madera. Se recomienda cortar la madera cuatro semanas antes, por lo menos, de meterla en el horno, ya que si la madera está verde, el período de carbonización dura más, y el carbón que resulta es peor que el de la madera seca, alcanzándose además un menor rendimiento.

Idoneidad: Algunos consumidores industriales, requieren un carbón vegetal que cumpla con unas especificaciones particulares y concretas a las cuales no se ajustan algunos tipos de madera. Este punto sólo puede decirse efectuando análisis de laboratorio con el carbón que se produce.

En cuanto a su emplazamiento se debe elegir un lugar seco donde no haya tocones ni vegetación, que deben arrancarse hasta dejar un espacio circular de 2 m de diámetro, aproximadamente. En él se colocan los accesorios de los ocho canales, que se disponen como los radios de una rueda. Sobre ellos se coloca el cuerpo inferior del horno, de modo que entre las caras internas de las colleras y sus paredes, quede por lo menos 15 cm.

Si se quieren obtener buenos resultados, el fondo del horno se debe de cargar con precisión. Los trozos de madera se colocan radialmente entre los canales, a partir del centro. Entre ellos, y a 30 cm de distancia de la pared del horno y hacia el centro, se dispone leña delgada o residuos de madera chamuscada de una carga anterior, conjuntamente con algunos productos de desecho inflamables, como papeles, trapos, etc. A continuación, se sitúa transversalmente sobre los trozos de madera y los canales, una capa de materia prima. En épocas de lluvias, se puede verter medio litro de aceite sobre la madera de encender (leña delgada o residuos chamuscados de una carga anterior), para asegurar el éxito del encendido. Si la madera se corta al tamaño recomendado, se empezará la carga dejando caer el material dentro del cuerpo inferior del horno, sin ninguna precaución especial, hasta llenarlo. Entonces, se llena de arena el reborde hueco superior de este cuerpo, para situarse después sobre él, el segundo cuerpo. Se continúa cargando

de madera el horno, hasta que el vértice del montón cónico sobrepase el reborde del segundo cuerpo, de forma que después de llenar de arena este reborde hueco, se pueda colocar la cubierta, sin la tapa, dejando aproximadamente un espacio de 10 cm entre ella y el cuerpo superior. Si la madera está mojada, se debe aumentar este espacio hasta 15 cm.

Una vez abiertas todas las tapas y aletas de los canales, se encienden los ocho puntos de ignición. Si el horno se ha encendido bien, saldrá mucho humo por su parte circular superior y por el centro destapado. Entonces, se cubren con arena o tierra los puntos de ignición situados entre los canales, pero teniendo cuidado de no cubrir éstos. Al cabo de media o una hora, los bordes de la parte superior cónica habrán encajado en el reborde hueco, lleno de arena, del cuerpo superior del horno, momento en el que se procede a:

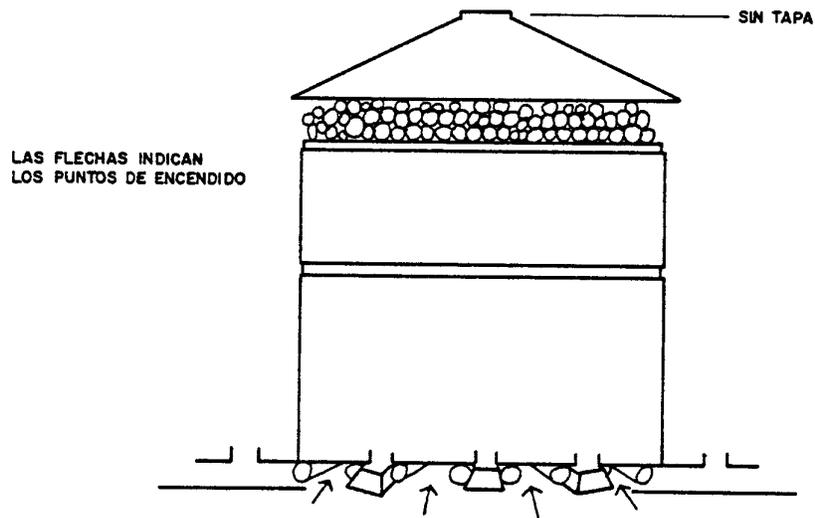
- . Encajar las chimeneas en las cuatro colleras alternas
- . Cerrar todas las tapas móviles de los canales
- . Poner la tapadera de la parte superior cónica.

El aire circulará entonces libremente por las cuatro colleras abiertas y después de calentarse y repartirse por el horno, saldrá por las chimeneas.

En la Figura 19 se pueden contemplar un diagrama de las distintas fases de la carga y un esquema del horno en el momento del encendido.

Después de todas estas operaciones, sólo la práctica y experiencia indicará lo que debe hacerse. Si de todas las chi

HORNO MARK V TÍPICO



ESQUEMA EN EL MOMENTO DEL ENCENDIDO

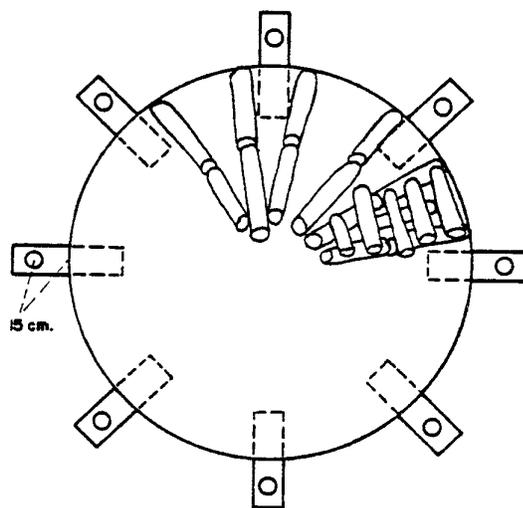


DIAGRAMA DE LA CARGA

meneas sale un humo blanco y espeso, es que el horno funciona bien. Sin embargo, si disminuye la producción de humo debido a la falta de oxígeno, se pueden abrir las tapas de los extremos de los dos canales que están a cada lado de la chimenea - que no funciona bien. Si no basta con esto, se quita la tierra o arena durante cinco o diez minutos, de los puntos de ignición adyacentes a esa chimenea.

Al cabo de ocho o diez horas, se debe desplazar cada chimenea hacia la izquierda de la collera, a fin de que las entradas se conviertan en salidas, y viceversa, con lo cual se impedirá que en las entradas de aire se acumule una excesiva cantidad de cenizas.

Cuando la carbonización ha terminado, deja de salir humo, o sale muy poco y transparente. Entonces se cerrará el horno, para lo cual se quitarán las chimeneas y se cerrarán todas las tapas y tapaderas, echando arena o tierra en todos los puntos por donde pueda penetrar el aire.

La carga, el montaje y el encendido de un horno requieren por término medio, dos horas y dos hombres; la carbonización, de 16 a 24 horas, el enfriamiento, de 8 a 12 horas y la descarga 3 horas.

Con dos operarios con experiencia, dos hornos pueden producir 3 toneladas de carbón por semana.

#### 6.4.- RETORTA CONSTANTINE

Se desarrolló en Australia Occidental con la intención de utilizarse en los países en vías de desarrollo, así como en las instalaciones de pequeña y gran escala, donde los costes

de la mano de obra son bajos.

Las hay de dos tamaños, con producciones de 1 y 2 toneladas, respectivamente, por ciclo completo. Cada ciclo tiene un período de duración de dos días.

La de mayor tamaño se considera más rentable, pudiéndose emplear durante bastante tiempo en un lugar fijo, para desplazarse únicamente cuando los costes del transporte de la leña en cada caso concreto así lo aconsejen. Entonces se necesitará una pequeña grúa móvil, si bien la necesidad de cambio solo tendrá lugar por regla general, una vez que se hayan explotado los bosques en un radio de 4 km, lo que equivale a una superficie de 5.000 ha, aproximadamente.

Consta de un cilindro de acero revestido, que se sitúa encima de un hogar en donde se queman los residuos leñosos. Los gases de la combustión se dirigen hacia el interior del revestimiento, sobre la superficie externa total de la vasija interior que contiene la carga de leña, y también a través de una chimenea central. Mediante el accionamiento de una válvula de mariposa de que dispone la chimenea, se puede desviar el flujo de los gases de combustión, proporcionalmente a la superficie total de la retorta. Unas tuberías, dispuestas en la parte inferior de la vasija interna, envían los gases que se desprenden durante el proceso de carbonización, al interior del hogar, con el consiguiente ahorro de combustible y eliminación del problema de contaminación.

La leña desecada al aire se carga en forma de tarugos - de 30 cm de longitud, por medio de unas puertas laterales situadas cerca de la parte superior. La compactación de la materia prima es el mejor procedimiento para reducir su volumen e

incrementar el rendimiento. Con mano de obra barata, una mayor fragmentación de los tarugos, aceleraría el proceso de carbonización, permitiendo una mayor compactación, siempre deseable, y un incremento en la velocidad de producción.

Finalizado el proceso de pirólisis, se enfría la retorta al apagar el hogar y abrir los canales del revestimiento y la chimenea. A continuación se extrae el carbón producido, a través de unas puertas laterales situadas en el fondo de la misma.

Con fragmentos de leña bien desecados al aire libre, el consumo del hogar es inferior a 800 kg por cada tonelada de carbón vegetal elaborada.

Esta retorta es de sencillo y seguro manejo, no necesitando tanto personal adiestrado como en el caso de un horno.

Cuando se utilizan en un determinado lugar y durante largos períodos de tiempo, series de ocho o incluso más, se consigue un funcionamiento más eficaz y las siguientes ventajas posibles:

- . El aislamiento exterior de la retorta con lana mineral o de escoria, puede reducir el consumo de combustible del hogar en un 7 1/2 %, aproximadamente.
- . Esta agrupación permitirá el calentarlas con los gases que se producen al quemar el serrín, las cáscaras, cortezas y otros residuos de inferior calidad, en un horno central especial (Horno Dutch o de parrilla escalonada).

- . Se puede trabajar en condiciones atmosféricas lluviosas mediante la instalación de un simple cobertizo, - que proteja las retortas.
- . El carbón vegetal producido se puede proteger de la lluvia. Su expedición al mercado desde un lugar central es mucho más fácil y económica.
- . La dirección de la explotación total es bastante más sencilla, tanto desde el punto de vista de los recursos forestales como del de los equipos de carbonización.

Según datos experimentales, esta retorta podría durar de 25 a 30 años, aunque sus desplazamientos ocasionales originan algún deterioro, por lo que se estima una vida alrededor de 20 años.

El carbón vegetal que se obtiene es limpio y de buena calidad, con un contenido uniforme en carbono fijo del orden del 80%.

## 7.- PROCESOS DE PIROLISIS

### 7.1.- PROCESO TECH-AIR

#### 7.1.1.- Generalidades

El estudio de este proceso se inició en la Estación de Experimentación del Instituto Tecnológico de Georgia, en Atlanta. El objetivo principal fue investigar un procedimiento que permitiera eliminar los residuos agrícolas sin contaminación del medio ambiente. Para ello se analizaron sus características combustibles con el firme propósito de incinerarlos. Los trabajos continuaron durante más de nueve años, dando lugar al diseño y funcionamiento de un reactor de cuba vertical, tiro ascendente, de baja temperatura y flujo uniforme. Los resultados alcanzados establecieron el proceso de pirólisis como el método más apropiado para la transformación de los residuos celulósicos y ligninocelulósicos en combustibles limpios y de gran provecho, como el carbón vegetal, aceite y gas.

En Cordele (Georgia), la Compañía Tech-Air construyó una planta experimental de 50 t/día, para utilizar como materia prima principal los residuos de las serrerías. En la actualidad dicha tecnología es propiedad de la División Americology de la Empresa American Can. La planta funcionó satisfactoriamente durante más de un año, habiendo tratado otros compuestos, como los residuos sólidos agrícolas. El carbón y aceite obteni

dos se vendieron como combustible, habiéndose efectuado ensayos de combustión con dichos aceites.

Una perspectiva del proceso de pirólisis llevado a cabo en la Estación de Experimentación del Instituto Tecnológico de Georgia, se puede contemplar en la Figura 20.

#### 7.1.2.- Descripción

En la Figura 21 se indica el diagrama de flujo de una planta de pirólisis para tratamiento de astillas, con una capacidad de 2.000 t/día.

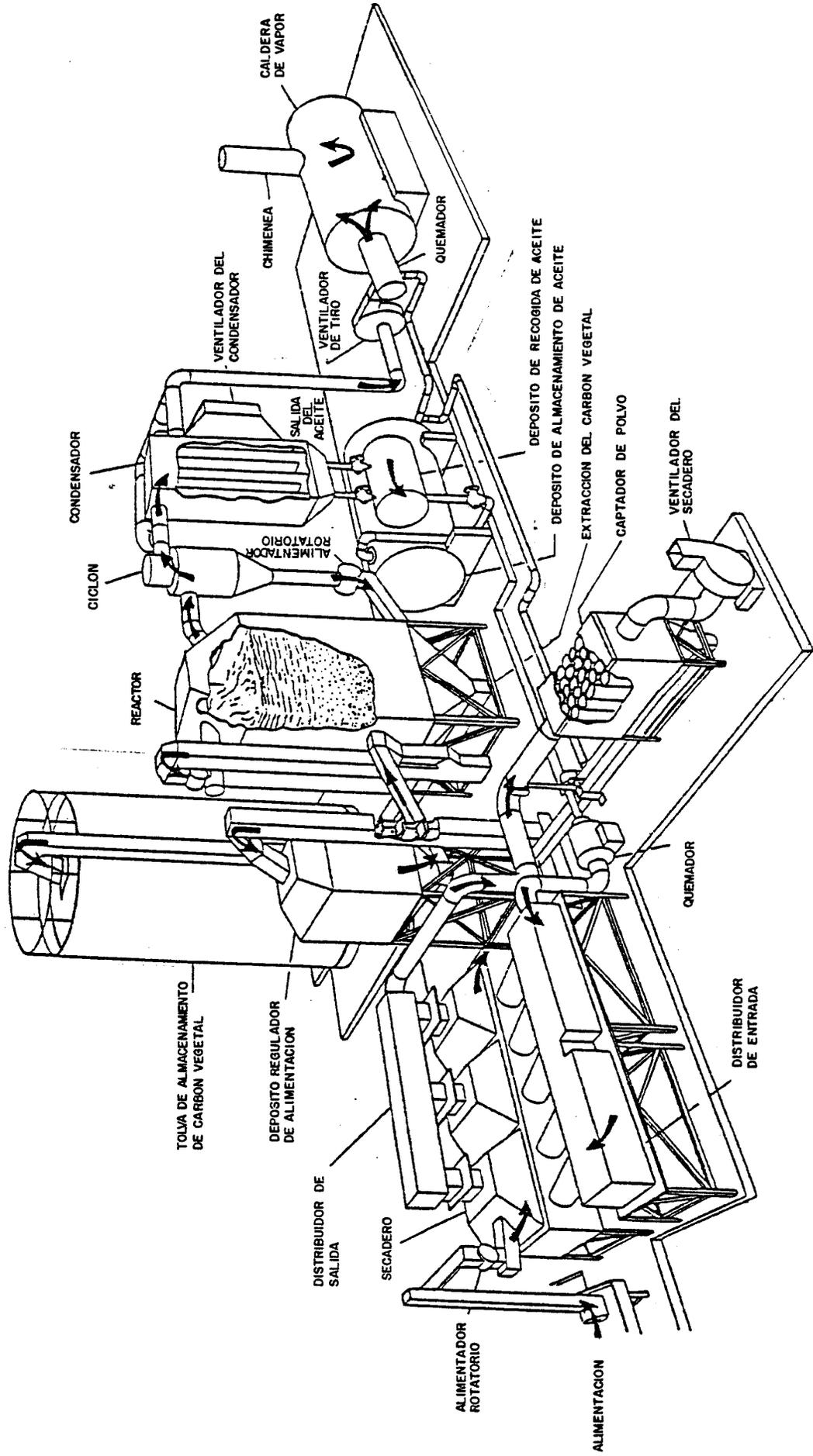
Con el fin de facilitar el proceso de pirólisis, el tamaño de las astillas no debe superar los 5 mm.

La materia prima se almacena en una tolva dosificadora, desde donde pasa al secadero para reducir su contenido de humedad desde un 50 a un 7%, aproximadamente. En esta fase el secadero utiliza una parte del gas producido en el proceso, en vez de cualquier otro tipo de combustible convencional. Únicamente se emplea gas natural o fuel-oil en el período de arranque.

A continuación, las astillas se transportan neumáticamente hasta un ciclón, en donde se verifica la separación sólido/gas. Las astillas, ya desecadas, se envían a una tolva reguladora, con el único propósito de conseguir una alimentación del reactor lo más uniforme posible. La materia prima, a la entrada del reactor, se compone principalmente de astillas desecadas y de una cierta cantidad de lodos en estado de suspensión.

El reactor es un horno de cuba vertical, en cuyo inte-

PERSPECTIVA DEL PROCESO DE PIROLISIS DE LA ESTACION DE EXPERIMENTACION DEL INSTITUTO TECNOLOGICO DE GEORGIA



rior, se establece una doble corriente de sentido contrario. - Por una parte, la de los componentes sólidos, en sentido descendente, y por otra la de los gases calientes, en sentido ascendente.

El aire que se necesita para la oxidación parcial de la materia prima, se suministra por la parte inferior del reactor, a través de un plato de distribución. Los productos de la oxidación, a medida que ascienden, calientan la materia prima, provocando las reacciones de la pirólisis.

El carbón vegetal obtenido a los 425-550°C, como consecuencia de la oxidación parcial, se retira por la parte inferior del reactor mediante un transportador, para ser enfriado posteriormente y enviado a una tolva de almacenamiento. A continuación se conduce por medio de un transportador de tornillo sin fin refrigerado por agua a un dispositivo enfriador rotatorio e inclinado, que lo enfría por debajo de su temperatura de autoignición (66°C).

Los gases que se desprenden en el proceso contienen una fracción gaseosa combustible, aceite y partículas sólidas, saliendo del reactor a una temperatura entre 180 y 260°C. Inicialmente, estos gases se enfrían con fuel-oil en un Venturi refrigerado, para pasar posteriormente a un depósito refrigerado, en donde se produce la separación del aceite y gases incondensables. Estos gases se dirigen a un equipo de decantación - para eliminar los aerosoles, siendo purificados después en un precipitador electrostático. Los gases así depurados son los que se utilizan en el proceso de secado y en la caldera para producir vapor y generar energía.

Un filtro rotatorio de vacío separa los componentes só

lidos del aceite, obteniéndose una costra de lodo que se recicla de nuevo hacia el interior del reactor. Finalmente, se bombea el aceite hasta un depósito de almacenamiento. Para mantener la capacidad de bombeo, es posible que se necesite calentarlo a 90°C en la estación de almacenamiento.

Una vez que el proceso ha alcanzado el régimen de funcionamiento uniforme, el aceite se recicla a 50°C, desde la estación de almacenamiento hasta el Venturi refrigerado.

Esta planta se diseñó para producir su propia energía eléctrica, aprovechando el gas obtenido en el proceso. Este gas se utiliza para disponer de vapor recalentado a alta presión, que acciona una turbina con la consiguiente producción de energía eléctrica.

Los principales factores a tener en cuenta en una planta como esta, son los siguientes:

- . Cantidad de materia prima que se debe disponer para un funcionamiento continuo y uniforme.
- . Disponibilidad de capital.
- . Mano de obra técnicamente cualificada.
- . Existencia de unos mercados apropiados para el aprovechamiento de los productos obtenidos.

Este proceso se encuentra actualmente en un estado de desarrollo comercial. Se podrían diseñar pequeñas plantas para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz, cortezas de coco, residuos agrícolas y de serrerías, satisfaciéndose por una par

te sus propias necesidades energéticas, y obteniéndose, por otra, combustibles de idónea utilización en otras industrias, en sustitución de los productos derivados del petróleo. En estos casos, el diseño se podría simplificar con el empleo de sistemas menos complejos y con ocupación de mayor mano de obra. De esta forma se conseguiría mitigar en cierto modo el alto grado de desempleo y al mismo tiempo obtener combustibles más competitivos.

### 7.1.3.- Diseño

Las principales hipótesis y parámetros que se consideraron en el diseño de esta planta de pirólisis fueron las siguientes:

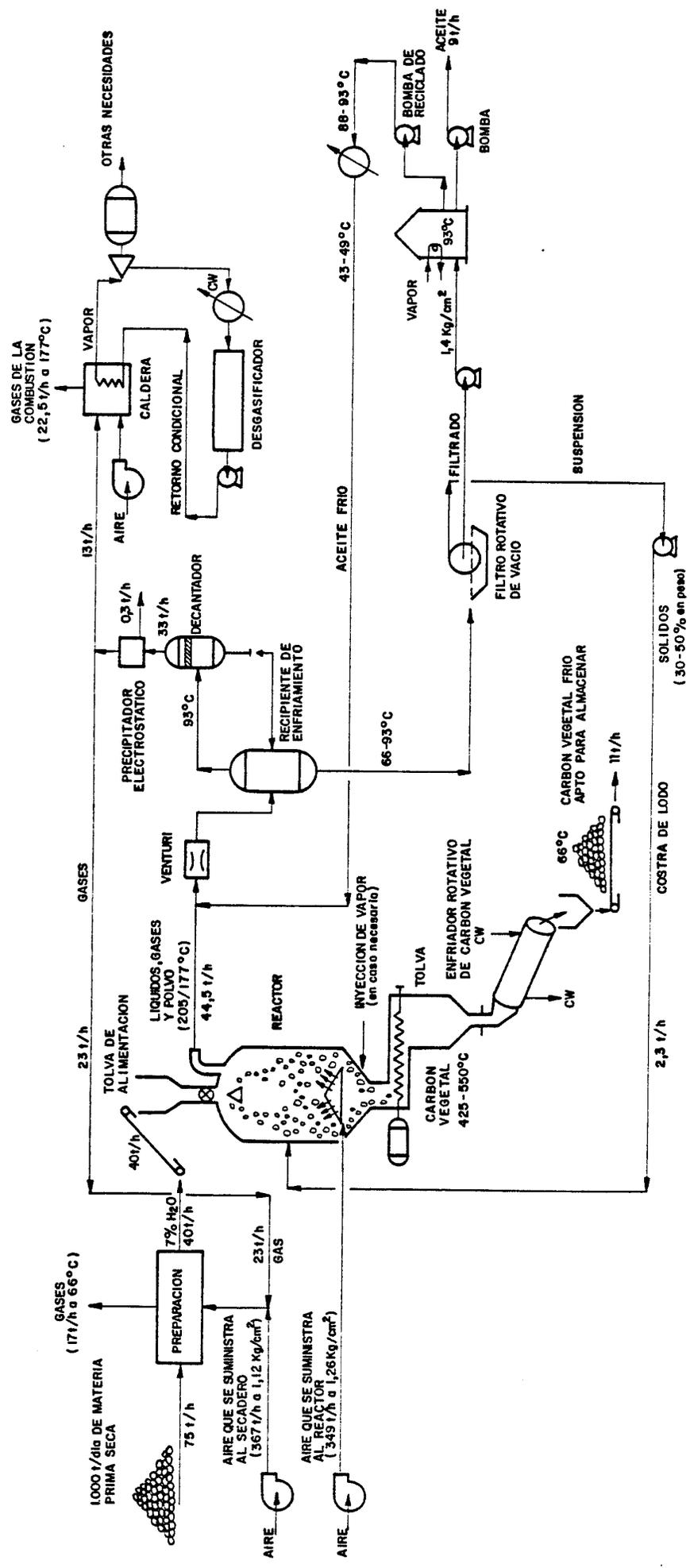
- . Contenido de humedad de las astillas del orden del 50%, aproximadamente.
- . La planta debía autoabastecerse energéticamente. El combustible que se necesitara para el funcionamiento del secadero y de la caldera procedería del gas producido en el proceso de pirólisis.
- . El reactor funcionaría a una presión ligeramente superior a la atmosférica (unos  $1,3 \text{ kg/cm}^2$ , aproximadamente).
- . La temperatura de los gases desprendidos en el proceso de pirólisis variaría entre 150 y 205°C, a la salida del reactor.
- . El consumo de materia prima por parte del reactor oscilaría entre 730 y 975  $\text{kg/hr-m}^2$  de sección transversal.

- . Para el tratamiento de las 2.000 t de materia prima fresca/día, se dispondría de cuatro reactores de 3,65 m; 15,2 cm de D.I. y 6,10 m de altura, cada uno de ellos.
- . El agua contenida en la materia prima y la que se produce en las reacciones del proceso, se supuso como parte constituyente del aceite, modificando la viscosidad del medio.
- . El enfriamiento de los gases en el depurador de Venturi requeriría grandes cantidades de aceite. Teniendo en cuenta que el calor latente de condensación del aceite varía de 110 a 165 Kcal/kg, y que los gases se enfrían desde los 150-205°C a 66-93°C, se necesitaría una relación aceite reciclado/aceite producido comprendida entre 15:1 y 20:1.

#### 7.1.4.- Balace de materia y energía

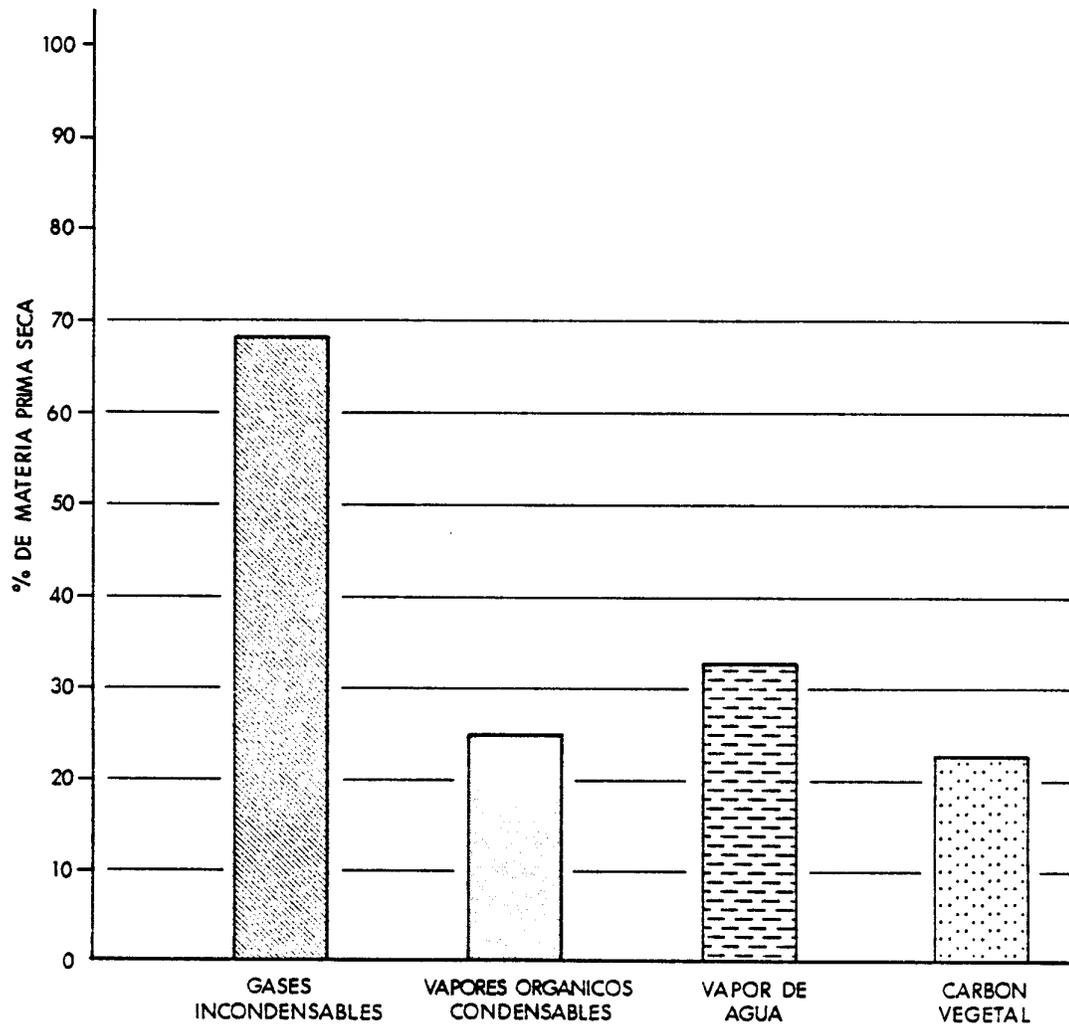
Los balances aproximados de materia y energía de la planta de pirólisis se indican en la Figura 21 y en la Tabla 7, respectivamente. En la Tabla 8 y en las Figuras 22 y 23 se hace un resumen de los rendimientos en peso y energía que se alcanzaron al tratar diversos productos leñosos, como astillas, cáscaras, cortezas y mezclas de serrín y corteza de pino. Asimismo, en la Figura 24 se indica el contenido energético materia prima/productos de pirólisis para el caso de una mezcla de corteza y serrín de pino. Finalmente, en la Figura 25 se puede contemplar el poder calorífico superior de los productos obtenidos en la pirólisis de una mezcla de corteza y serrín de pino, en función de la producción de carbón vegetal.

DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA PLANTA DE PIROLISIS CON UNA CAPACIDAD DE TRATAMIENTO DE 2000 t DE ASTILLAS / DIA

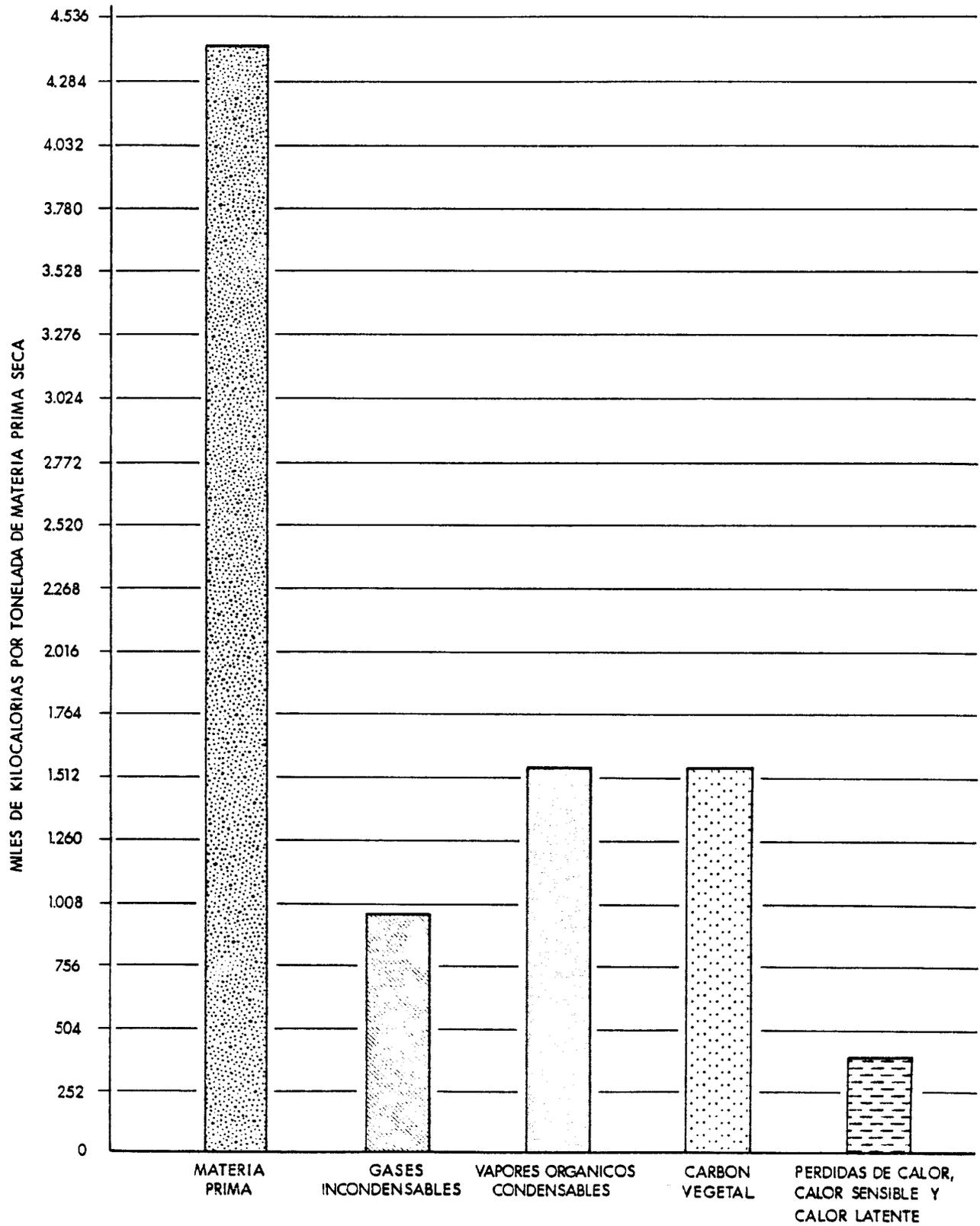


REFERENCIA: "BIOMASS CONVERSION PROCESSES FOR ENERGY AND FUEL"

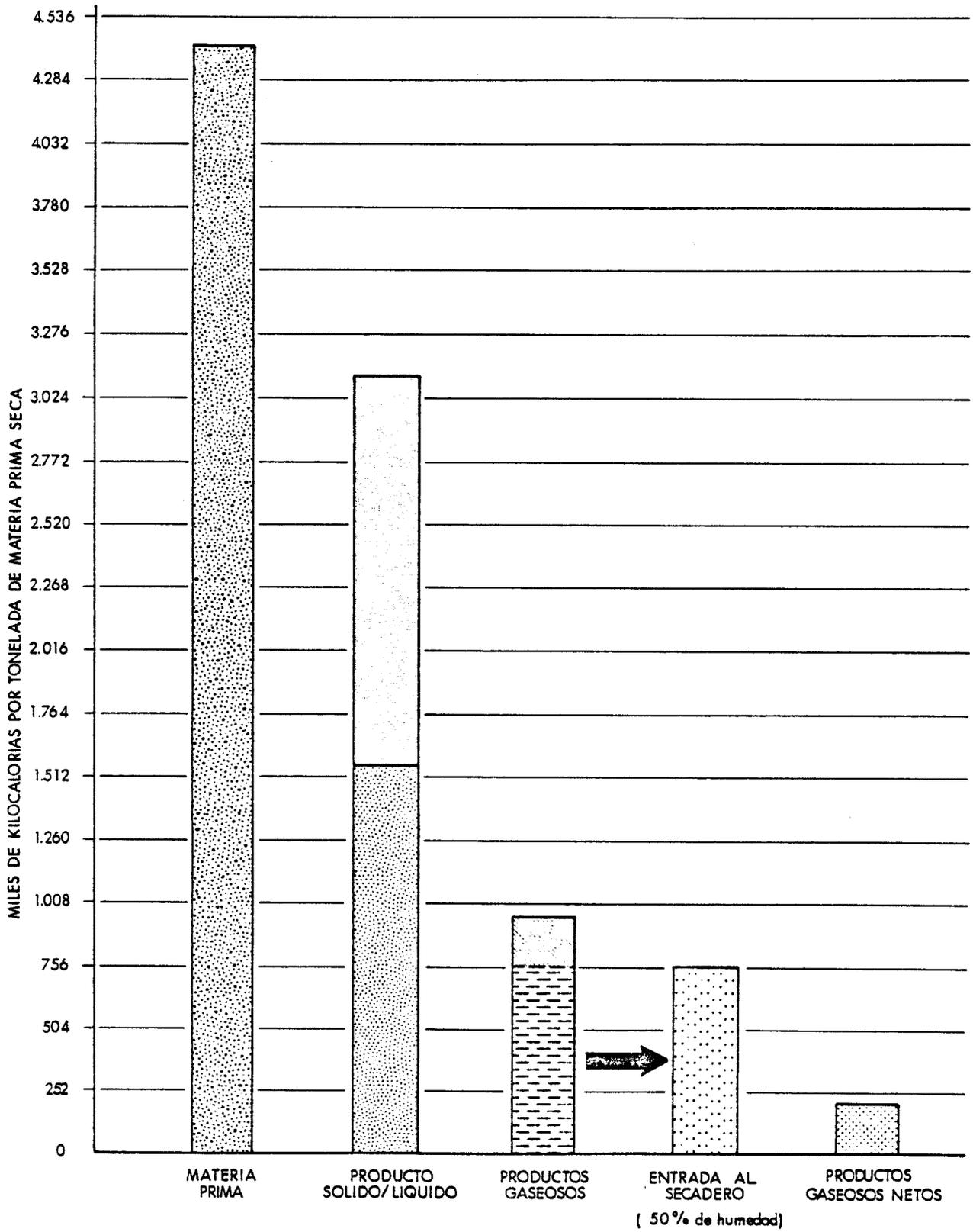
BALANCE DE MATERIA DE UNA MEZCLA DE CORTEZA Y SERRIN DE PINO



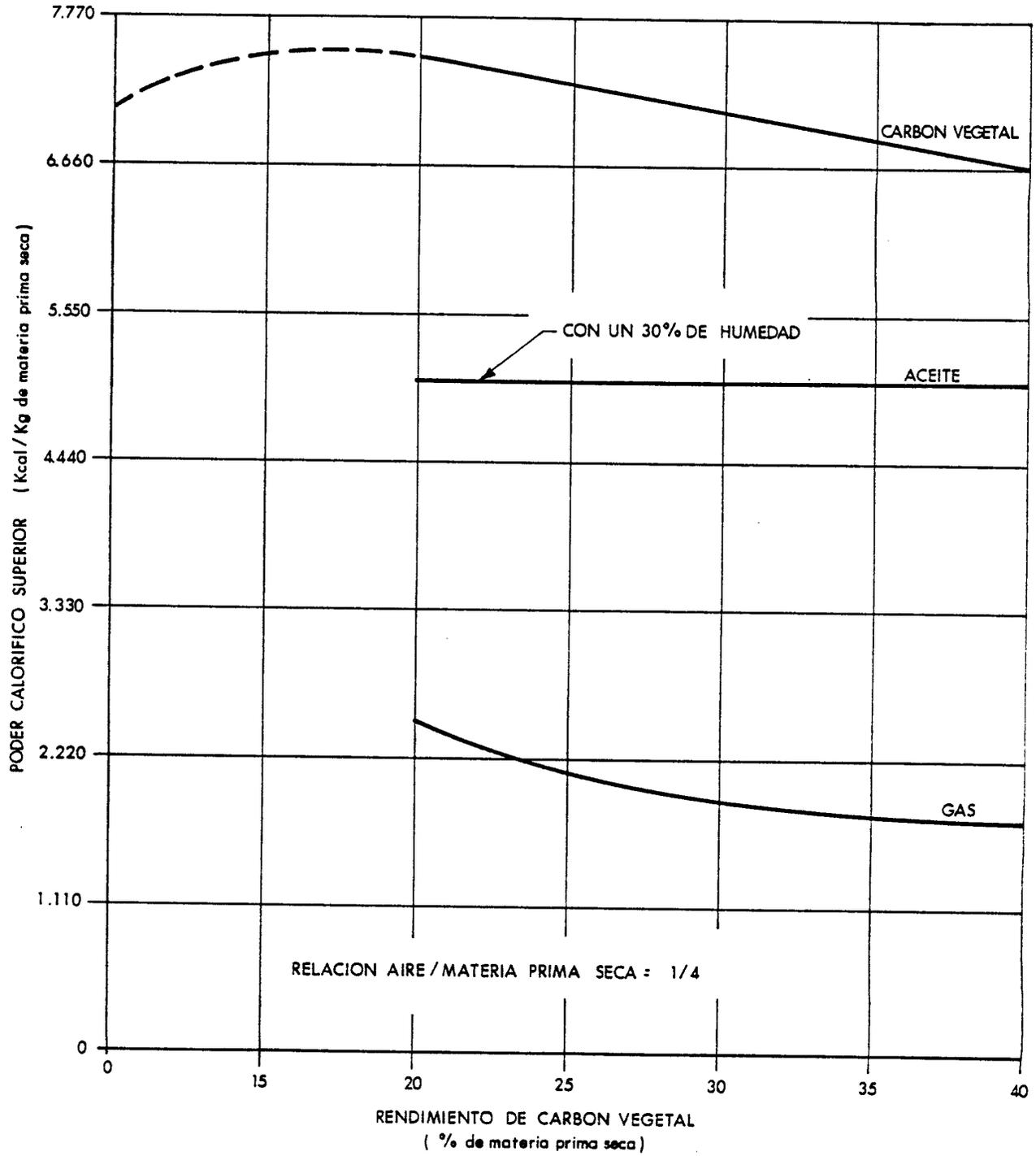
BALANCE ENERGETICO DE UNA MEZCLA DE CORTEZA Y SERRIN DE PINO



CONTENIDO ENERGETICO MATERIA PRIMA / PRODUCTOS DE PIROLISIS  
PARA UNA MEZCLA DE CORTEZA Y SERRIN DE PINO



PODER CALORIFICO SUPERIOR DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS EN LA PIROLISIS DE UNA MEZCLA DE CORTEZA Y SERRIN DE PINO, SEGUN LOS RENDIMIENTOS DE CARBON VEGETAL QUE SE ALCANCEN.



REFERENCIAS. " A VERTICAL BED PYROLYSIS SYSTEM "

" THIRD WORLD APPLICATION OF PYROLYSIS OF AGRICULTURAL AND FORESTRY WASTES "

TABLA N° 7.- Resumen del proceso de la planta de pirólisis de 2.000 t de materia prima fresca/día

	<u>Capacidad</u>	<u>Coste unitario</u>
<b>Materia Prima:</b>		
. astillas de madera fresca .....	2.000 t/día (83,3 t/h)	11,13 \$/t
<b>Productos:</b>		
. aceites de pirólisis .....	53,8 x 10 <sup>6</sup> Kcal/h	28 \$/10 <sup>6</sup> Kcal
<b>Subproducto:</b>		
. Carbón vegetal .....	83,8 x 10 <sup>6</sup> Kcal/h	5,9\$/10 <sup>6</sup> Kcal
<u>Balance Energético</u>	<u>10<sup>6</sup> Kcal/h</u>	<u>Porcentaje</u>
<b>Entradas:</b>		
. materias primas, astilla de ma dera fresca .....	186,9	100
. electricidad contratada .....	-	-
<b>Salidas:</b>		
<b>. Productos:</b>		
aceite .....	53,8	28,8
<b>. Subproductos:</b>		
carbón vegetal .....	83,8	44,8
. Calor desprendido al enfriar .	10,8	5,8
Pérdidas (en el secadero y en la caldera) .....	24,9	13,3
Varios .....	13,6	7,3
Total .....	<u>186,9</u>	<u>100,0</u>

Principales servicios

- . Mano de obra (hombres/turno) ..... 13
- . Agua fría ..... 48,8 l/min.
- . Electricidad contratada (Kw) ..... 0

Ref. "Biomass Conversion Processes for Energy and Fuel"

TABLA N° 8.- Resumen de los rendimientos en peso y energía obtenidos en la pirólisis de varios compuestos leñosos

Materia prima	Poder calorífico superior de la materia prima desecada (Kcal/kg)	Humedad (%)	Rendimiento en peso (% de materia prima desecada)			Rendimiento energético (Kcal/kg materia prima desecada)		
			Carbón vegetal	Aceite	Gas Combustible	Carbón vegetal	Aceite	Gas Combustible
Astillas de la parte superior del pino .....	4.960	5,7	20,5	34,6	76	1.460	1.940	1.370
Astillas de la parte superior del pino .....	4.960	5,8	25,6	31,9	71	1.895	1.760	1.105
Mezcla de corteza y serrín de pino .....	4.905	1,4	20,5	19,2	103	1.535	1.210	1.700
Mezcla de corteza y serrín de pino .....	4.780	7,5	24,4	23,7	103	1.840	1.250	1.640
Mezcla de corteza y serrín de pino .....	4.810	13,5	38,2	17,5	111	2.590	600	1.235
Corteza de pino .....	4.945	12,2	18,9	7,8	116	1.345	465	2.915
Corteza de pino .....	4.885	7,4	45,7	12,8	88	3.185	685	730

Referencia: "A vertical bed Pyrolysis System"

### 7.1.5.- Aspectos económicos

Para cualquier estudio económico de una planta es necesario determinar con más o menos aproximación, el coste de los equipos y la inversión total a realizar. Ambos factores son bastante específicos de cada país, dependiendo de una serie de circunstancias tales como la disponibilidad de los equipos, licencias, derechos de patente, diseño de ingeniería, medios de producción, disponibilidad de capital y tipos de interés y financiación. Por otra parte, sin conocer el precio de la mano de obra local y el de la materia prima, no se puede evaluar el costo de los productos obtenidos en la planta.

En el caso de la planta de pirólisis de 2.000 t/día, se determinarían estos costes teniendo en cuenta los siguientes - datos:

- . Materia prima (astillas) ..... 83,3 t/h
- . Productos (aceite) ..... 53,8 x 10<sup>6</sup> Kcal/h
- . Subproductos (carbón vegetal) ... 83,8 x 10<sup>6</sup> Kcal/h

y sumando los siguientes componentes:

- . Inversión
- . Coste de la materia prima
- . Gastos de funcionamiento y suministros
- . Gastos de mantenimiento y materiales
- . Coste de la mano de obra
- . Costes fijos (menos amortización)
- . Costes de los servicios contratados.

Conviene indicar que en caso de riesgo controlado, el coste de la materia prima es superior al resto de los demás, mientras que en caso de riesgo incontrolado, son parecidos los costes de la materia prima y las cargas de capital.

#### 7.1.6.- Situación actual

Como en cualquier proyecto de desarrollo tecnológico, el proceso Tech-Air presentó numerosos problemas a la hora del diseño de los equipos, como la manipulación mecánica de la materia prima, la inyección de aire al reactor, la extracción del carbón producido así como su posterior enfriamiento y manejo, la refrigeración de los gases desprendidos con el fin de recuperar el aceite, y muchos otros, principalmente de tipo mecánico.

Con la experiencia adquirida en las distintas fases del trabajo, muchos de dichos problemas se solucionaron. Sin embargo, esto no quiere decir que en el diseño a gran escala no se presenten nuevos problemas ni que los equipos funcionen fácilmente desde su puesta en marcha.

Algunos de los problemas que pueden aparecer aun en las plantas comerciales de funcionamiento continuo y automatizado - son los siguientes:

- . En la alimentación uniforme de materia prima
- . En la distribución uniforme del aire que se suministra para la oxidación parcial de la materia prima a tratar.
- . En la canalización del avance de la materia prima con motivo de su compactación.

- . En el enfriamiento, extracción y manejo continuo del carbón.
- . En la refrigeración y decantación del aceite.
- . En el filtrado y separación de las fases sólido- líquido.

En algunos de los países en vías de desarrollo, concretamente en Ghana, los equipos de Georgia Tech han instalado un proceso de pirólisis, mediante el empleo de reactores de cuba vertical, flujo uniforme y baja temperatura, habiendo llegado a la conclusión de que su diseño, fabricación y funcionamiento, puede ser satisfactorio y rentable para la mayoría de ellos.

## 7.2.- PROCESO PYRO SOL

### 7.2.1.- Generalidades

En la ciudad de Redwood del Estado de California, está funcionando una planta de pirólisis de 50 t/día para el tratamiento de neumáticos, residuos sólidos y restos triturados y desmenuzados de automóviles.

La planta se autoabastece energéticamente, aunque requiere para su arranque gas natural y otros servicios.

Los productos que se obtienen son carbón vegetal y gas. Una parte del gas, compuesto predominantemente por hidrógeno y monóxido de carbono, se quema en ocho tubos situados en la parte superior del reactor, con el fin de conseguir el calor necesario para la pirólisis de la materia prima. Para evitar la entrada de oxígeno al reactor, se emplea un sistema de alimenta

ción totalmente hermético. Todo el conjunto, completamente hermético, se aísla con varias capas de fibra de cerámica.

La gasificación se verifica continuamente a medida que la materia prima se acarrea por un transportador vibratorio de 22 m de longitud. El gas sale del reactor a una temperatura de 593°C y una presión mínima de 125 N/m<sup>2</sup> (1,27 cm de columna de agua), pasa a un ciclón con el fin de poder separarse la mayor cantidad posible de partículas que arrastra, y, finalmente, a un dispositivo de depuración o lavado. En estas condiciones, posee un poder calorífico comprendido entre 3.500 y 4.500 Kcal/Nm<sup>3</sup> pudiéndose emplear para generar vapor y energía eléctrica.

En este proceso se pueden tratar compuestos con un 50% - de humedad, siendo el rendimiento térmico de la transformación hasta de un 60%.

Aunque esta tecnología se ha desarrollado a nivel comercial, se debe tener en cuenta a la hora de su posible aplicación los siguientes hechos o circunstancias:

- . Necesidad de disponer de una materia prima muy desmenuzada y de equipos apropiados que requerirán un continuo mantenimiento, con la consiguiente elevación de los costes.
- . En el caso de materias primas con un alto contenido de humedad, será necesario someterlas a una desecación previa, operación bastante costosa.
- . El transportador vibratorio puede dar lugar a frecuentes averías, requiriendo un alto grado de mantenimiento.

- . La limpieza y depuración del gas es una operación bastante complicada, debiéndose disponer de equipos de continuo mantenimiento.
- . Con este proceso que utiliza un sistema de transporte a velocidad constante, no se puede obtener un carbón de calidad, al emplear materias primas de características variables.
- . Necesidad de efectuar grandes inversiones y de disponer de un personal altamente cualificado.

#### 7.2.2.- Aplicación al caso de los residuos leñosos

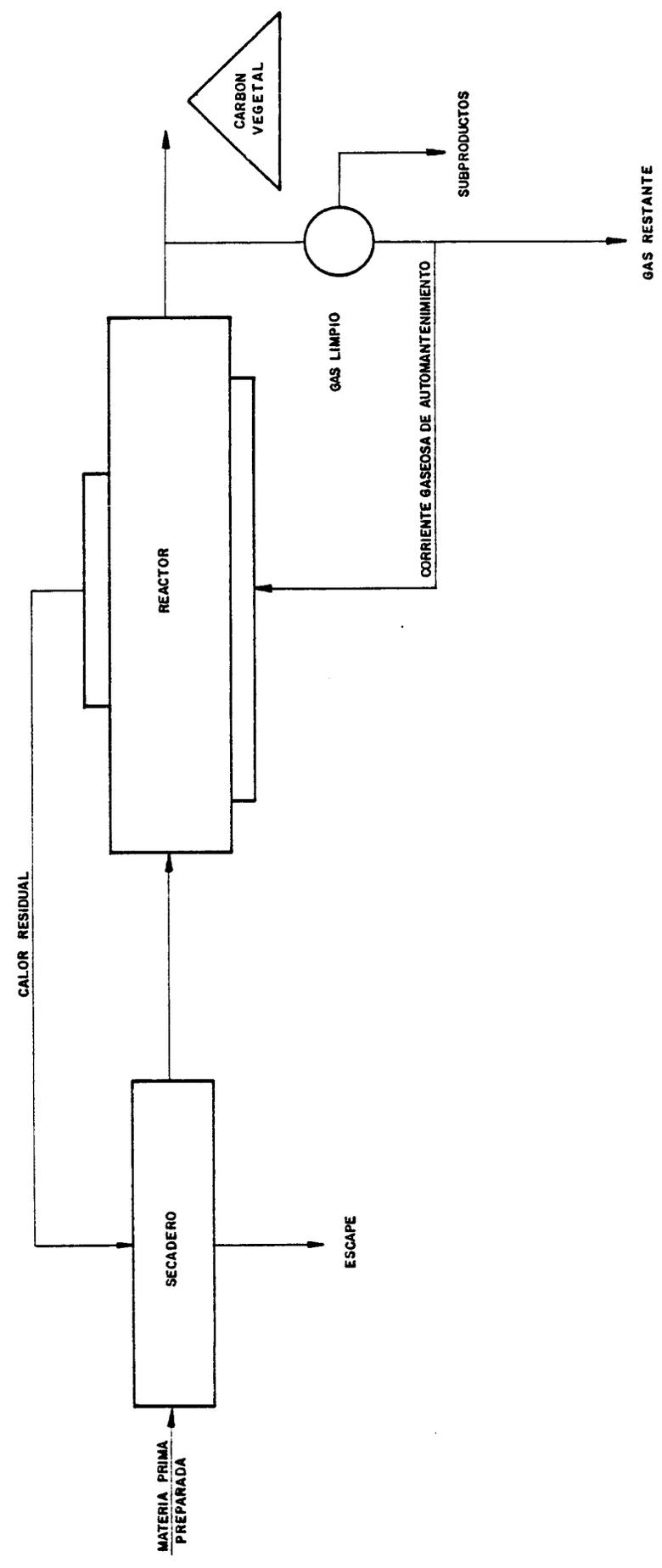
Los residuos leñosos, como cualquier otro elemento constituyente de la biomasa, representan una excelente fuente de materia prima para la aplicación de este proceso.

En la Figura 26 se indica un esquema genérico del mismo.

Entre los compuestos ensayados, se encuentran los residuos del Abeto Douglas o Pinabete del Pacífico, con la siguiente composición media:

- Humedad .....	35,9%
- Volátiles .....	52,5%
- Carbono fijo .....	11,1%
- Cenizas .....	0,5%
- Hidrógeno .....	8,0%
- Carbono .....	33,5%
- Oxígeno .....	57,9%
- Nitrógeno .....	0,1%
- Azufre .....	0,0%

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIROLISIS "PYRO SOL "



El balance energético que se obtuvo en la pirólisis de los mismos fue el siguiente:

- . Poder calorífico superior con un contenido de humedad del 35,9% = 2.920 Kcal/kg  
Calor latente de vaporización del agua (que no se recupera salvo que se condensen los vapores) = 370 Kcal/kg  
Poder calorífico inferior = 2.920 - 370 = 2.550 Kcal/kg

- . Contenido energético total = 2.550.000 Kcal/t.

- . Energía calorífica necesaria para evaporar el contenido acuoso: 756 Kcal/kg x 0,359 x 1.000 kg/t = 271.404 kcal/t

Energía calorífica necesaria para la pirólisis =  
= 504.000 Kcal/t.

Energía total = 775.404 Kcal/t

Calor resid. = 176.400 Kcal/t

Necesidades energéticas netas ..... 599.004 Kcal/t

- . Energía total disponible:

Gas ..... 1.197.800 Kcal/t

Aceite/alquitranes .. 117.400 Kcal/t

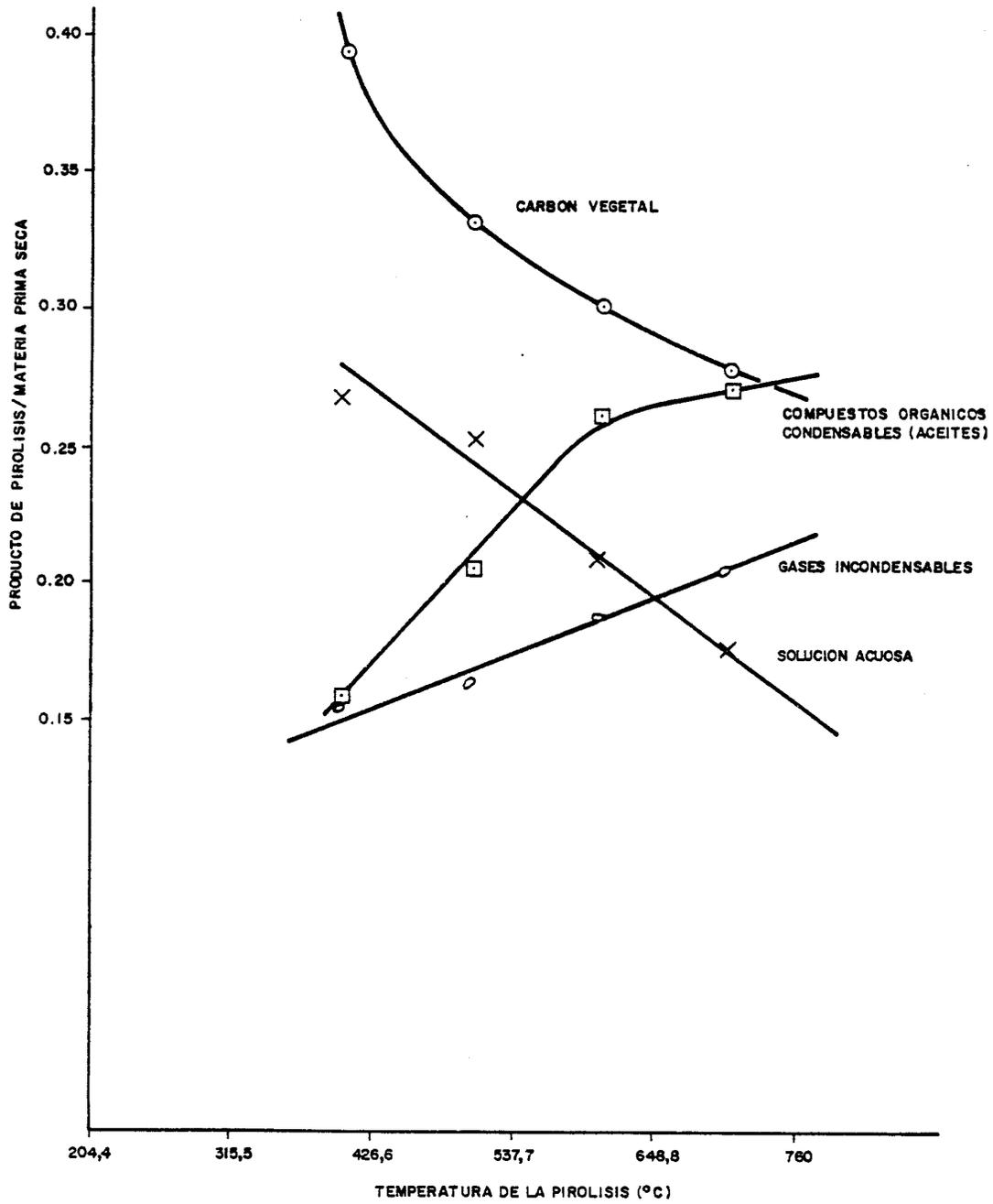
Carbón vegetal ..... 1.234.800 Kcal/t

2.550.000 Kcal/t

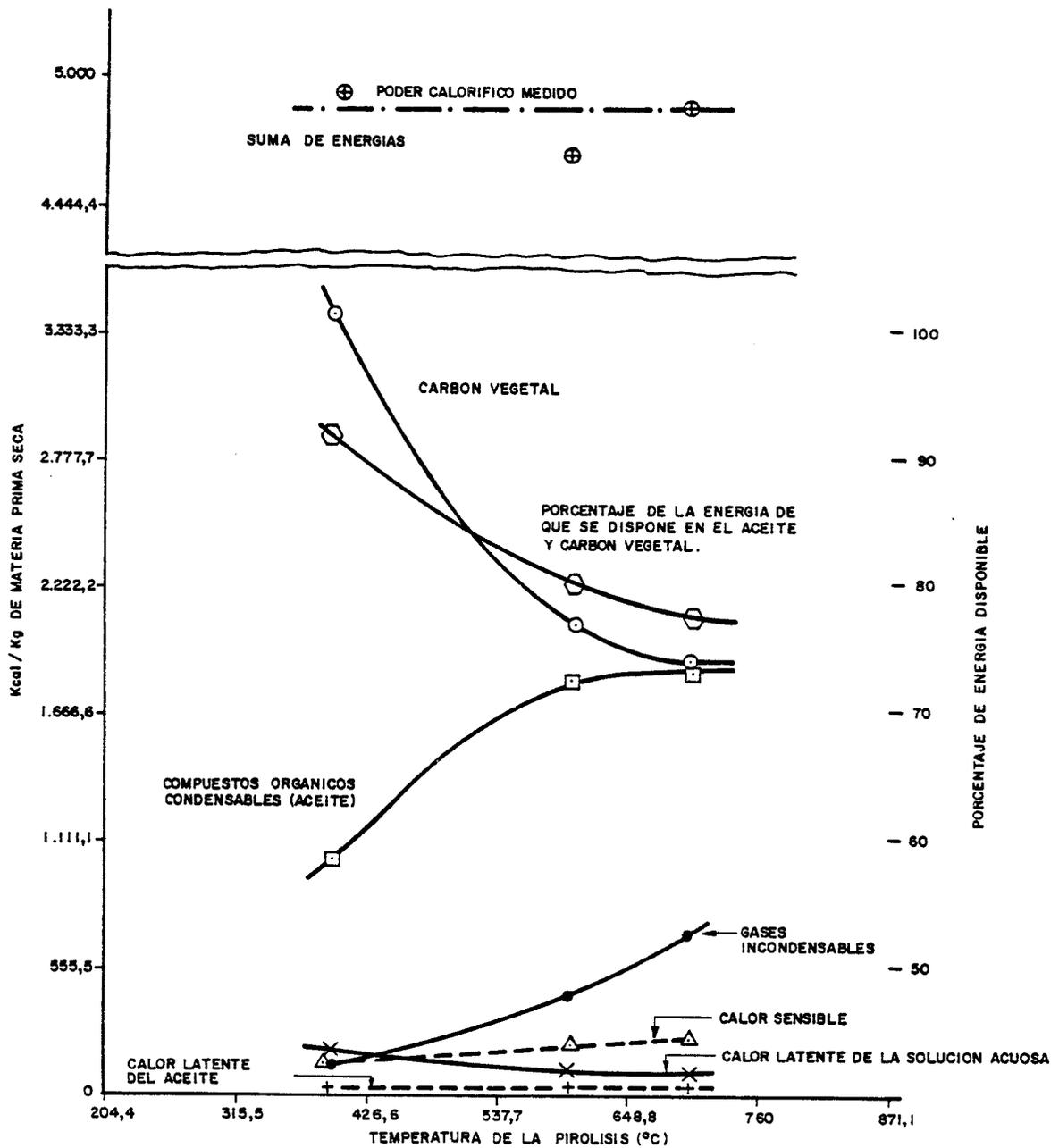
- . Energía total disponible ..... 1.950.996 Kcal/t

Asimismo, se ensayaron mezclas de serrín y corteza de pino, reflejándose los resultados conseguidos en cuanto a los balances de materia y energía en las figuras 27 y 28, respectivamente.

BALANCE DE MATERIA DE LA PIROLISIS DE UNA MEZCLA DE SERRIN Y  
CORTEZA DE PINO



BALANCE ENERGETICO DE LA PIROLISIS DE UNA MEZCLA DE SERRIN Y  
CORTEZA DE PINO



### 7.3.- PROCESO BAILIE

En este proceso se utilizan dos reactores de lecho fluido según se indica en la Figura 29.

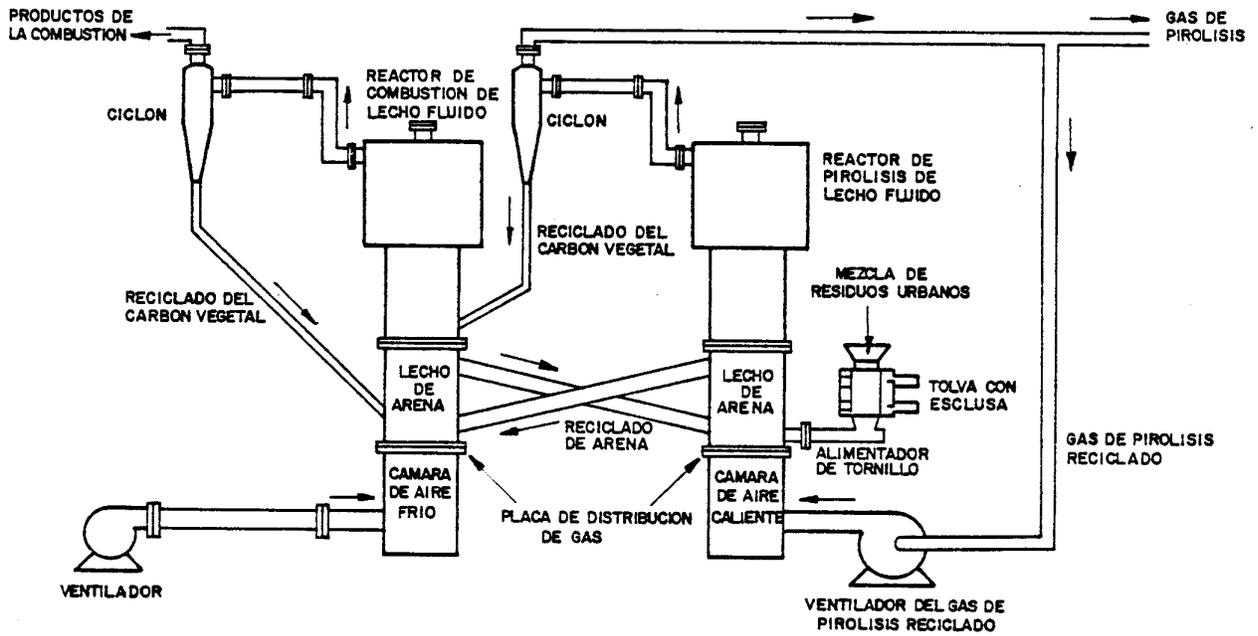
Los diferentes elementos constituyentes de la biomasa, una vez desmenuzados, penetran por la parte superior del reactor de pirólisis, produciéndose con gran rapidez la descomposición térmica e incompleta de los mismos, como consecuencia de la transmisión de calor por parte del lecho inerte (arena caliente). Esta reacción, endotérmica, se mantiene entre 704 y 816°C mediante el reciclado de la arena fluida procedente del reactor de combustión.

Los gases desprendidos en la pirólisis contienen compuestos carbonosos, procediéndose a su separación en un ciclón. El gas, una vez depurado, se envía a los distintos puntos de consumo, a excepción de una parte del mismo que se recicla de nuevo al reactor de pirólisis, para el control cinético de la reacción que tiene lugar en su interior.

El carbón vegetal producido se conduce junto con el aire inyectado al reactor de combustión, en donde la temperatura se mantiene a 982°C. El calor desprendido en la combustión se transmite al reactor de pirólisis a través del lecho inerte, merced al sistema de doble circulación que existe entre ambos reactores (de pirólisis y de combustión, respectivamente). El exceso de carbón se recupera como producto.

Este sistema se ha ensayado a nivel de planta piloto, habiéndose considerado de gran importancia para la pirólisis de los lodos de las aguas de cloaca.

ESQUEMA DEL PROCESO DE PIROLISIS "BAILIE"



Sin embargo, al no haberse experimentado a escala comercial y presentar en fase de desarrollo ciertos aspectos y detalles tecnológicos, no se recomienda su inmediata aplicación, principalmente en los países en vías de desarrollo.

#### 7.4.- PROCESO DAUVERGNE

Este sistema fue ideado por la Compañía Dauvergne Bros en San Leandro, California. Responde a un nuevo concepto en el que se combinan en una simple unidad, los procesos de combustión y pirólisis, respectivamente.

En él se pueden utilizar como materia prima, residuos sólidos y elementos constituyentes de la biomasa, obteniéndose una energía calorífica que se emplea para producir vapor y generar potencia.

Un esquema del mismo se puede observar en la Figura 30.

El reactor empleado es una cámara única en donde las reacciones se verifican en dos etapas. En la primera, tienen lugar en una atmósfera con pobre contenido de oxígeno y, en la segunda, en otra rica en oxígeno.

La materia prima desmenuzada se transporta a la parte superior del reactor vertical, desde donde cae a una parrilla. A continuación, tiene lugar el suministro de aire, con la consiguiente oxidación parcial y producción del calor necesario para el proceso de pirólisis. Los gases que se desprenden en el mismo, evaporan el contenido acuoso de la materia prima y salen por la parte superior del reactor, estableciéndose una doble circulación de sentido contrario, entre la materia prima que alimenta al reactor y la susodicha mezcla de gases y vapor de agua.

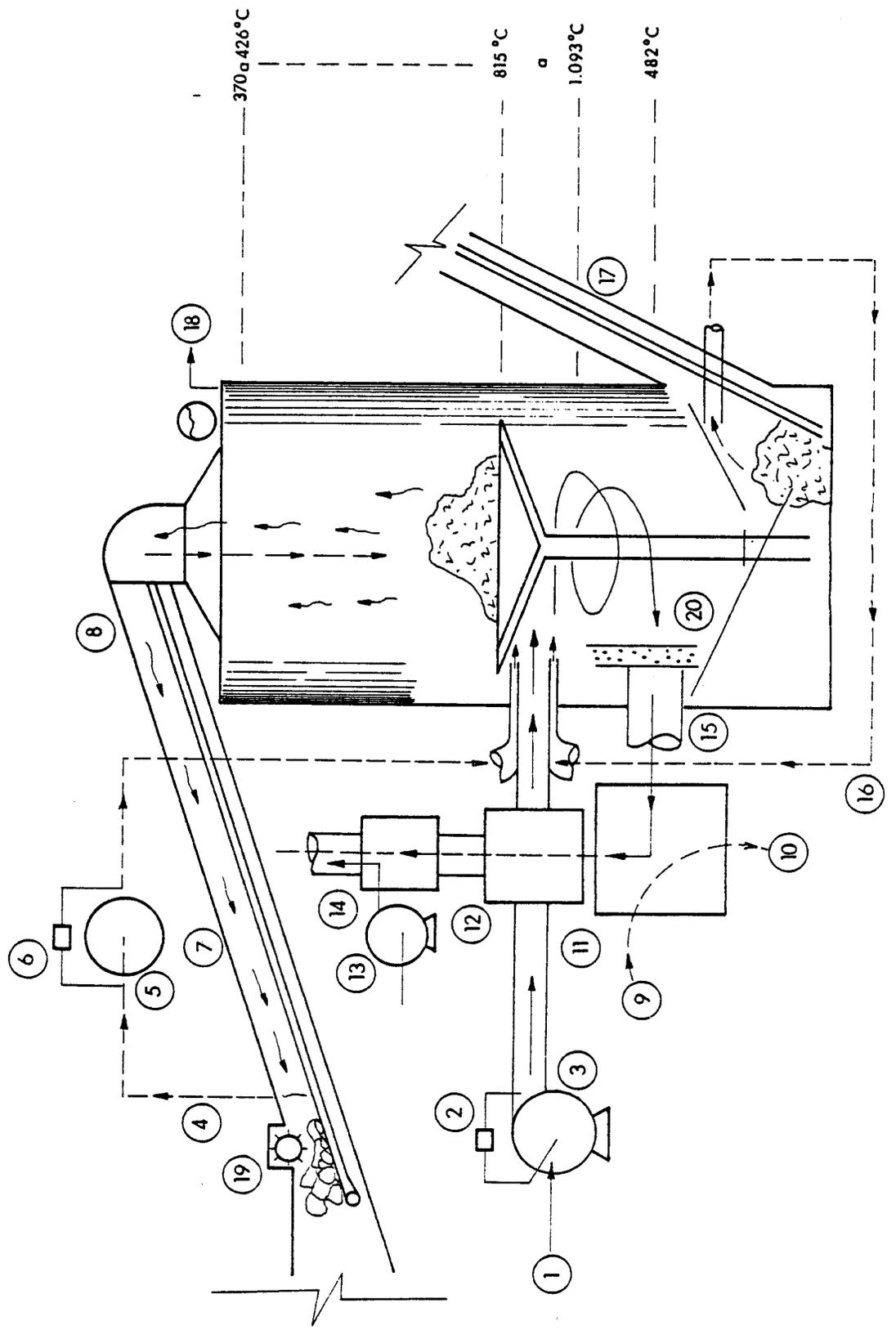
Simultáneamente, en la parte inferior del reactor se produce la combustión de gases con un 50% de exceso de aire, y el intercambio calórico entre los productos de dicha combustión y el agua que circula por los tubos de la caldera.

La caldera es de diseño especial. Carece de colector de sedimentos, poseyendo únicamente un colector de vapor. Sus tubos se disponen coaxialmente y en voladizo, con un diámetro de 3/4 y 1 1/2" para los interiores y exteriores, respectivamente. La circulación del agua tiene lugar de dentro a fuera. La transmisión de calor se verifica predominantemente por radiación, ajustándose el colector de vapor a los tubos sobrecalentados.

Este reactor puede disponer de seis a siete calderas unidas por un colector común.

La primera instalación que esta Compañía tiene pensado realizar será en Pleasanton, California, para una planta de tratamiento de residuos sólidos de 100 t/día.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIROLISIS "DAUVERGNE"



LEYENDA

- 1.- Admisión de aire
- 2.- Llave de paso del ventilador
3. Ventilador
- 4.- Conducto de recirculación de los gases de combustión
- 5.- Ventilador
- 6.- Llave de paso del ventilador
- 7.- Zona de desecación dentro del transportador de materia prima
- 8.- Dispositivo contra explosiones
- 9.- Entrada del agua de alimentación a 82°C
- 10.- Salida del economizador a 191°C
- 11.- Economizador
- 12.- Precalentador de aire
- 13.- Ventilador aspirador de los gases de escape
- 14.- Depurador de doble paso
- 15.- Lumbrera de escape
- 16.- Conducto de recirculación de gases
- 17.- Transportador de cangilones
- 18.- Salida del vapor sobrecalentado a 316°C
- 19.- Distribución de materia prima
- 20.- Filtro de bolas de cerámica.

#### 7.5.- PROCESO ANDCO-TORRAX

En este proceso no se requiere someter la materia prima a ningún tratamiento previo, pudiéndola procesar tal como se recibe. Se emplea aire caliente a alta temperatura para obtener un gas de bajo poder calorífico, entre 700 y 1.300 Kcal/Nm<sup>3</sup>.

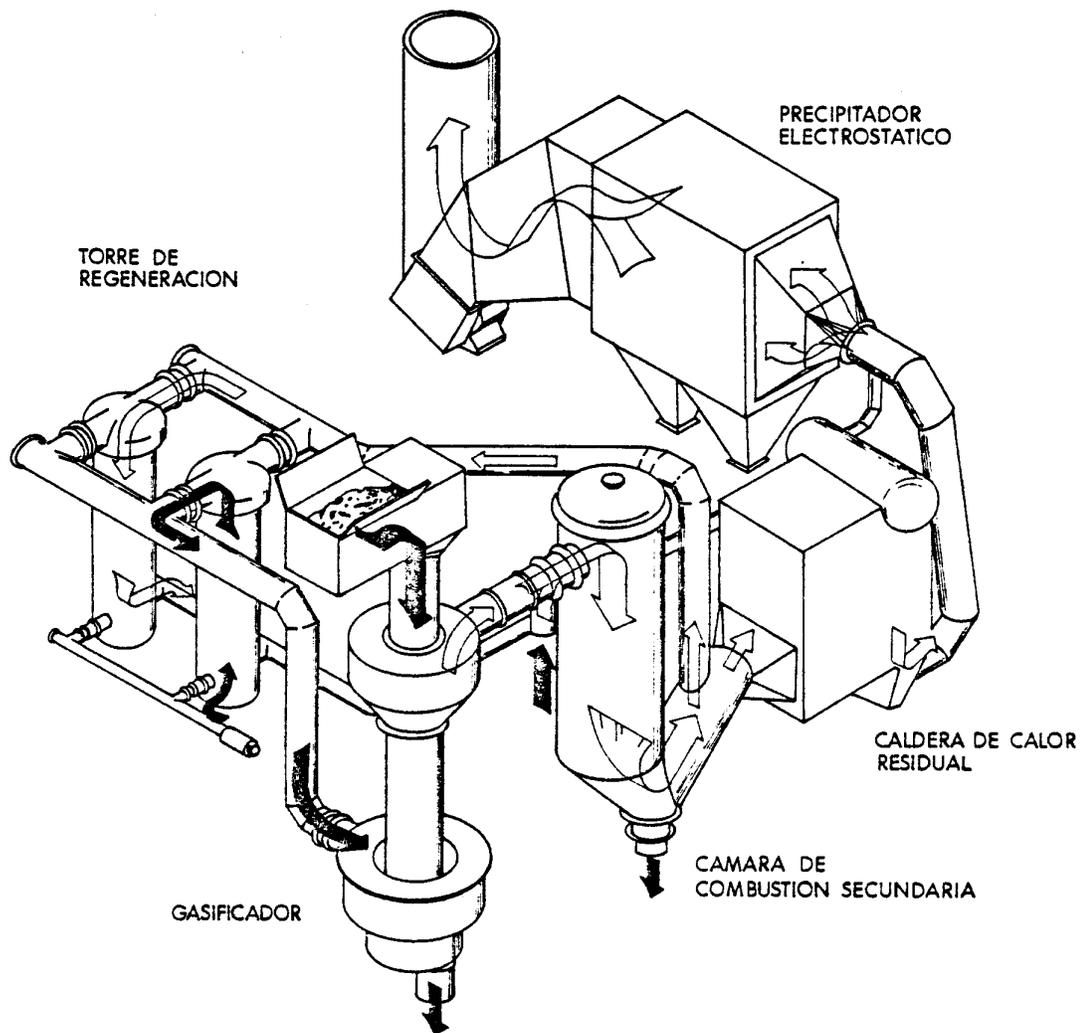
Una perspectiva genérica del mismo se puede contemplar en la Figura 31.

Entre sus principales componentes se incluyen el gasificador (un horno de cuba vertical), la cámara de combustión secundaria (o encendedor), el calentador de aire primario, la unidad de recuperación del calor residual (una caldera) y el equipo de purificación del gas (precipitador electrostático o filtro de bolsa). El calentador de aire primario puede ser una torre regeneradora metálica o un dispositivo de recuperación cerámico.

Cerca de Buffalo (New York) se montó una planta de tratamiento de residuos sólidos de 75 t/día. Desde entonces, se instalaron en Europa varias plantas con escaso éxito. Actualmente, se está construyendo una instalación de 200 t/día en Disney World (Florida).

Este sistema es de una tecnología muy avanzada, con unos elevados costes de mantenimiento. No se considera apropiado para la pirólisis de la biomasa, diseñándose por lo general para compuestos con un alto porcentaje de materias inertes, como las latas y botellas. Por lo que se refiere a mano de obra, requiere un personal altamente cualificado.

PERSPECTIVA DEL PROCESO DE PIROLISIS "ANDCO - TORRAX "



#### 7.6.- PROCESO OCCIDENTAL

En este proceso de pirólisis instantánea se someten los compuestos orgánicos, previamente triturados y desecados, a un calentamiento rápido en una atmósfera carente de oxígeno, dentro de un reactor de lecho arrastrado que emplea como medio de transporte sustancias inertes calientes.

Su diseño se efectuó con la intención de obtener la máxima producción de líquidos en la pirólisis de dichos compuestos.

Se le denomina instantáneo por producirse el calentamiento y las posteriores reacciones de pirólisis en un breve período de tiempo.

La primera operación a realizar es desecar y picar muy finamente la materia prima (el picado se efectúa en dos etapas) A continuación se transporta hasta el interior del reactor por medio de un gas inerte (nitrógeno o productos de combustión), en donde se desplaza merced a unos sólidos inertes calientes que actúan como vehículo de transporte. La pirólisis tiene lugar a los pocos segundos, alrededor de los 510°C y a la presión de 200 Kpa (1 atmósfera). En este sistema no se utiliza aire, ni oxígeno, ni hidrógeno, ni ningún tipo de catalizador.

Como productos finales se obtienen carbón vegetal y gas. El carbón se separa de la corriente gaseosa en una serie de ciclones, quemándose finalmente para calentar el medio de transporte inerte.

En los inicios de su desarrollo se utilizaron los catalizadores empleados en los alambiques de las refinerías, con la esperanza de que las cenizas producidas en la combustión del car

bón vegetal pudieran actuar como medio de transporte inerte. - Más tarde se sustituyeron por arena. Las cenizas eran demasiado frágiles, dando lugar a la formación de un polvo fino, por lo que se dejaron de usar.

Un esquema del proceso se puede contemplar en la Figura 32.

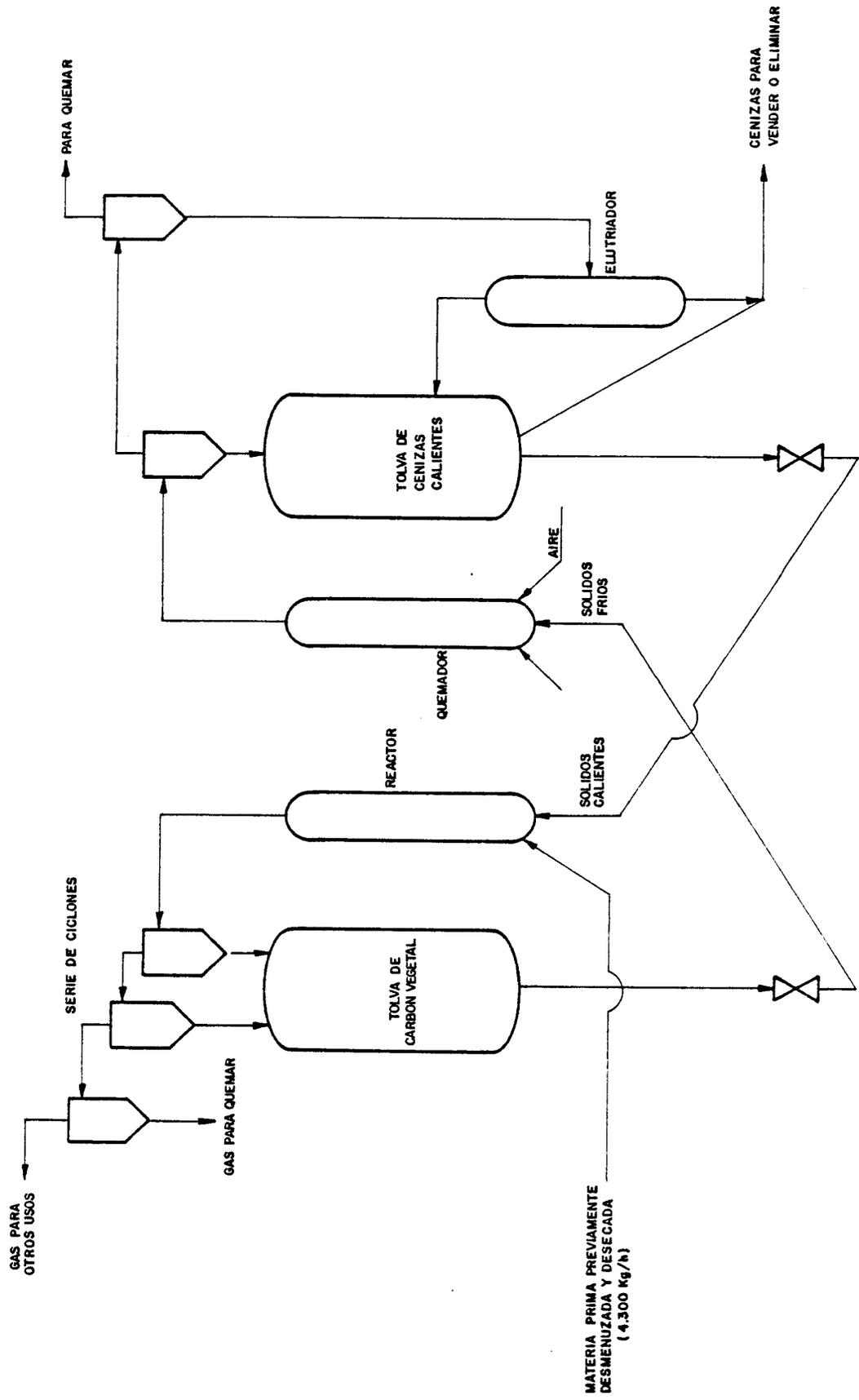
La Compañía Occidental en cooperación con San Diego County y la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), construyó en la localidad de Cajon (California), una planta de tratamiento de residuos sólidos de 200 t/día, que no pudo funcionar de modo continuo por las constantes averías mecánicas de los equipos. El aceite que se obtuvo fue muy inferior al conseguido en los ensayos a escala de laboratorio. Por estos motivos se cerró la planta, no habiendo realizado la Compañía Occidental más actuaciones en el campo del tratamiento o transformación energética de los residuos sólidos.

Esta tecnología es sumamente compleja y similar a la empleada en el proceso de refinado de los crudos.

El diseño de los equipos y el grado de mantenimiento que se requiere para un funcionamiento adecuado, exige una tecnología muy avanzada y unas grandes inversiones.

No se ha realizado ningún ensayo con residuos agrícolas y forestales.

ESQUEMA DEL PROCESO DE PIROLISIS " OCCIDENTAL " EN LA PLANTA EXPERIMENTAL DE SAN DIEGO



### 7.7.- PROCESO MONSANTO LANDGARD

En este proceso se dispone de un reactor rotatorio horizontal de calentamiento directo (horno), revestido de un material refractario, en donde tiene lugar la pirólisis de los compuestos orgánicos previamente desmenuzados.

Se establece una doble corriente de sentido contrario entre la materia prima y los gases que se desprenden, incrementándose progresivamente la temperatura de las sustancias orgánicas conforme se desplazan a lo largo del horno, hasta alcanzar la temperatura a la que se verifica la pirólisis.

El horno, al girar, voltea los componentes orgánicos, haciendo que este sistema sea de una gran efectividad.

La producción de gas es muy uniforme.

El carbón vegetal y las cenizas que se producen se extraen por la parte opuesta al punto de alimentación, vertiéndose a una cuba de enfriamiento abierta por su parte superior.

El gas sale del reactor y se enciende en una cámara de combustión secundaria, empleándose los productos de la combustión para generar vapor.

La Compañía Monsanto Envirotech, en colaboración con el Departamento de Protección del Medio Ambiente, instaló en la localidad de Baltimore (Maryland), una planta con una capacidad de tratamiento de 1.000 t/día. Como consecuencia de sus numerosos problemas mecánicos y de los elevados costes de mantenimiento, dicha Compañía abandonó la explotación haciéndose cargo de la misma el Municipio. Desde entonces, se ha reparado y retoca

do en diversas ocasiones la instalación, trabajando a una capacidad inferior a la nominal.

Aunque el concepto de horno rotatorio es bastante firme y seguro, el alto coste de mantenimiento del material refractario y el sistema de carga y descarga hacen que este proceso sea muy costoso a la hora de ponerlo en funcionamiento.

#### 7.8.- PROCESO PAN AMERICAN LANTZ

Consta de un reactor metálico horizontal rotatorio, al que rodea una cámara de combustión revestida de un material refractario.

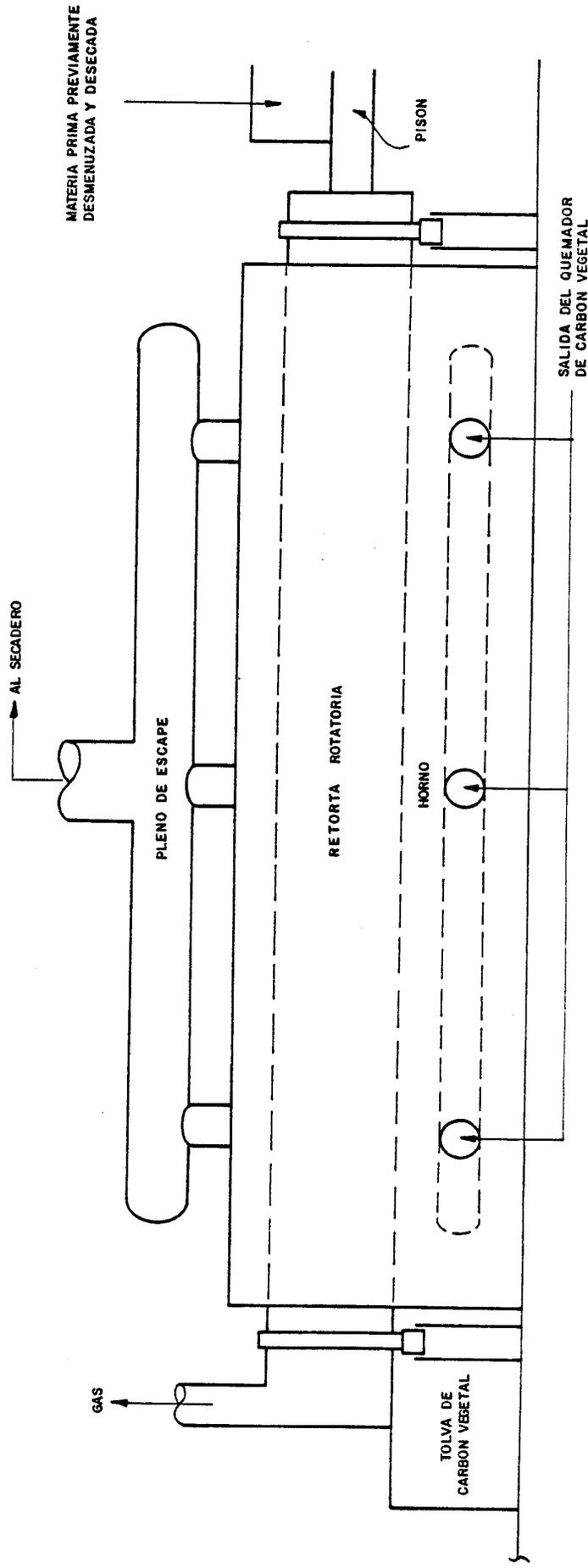
Los combustibles se queman en dicha cámara, produciéndose la transmisión de calor a través de las paredes del reactor. Este, al girar, origina un volteo y un calentamiento uniforme de los compuestos orgánicos.

La materia prima, por regla general, se desmenuza y comprime hasta su entrada al reactor mediante un diseño que evite la penetración de aire. Además de esta operación, se recomienda desecar la materia prima hasta un contenido de humedad del 7-8%.

Un esquema genérico del proceso se muestra en la Figura 33.

En el momento del arranque, la cámara de combustión utiliza una corriente de gas natural, que se sustituye durante el resto del día por el gas producido en la pirólisis.

ESQUEMA DEL PROCESO DE PIROLISIS "PAN AMERICAN LANTZ" PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE 100t/día



En el interior del reactor se obtiene una temperatura - próxima a los 538°C, suficiente para el desarrollo de las reac ciones de pirólisis, que se producen a continuación.

En este reactor se pueden tratar residuos sólidos y di versos elementos constituyentes de la biomasa, con la consiguiente producción de gas, aceite y carbón vegetal. Se trata de un verdadero proceso de pirólisis (sin dilución de aire), en el - que el poder calorífico medio del gas obtenido oscila alrededor de las 3.100-3.550 Kcal/Nm<sup>3</sup>.

De este sistema existe una pequeña planta a escala expe rimental, no habiendo ninguna otra a escala comercial, por lo que no se recomienda su aplicación inmediata hasta que no se - consiga un mayor grado de desarrollo y perfección tecnológica.

#### 7.9.- PROCESO ENTERPRISE

El reactor que se utiliza en este proceso consta de dos cámaras cilíndricas horizontales, dispuestas coaxialmente.

La materia prima, previamente desmenuzada y desecada, se transporta al reactor por medio de un transportador de tornillo sin fin.

Los compuestos orgánicos se desplazan a lo largo del ci lindro interior al que se aplica calor a través de una fuente exterior. Dichos compuestos se calientan progresivamente hasta experimentar el proceso de pirólisis en una atmósfera carente de oxígeno, con la consiguiente producción de aceite, gas y car bón vegetal.

En el momento del arranque, la cámara de combustión, que

es la que suministra el calor necesario para la pirólisis, emplea gas natural como combustible. Sin embargo, a medida que se va produciendo carbón vegetal, utiliza una mezcla de gas natural y carbón vegetal.

El gas producido se enfría primeramente en un intercambiador de calor de tubos, que utiliza agua como medio de enfriamiento, recogién dose el aceite en un recipiente de decantación.

Finalmente, los gases incondensables se purifican mediante un dispositivo adecuado, pudiéndose emplear para satisfacer las necesidades energéticas del proceso.

En la Figura 34 se indica un esquema genérico de este procedimiento.

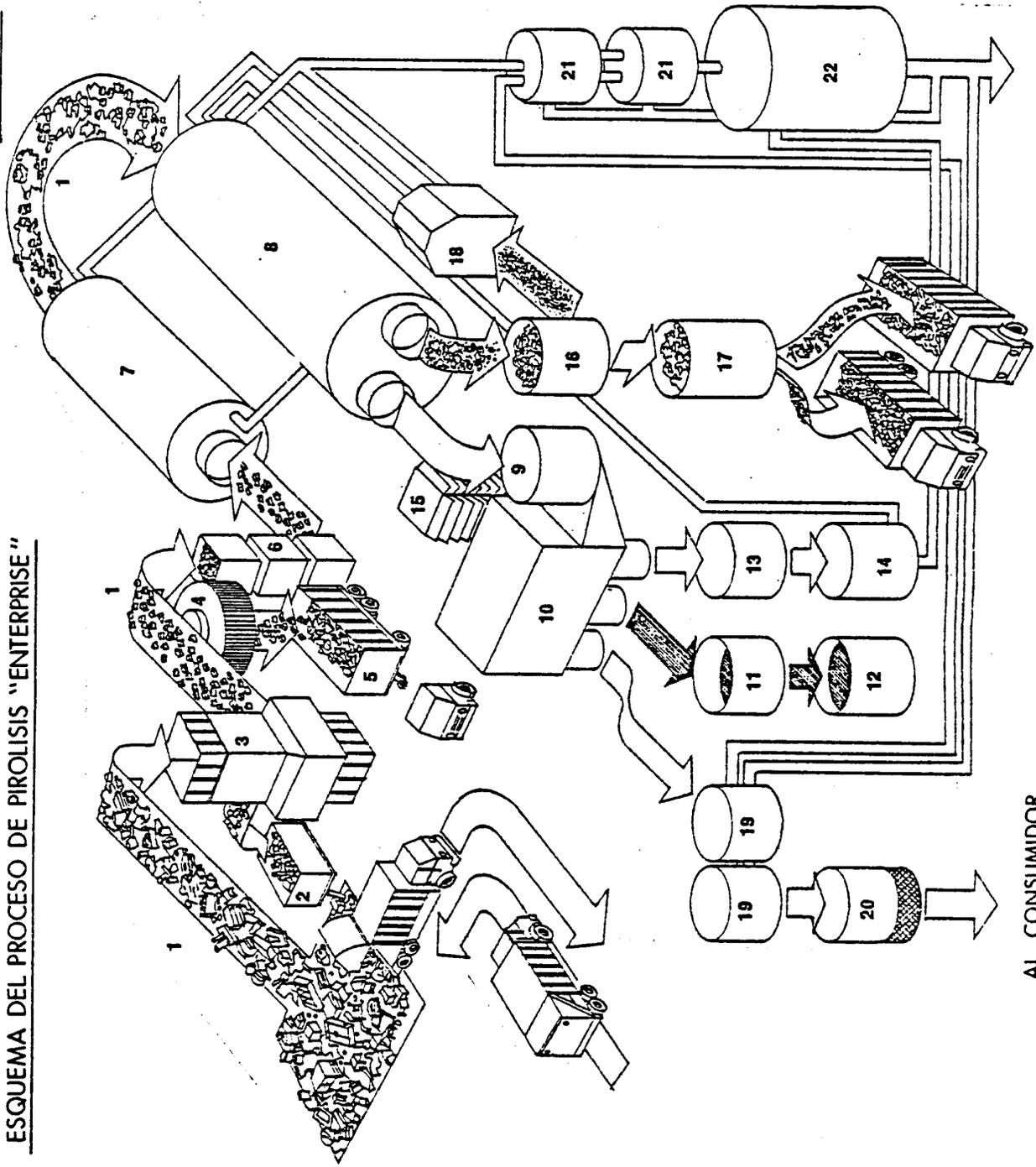
Dos son los tipos de reactores que se construyen por regla general. Para plantas de tratamiento de 200 t/día se fabrican reactores de 50 t/día, mientras que para las de mayor volumen, de 400 y hasta 1.800 t/día, son de 200 t/día.

La Compañía Enterprise, sita en Santa Ana (California), instaló en la localidad de Southgate, un suburbio de los Angeles, una planta de 50 t/día, para el tratamiento de residuos sólidos y lodos de aguas de cloaca, obteniendo un aceite y un gas combustible, que se quemó. No obstante, tuvo muchos problemas mecánicos y de otra índole relacionados con el proceso. A pesar de que en una primera modificación se duplicó la longitud del reactor hasta alcanzar 18,28 m, se desmanteló posteriormente.

En estos equipos no se ha tratado ningún tipo de residuo agrícola ni forestal.

ESQUEMA DEL PROCESO DE PIROLISIS "ENTERPRISE"

Figura n° 34



EQUIPOS

- 1 TRANSPORTADOR
- 2 TOLVA DE RECHAZOS
- 3 TRITURADORA
- 4 SEPARADOR MAGNETICO
- 5 TOLVA DE METALES FERROSOS
- 6 ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS TRITURADOS
- 7 SECADERO
- 8 REACTOR
- 9 CONDENSADOR
- 10 CLARIFICADOR
- 11 DEPÓSITO DE TRASIEGO DE ACEITE
- 12 ALMACENAMIENTO DE ACEITE
- 13 DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO DE LODOS
- 14 SEPARADOR ACEITE/AGUA
- 15 TORRE DE ENFRIAMIENTO
- 16 SEPARADOR METAL/CARBON VEGETAL
- 17 SEPARADOR ACERO/ ALUMINIO
- 18 HORNO
- 19 DEPURADORES DEL GAS FINAL
- 20 FILTRO DEL GAS FINAL
- 21 DEPURADORES DE LOS GASES DE COMBUSTION
- 22 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

AL CONSUMIDOR

AL DESAGÜE

#### 7.10.- PROCESO ERCO

La Compañía ERCO diseñó un proceso consistente en un reactor de lecho fluido, un ventilador de desplazamiento positivo o volumétrico, un dispositivo de alimentación y un equipo para separar los diversos productos obtenidos.

Este procedimiento se proyectó con la idea de que los residuos sólidos a tratar experimentarían una pirólisis, con la consiguiente producción de aceite, gas y carbón vegetal.

Como lecho inerte se utiliza arena refractaria, que se fluidifica merced a una corriente de aire, y se inyecta a través de una placa distribuidora.

La materia prima penetra en el reactor por medio de un tornillo sin fin a presión.

En este procedimiento se pueden tratar componentes hasta con un 50% de humedad sin necesidad de someterlos a una operación previa de desecado.

El calor que se requiere para las reacciones de pirólisis se suministra mediante la combustión de una parte de la carga.

Los gases que se desprenden en la pirólisis arrastran carbón vegetal, procediéndose a su separación en unos ciclones.

El aceite se recupera por enfriamiento de los gases condensables. Aquellos otros que no se condensan, se emplean también como combustible.

Mediante un contrato firmado con la U.S. Environmental - Protection Agency, California Solid Waste Management Board, y California Energy Comission, la citada Compañía construyó una planta móvil de pirólisis a nivel experimental, para transformar los residuos agrícolas y forestales de California en diversos combustibles.

Un diagrama de flujo de la planta se indica en la Figura 35.

La Compañía montó el sistema completo sobre dos remolques planos o de plataforma, que se diseñaron para poder desplazarse en cualquiera de las seis áreas de residuos siguientes: - desmotadoras de algodón, fábricas de madera, de arroz, de abonos, explotaciones forestales y poda de los huertos.

El funcionamiento de la planta se ha detenido, no habiéndose publicado aun los resultados obtenidos.

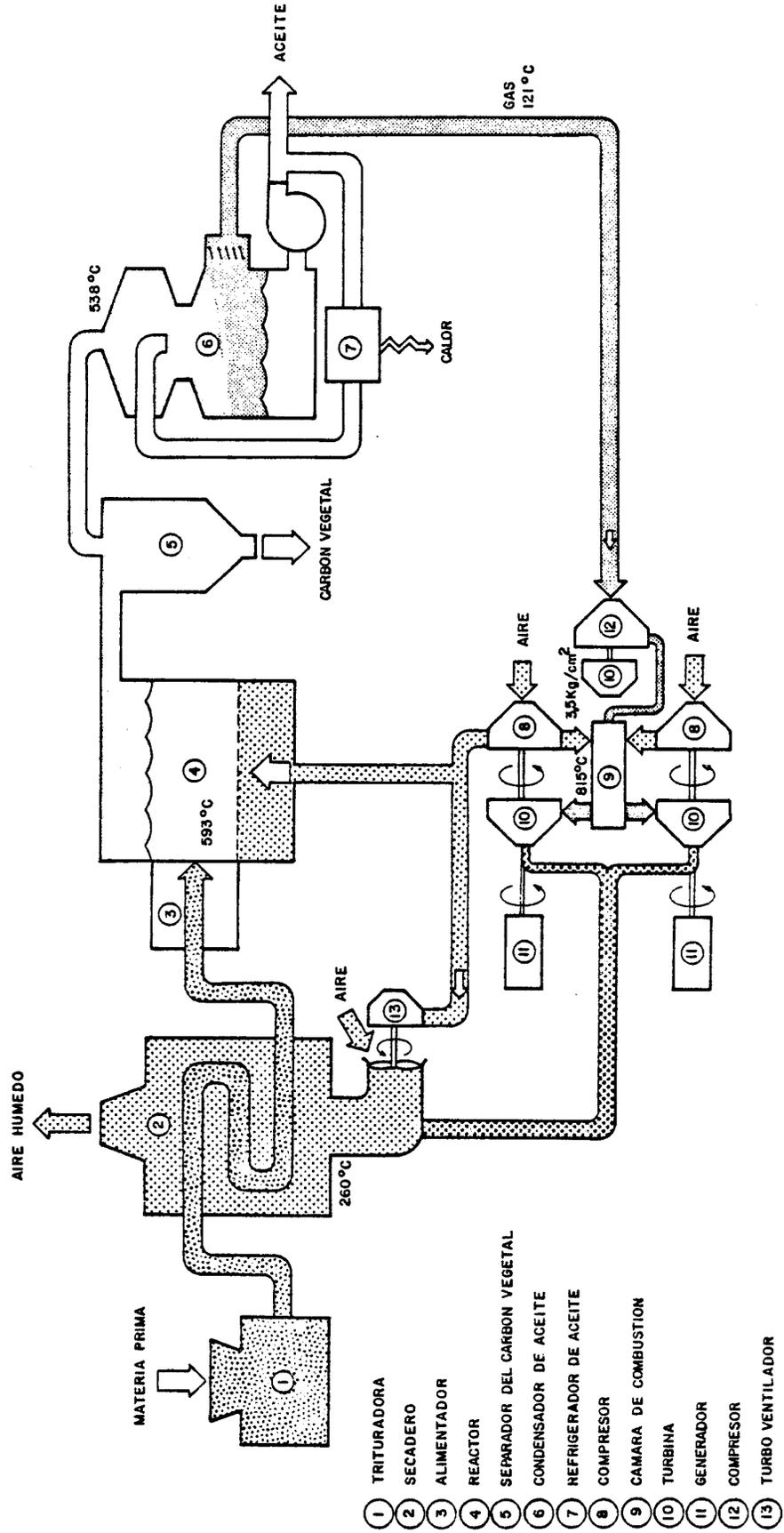
Este proceso, perfeccionado, se podría utilizar para la pirólisis de los distintos elementos constituyentes de la biomasa.

#### 7.11.- PROCESO PUROX

El elemento principal de este proceso es un horno de cuba vertical, en el que penetran por su parte superior los compuestos orgánicos, merced a un dispositivo de alimentación diseñado a tal efecto.

En él, tienen lugar las operaciones de desecación, combustión y pirólisis de la materia prima, así como la escorificación de los residuos inorgánicos.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO MOVIL DE PIROLISIS "ERCO"



REFERENCIA. " MOBILE PYROLYSIS UNIT TO CONVERT CALIFORNIA'S AGRICULTURAL AND FORESTRY WASTE TO CLEAN FUEL "

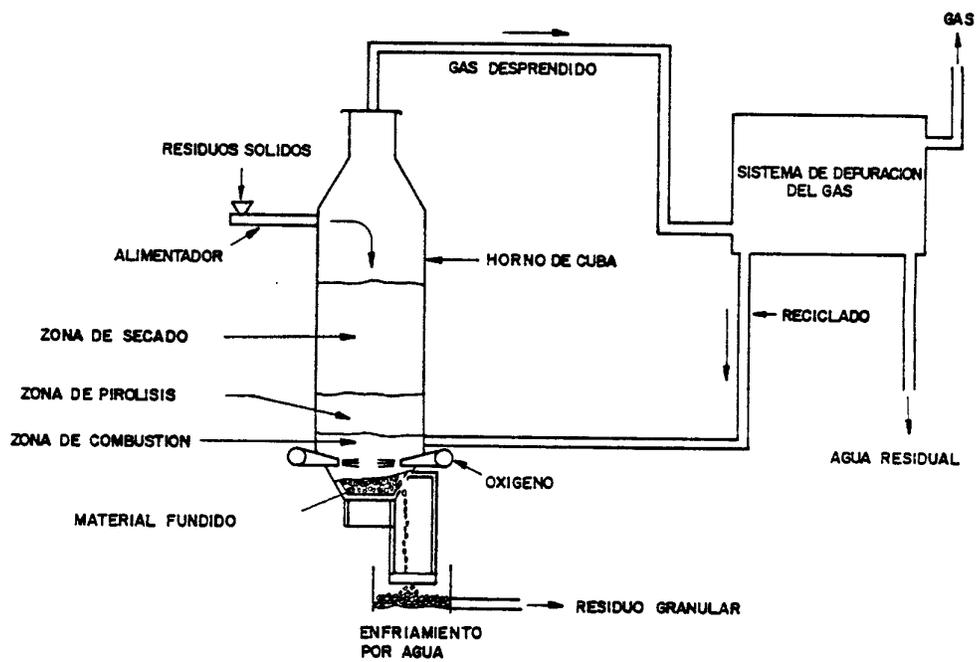
Por su parte inferior, en la zona de combustión, se inyecta oxígeno, que reacciona con el carbono del residuo carbonoso de la zona de pirólisis, con el consiguiente desprendimiento de gases, que se elevan a través de la masa descendente de productos. La temperatura que se genera en la zona de combustión es lo suficientemente alta como para que se fundan la totalidad de los compuestos incombustibles. El material fundido fluye continuamente hacia un depósito refrigerado por agua, en donde se obtiene un residuo granular, estéril y no lixiviado.

En la zona media del horno tiene lugar la pirólisis de los compuestos orgánicos, en una atmósfera reductora, con la obtención de una mezcla gaseosa rica en hidrógeno y monóxido de carbono (alrededor del 23 y 38% respectivamente, en volumen, sobre una base seca). A medida que esta mezcla se dirige hacia arriba, se verifica la desecación de los residuos que entran, en la parte superior del horno.

La mezcla gaseosa que sale del horno, contiene vapor de agua, nieblas aceitosas como consecuencia de la condensación de los productos orgánicos de alto punto de ebullición, y partículas sólidas. Tanto la niebla de aceite como las partículas sólidas, se separan de la mezcla de gases merced a un sistema de depuración o limpieza. A continuación, se hace pasar el gas a través de un condensador. El gas así obtenido es un combustible puro, cuya quema no produce contaminación y con unas características de combustión similares a las del gas natural. Su poder calorífico medio oscila por regla general, entre 2.650 y 3.100 Kcal/Nm<sup>3</sup>.

Un diagrama de flujo de este proceso se indica en la Figura 36.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIROLISIS "PUROX"



El sistema produce como máximo el triple de energía que consume. Sólo se necesita una tercera parte de la energía obtenida para satisfacer sus necesidades energéticas, incluyendo la que se gasta para producir el oxígeno requerido. Las dos terceras partes restantes quedan disponibles para utilizar en otras aplicaciones.

El residuo sólido granular, que se origina de la fracción incombustible de los residuos, es un material carente de cualquier actividad biológica. Se obtiene en una proporción comprendida entre el 2 y el 3% del volumen de residuos tratados, pudiéndose emplear en construcción como material de relleno.

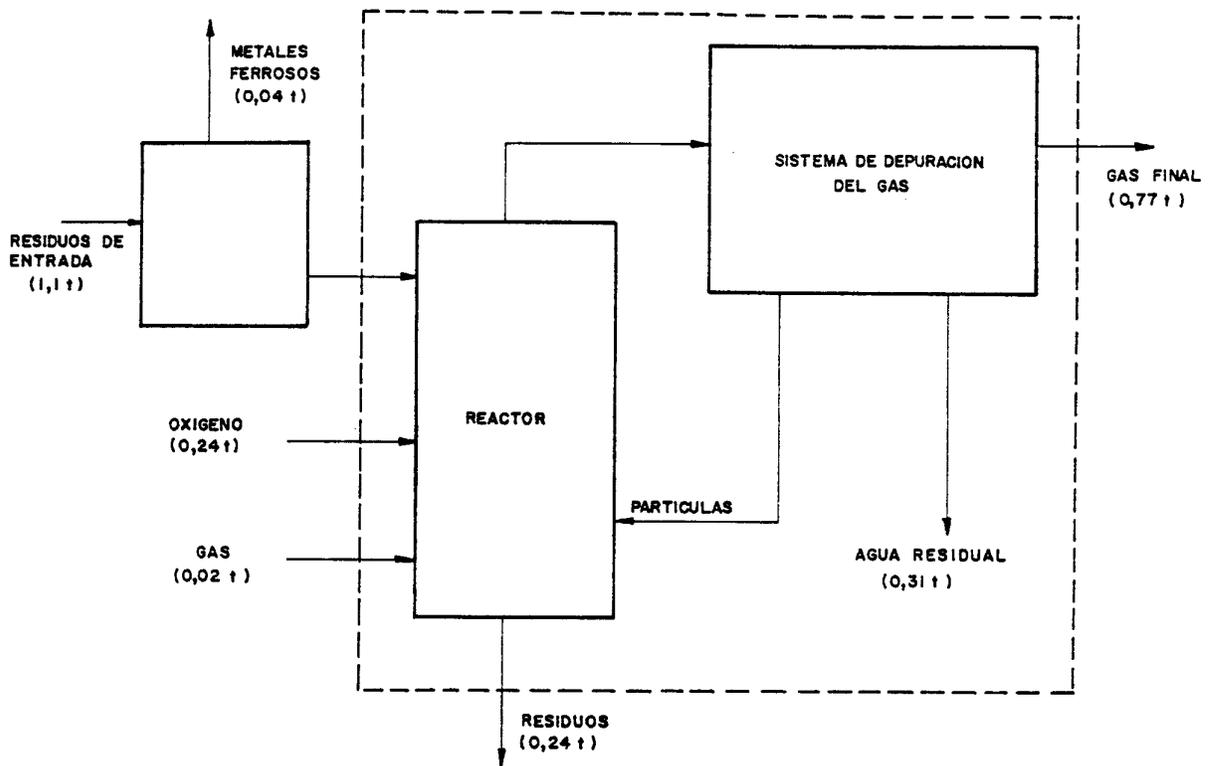
A diferencia de los equipos de incineración convencionales, que necesitan siete toneladas de aire por cada tonelada de residuo sólido quemada, este proceso requiere 200 kg de oxígeno por cada tonelada de residuos tratada.

En la localidad de South Charleston, al Oeste de Virginia, la Compañía Unión Carbide construyó una planta experimental de 200 t/día para el tratamiento o transformación de residuos sólidos. En ella se tratan residuos sólidos urbanos y lodos de aguas de cloacas. Para su funcionamiento dispone de una planta productora de oxígeno, de sendas unidades de desmenuzamiento y separación magnética, y de equipos de tratamiento para la purificación del gas y la manipulación de las aguas residuales.

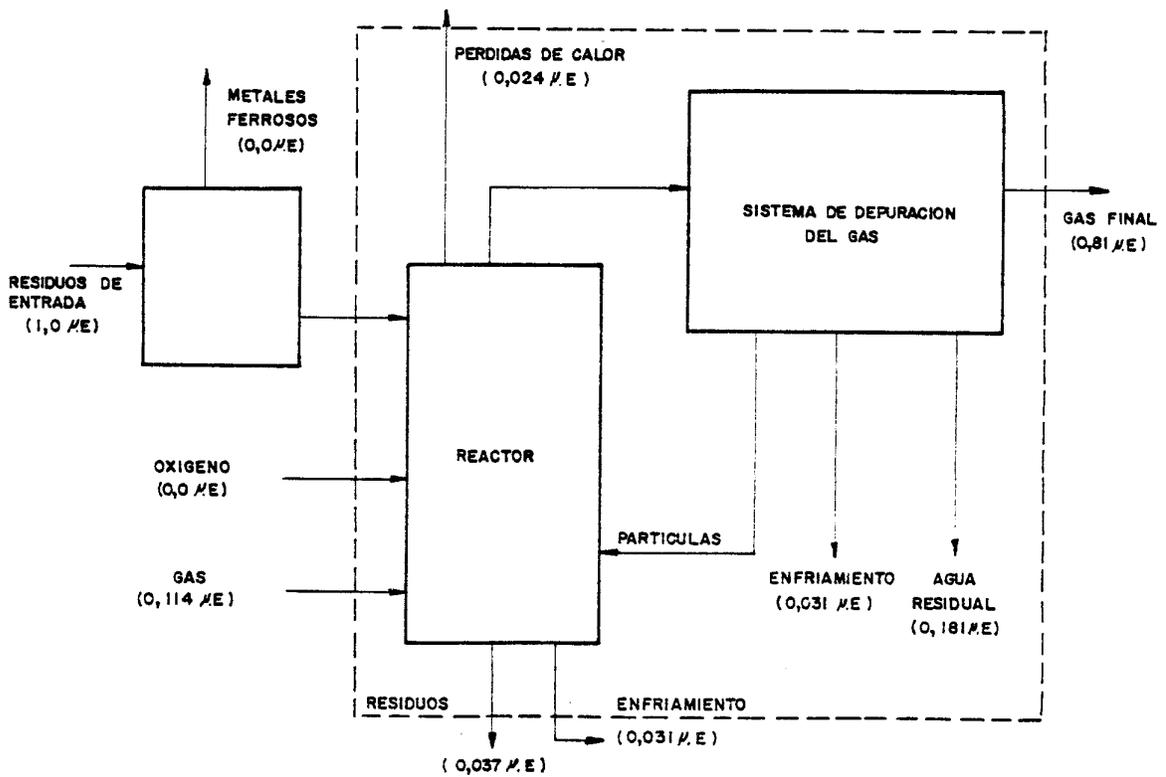
Un típico balance de materia y energía se puede contemplar en la Figura 37.

En este proceso no se ha tratado ninguno de los elementos constituyentes de la biomasa, no existiendo ninguna planta

BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO "PUROX" TIPICO



BALANCE DE ENERGIA DEL PROCESO "PUROX" TIPICO



μE: 1 UNIDAD ENERGETICA DE ALIMENTACION

comercial, ni en el caso de las industrias públicas ni privadas. El hecho de que se necesite una planta productora de oxígeno aumenta considerablemente el capítulo de inversiones. Por otra parte, se trata de una tecnología muy sofisticada con unos altos costes de mantenimiento.

#### 7.12.- PROCESO BHP

Se trata de un proceso de lecho fluido desarrollado por la Compañía B.H.P.

En un principio se utilizó en la fabricación de briquetas de carbón mineral, siendo actualmente aplicado en el tratamiento de residuos leñosos para la obtención de aceite, gas y carbón vegetal.

En la Figura 38 se indica el diagrama de flujo en el que se describe de forma esquemática los diversos pasos que se requieren para la pirólisis de dichos residuos.

En primer lugar, la materia prima se reduce a un tamaño apropiado mediante el empleo de una astilladora, con el fin de conseguir un secado y una pirólisis más eficaces. A continuación, se transporta al reactor de lecho fluido, en donde se produce su descomposición a altas temperaturas. La innovación de este sistema, que emplea un lecho fluido de arena, permite un mayor control del proceso de calefacción y una más eficaz descomposición de los residuos.

En el reactor, mientras los gases calientes que se generan en el lecho fluido fluyen a través de los residuos en descomposición, tiene lugar la destilación de los aceites y gases combustibles. Estos productos salen del reactor, dirigiéndose

se a sendos sistemas de depuración y filtrado, en donde se pro  
cede a su limpieza y separación.

El aceite se almacena para su venta posterior.

El gas, se puede utilizar como combustible en la planta, se puede quemar, o emplear en alguna aplicación local, si la -  
ocasión lo permite y lo requiere.

A medida que el proceso continua, se incrementa la tempe  
ratura del reactor, con la consiguiente purificación del resi-  
duo y la obtención de cantidades adicionales de gases, aceites  
y carbón vegetal.

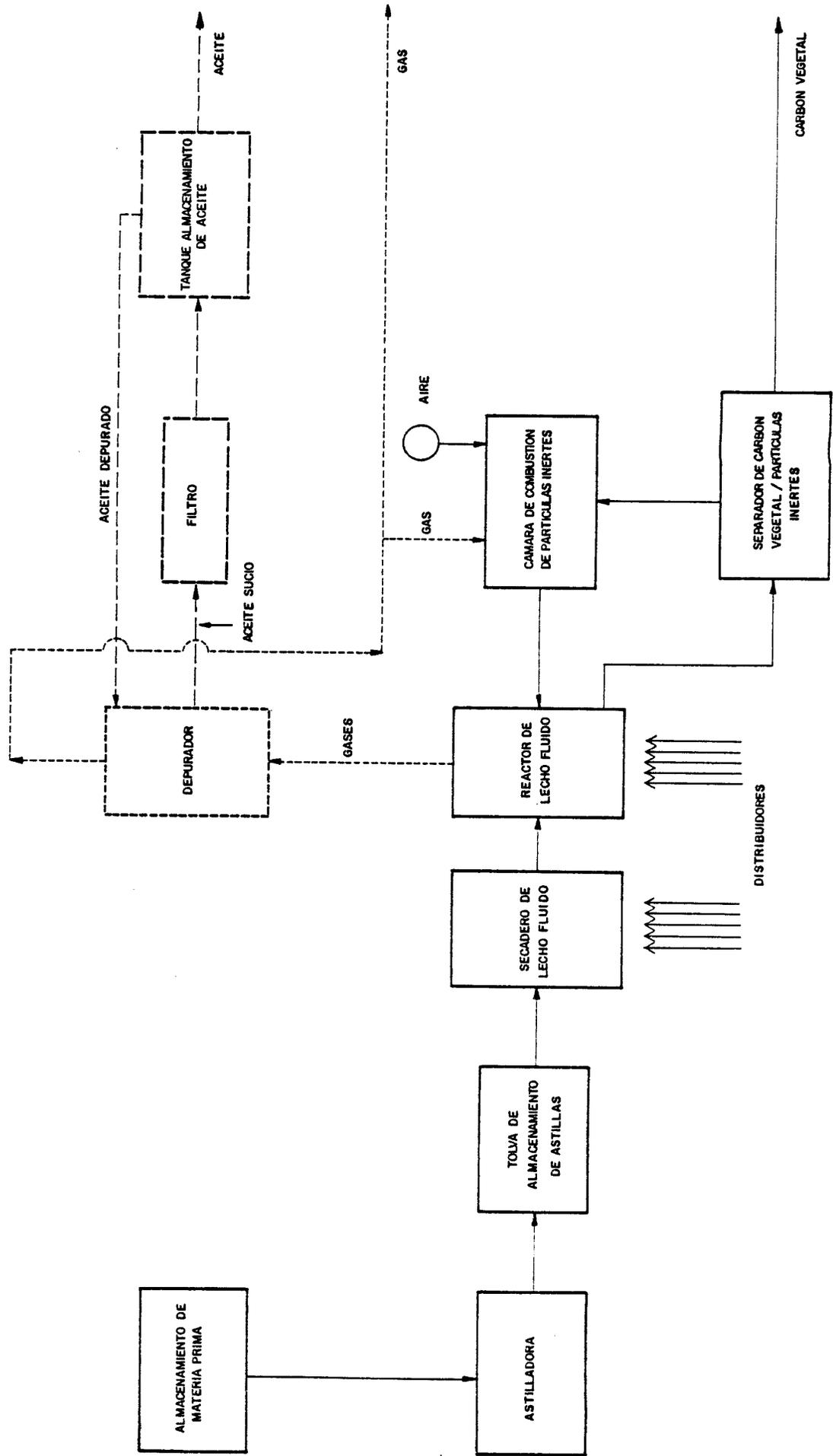
Conforme se va formando el carbón vegetal, se descarga  
continuamente en un separador o ciclón, en donde se separan -  
las partículas inertes, para volverlas a enviar a la cámara de  
combustión. El carbón vegetal así obtenido se almacena hasta el  
momento en que se proceda a su venta.

En el rendimiento del carbón vegetal influye principal  
mente la temperatura máxima del lecho, que se controla regulan  
do la relación aire/materia prima.

Los poderes caloríficos del carbón y aceite obtenidos,  
son de 30,2 MJ/kg (7.200 Kcal/kg) y 20-27,9 MJ/kg (4.775-6.675  
Kcal/kg) respectivamente, mientras que el de los crudos que se  
suelen emplear en los hornos de petróleo, oscila alrededor de  
42,9 MJ/kg (10.275 Kcal/kg). Por lo que se refiere al gas, su  
poder calorífico, depende del contenido de humedad residual de  
la materia prima, pudiendo alcanzar los 7,5 MJ/Nm<sup>3</sup> (3.200 Kcal/  
/Nm<sup>3</sup>).

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE PIROLISIS DE LECHO FLUIDO B.H.P.

Figura n° 38



El coste de una planta de pirólisis con una capacidad de 10 t/h se estima en unos 2.000.000 \$, con unos costes de producción de aceite y carbón vegetal alrededor de 50 \$/t.

#### 7.13.- PROCESO FOREST FUELS

Este proceso de gasificación consta de tres partes principales: un equipo de manipulación de combustible para almacenamiento, medida y transporte; un secadero, para reducir el contenido de humedad de la materia prima; y un gasificador, para transformar la madera seca en gas.

En la Figura 39 se expone una perspectiva genérica del proceso.

##### . Equipo de manipulación de combustible

La madera, en forma de astillas, se carga en un tractor-trailer, que se emplea para transporte y almacenamiento. Su parte inferior posee un fondo móvil que permite descargar las astillas hasta el sistema de manipulación de combustible, merced a unos dispositivos de accionamiento hidráulico. Algunas instalaciones utilizan tolvas u otras formas de almacenaje de fondo móvil.

El volumen de que se dispone es un factor decisivo y determinante según se puede observar en la Figura 40.

Como se indica en la Figura 41 un transportador es el encargado de enviar las astillas desde el almacenaje hasta el secadero.

Según las necesidades de los clientes, dispone de una se

rie de distribuciones alternativas y de diversas opciones de equipos.

. Secadero

El calor que se requiere para el secado se suministra desde la caldera por medio de unas tuberías, por donde circulan los gases calientes. De esta manera se logra un importante ahorro energético, reduciéndose la cantidad de combustible que se requiere para el proceso de secado. Las pérdidas que se producen son mínimas.

Una vez que se ha eliminado el exceso de humedad, se procede al transporte automático de las astillas hasta el gasificador.

Un panel de mando es el encargado de coordinar el suministro de combustible con su demanda.

. Gasificador

Como se indica en la Figura 42 el gasificador se diseña para que se ajuste a la caldera y permita una sencilla transformación del quemador original, al ir a consumir el gas procedente de la descomposición de la madera. Se monta sobre unos raffles que le permitan retroceder desde la caldera, para la pronta sustitución del quemador original desde el punto de vista de suministro energético.

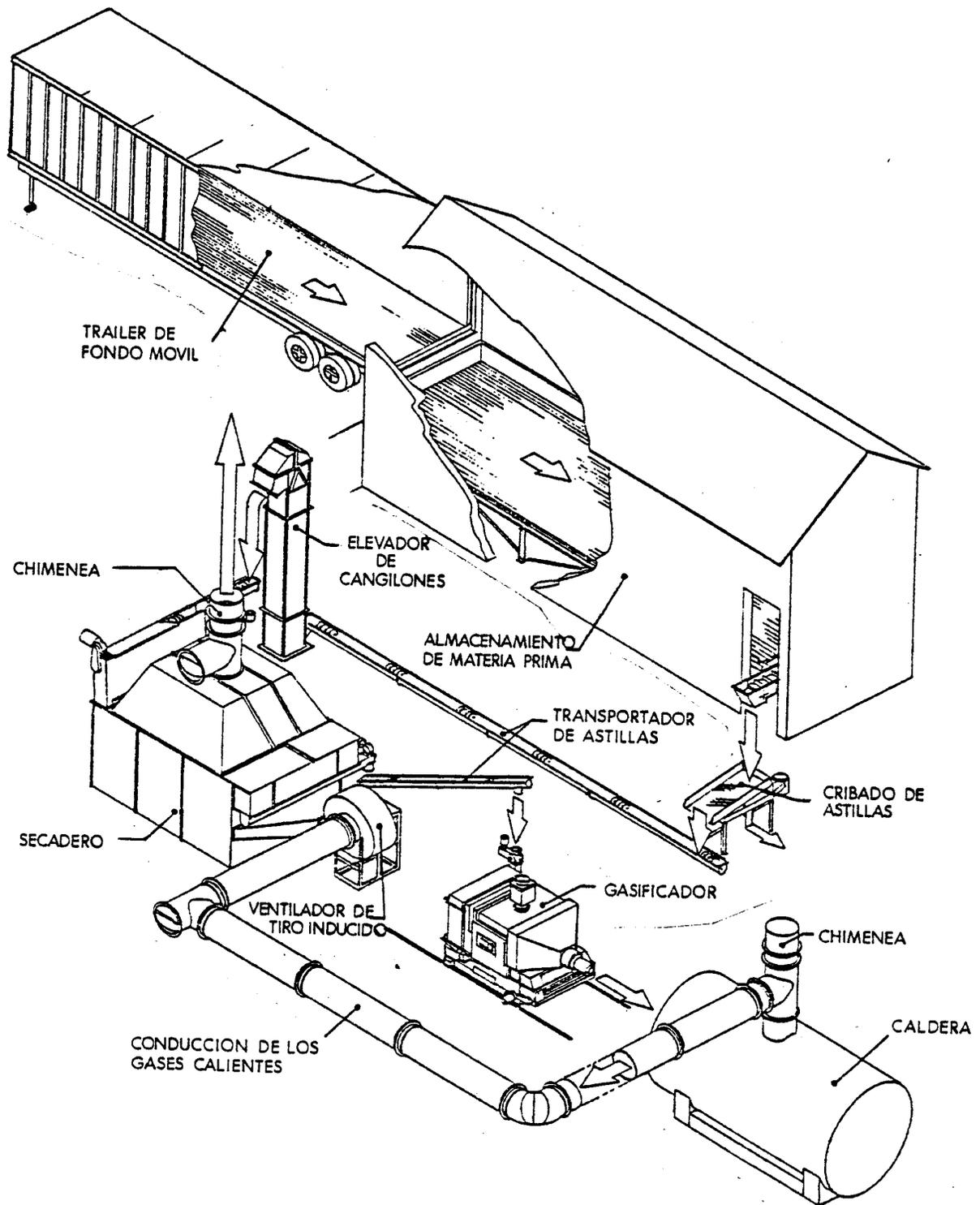
En el rendimiento y funcionamiento de la caldera apenas influye el sistema de gasificación. Por otra parte, no hay que sustituir la caldera ni modificar las tuberías de conducción de vapor.

El panel de mando del suministro de combustible sirve - también para controlar el gasificador.

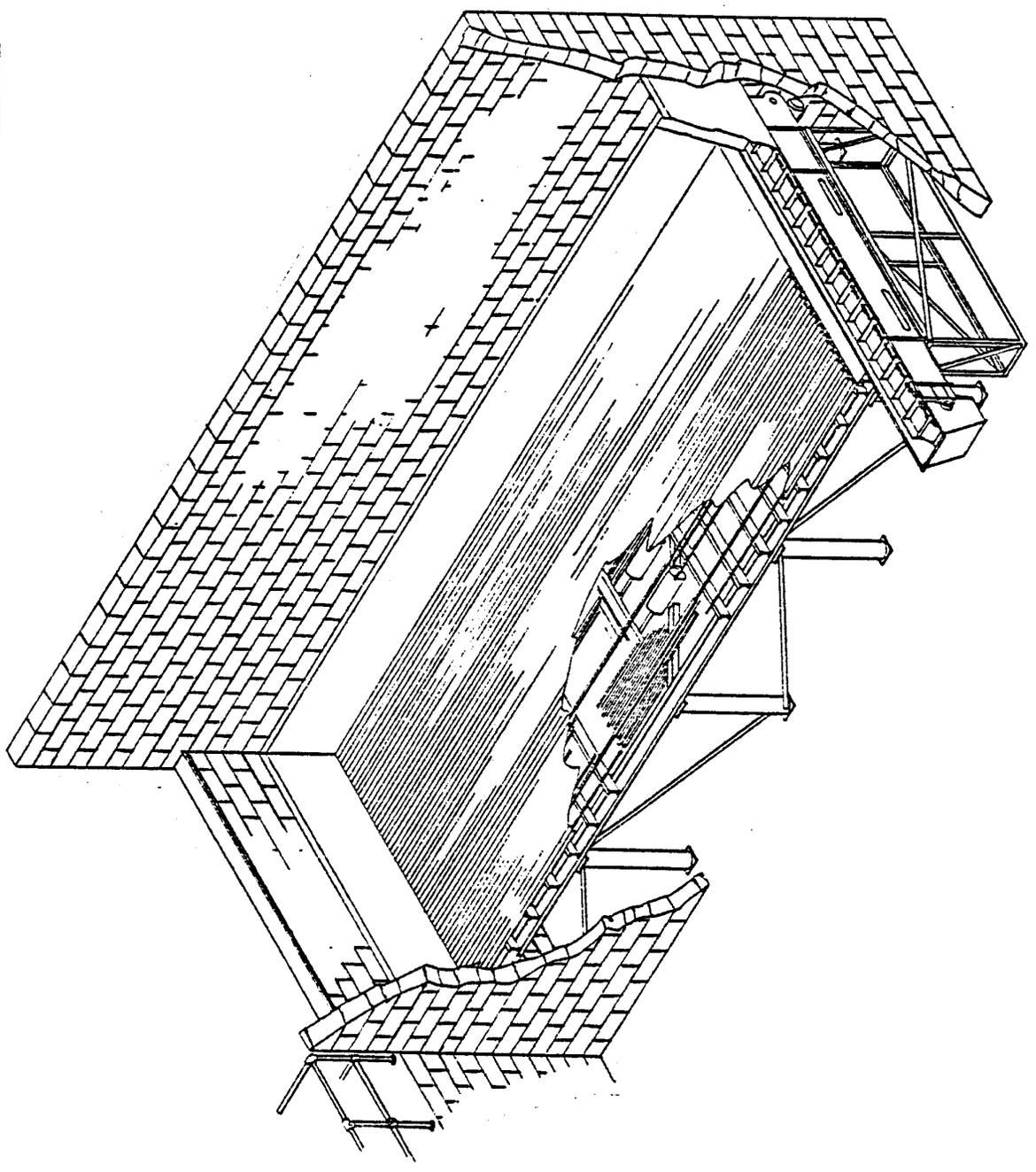
El operador tiene situado en un mismo panel la totalidad de los controles del proceso (el de la manipulación de combustible, el del secadero y el del gasificador).

En la Tabla 9, se reflejan las especificaciones de diseño y funcionamiento de los distintos modelos de gasificador y secadero que fabrica la Compañía.

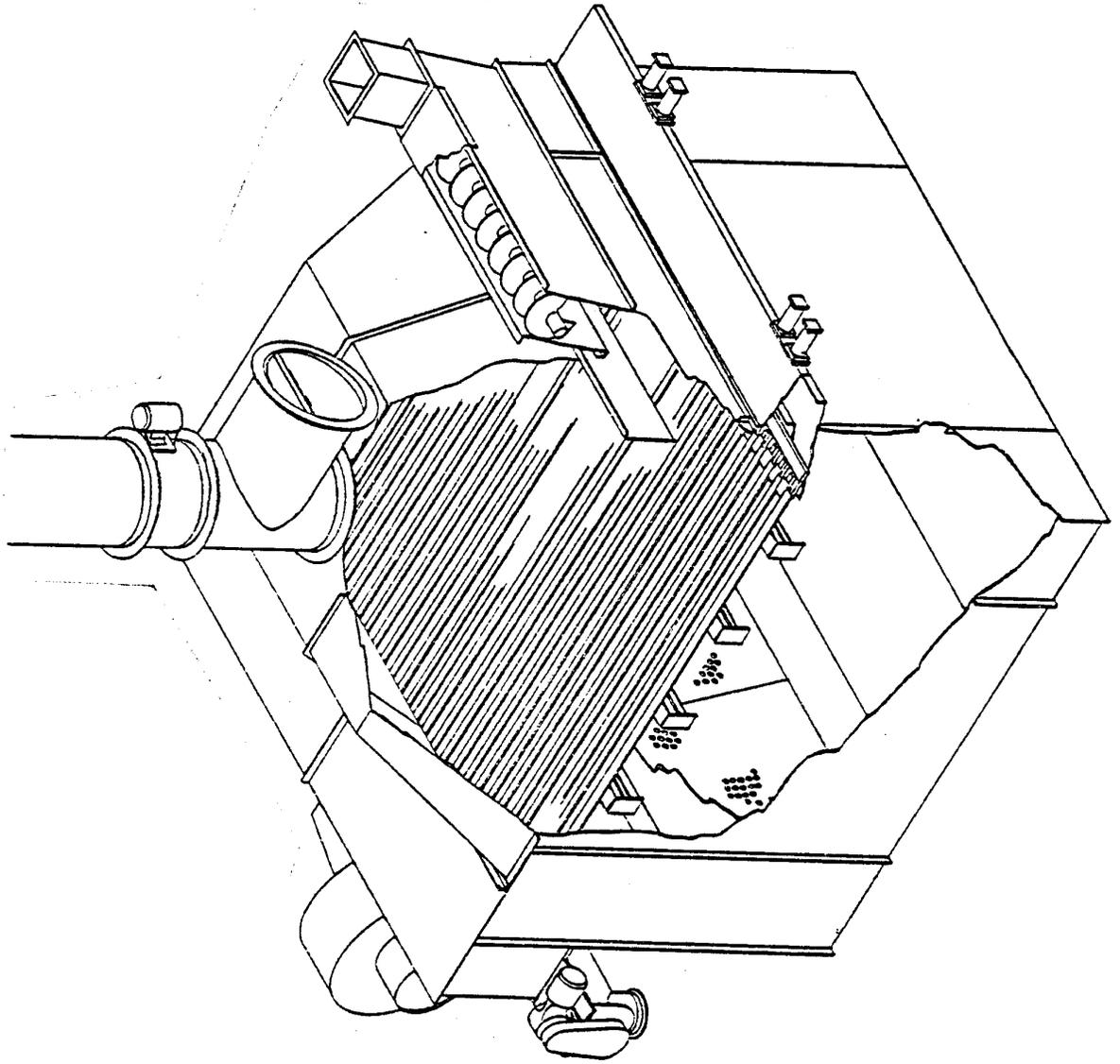
PERSPECTIVA DE UNA INSTALACION DE GASIFICACION "FOREST FUELS"



DEPOSITO DE ALMACENAMIENTO DE FONDO MOVIL PARA LA MATERIA PRIMA VERDE



SECADERO



# GASIFICADOR

Figura nº 42

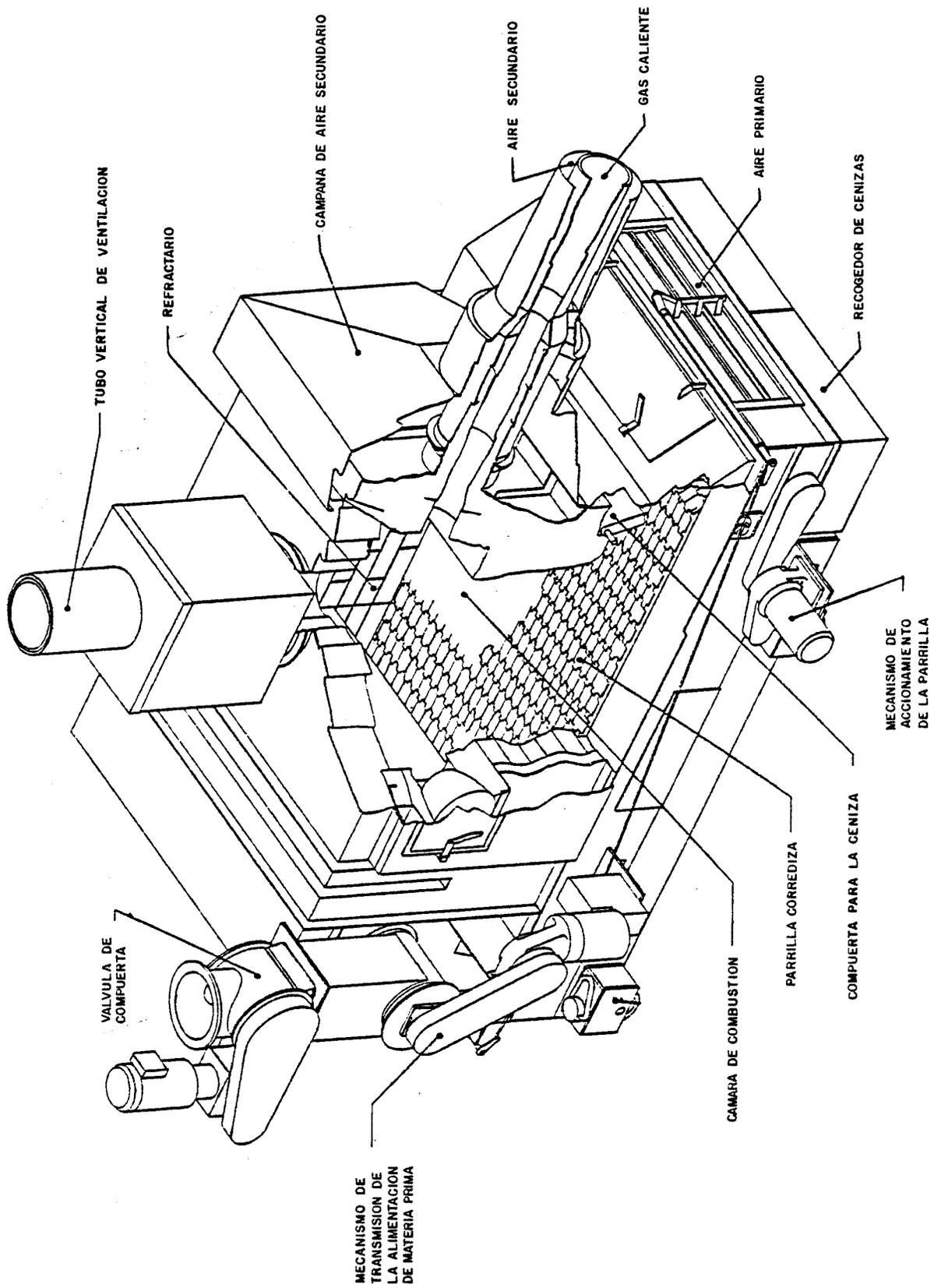


TABLA N° 9.- Especificaciones de diseño y funcionamiento de los equipos de la Compañía Forest Fuels

Modelo de Gasificador	TH-9	TH-12	TH-16	TH-20	TH-25
Producción del Gasificador en M Kcal/h	1,6	2,1	2,8	3,5	4,4
Potencia de la Caldera en C.V. (1)	140	190	250	315	400
Producción de vapor en kg/h (2)	2.190	2.970	3.910	4.930	6.260
Necesidad de mat.prima con un 15% de humedad, en kg/h (3)	430	565	755	940	1.185
Necesidad de mat.prima con un 50% de humedad, en kg/h (3)	805	1.060	1.410	1.760	2.215
Necesidad equivalente de Aceite # 2, en l/h (4)	158	213	280	354	449
Necesidad equivalente de Aceite # 6, en l/h (4)	148	200	264	333	423
Longitud en m	2,7	2,7	3	3	3,2
Anchura en m	1,8	2,1	2,1	2,4	2,4
Altura en m	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Peso aproximado en kg	3.625	4.080	4.535	4.990	5.440

TABLA N° 9.- (Continuación)

Modelo de secadero	UF-140	UF-180	UF-240	UF-300	UF-360
Longitud en m	5,5	6,7	8,5	10,4	10,4
Anchura en m	3,5	3,5	3,5	3,5	4,2
Altura en m	4,3	4,9	4,9	5,5	5,5

Notas

- (1) El rendimiento característico de la caldera está comprendido entre el 75 y el 85%.

Para elegir el modelo de gasificador apropiado, considerar la caldera de inmediata potencia superior.

Los gasificadores de mayores dimensiones que los modelos citados, se pueden fabricar a petición del cliente.

- (2) Se basa en las necesidades de evaporación.

Producción de vapor = Potencia de la caldera en CV x 15,64 kg/h/C.V.

- (3) Variará con el rendimiento neto del sistema.

Necesidad de materia prima con un 15% de contenido de humedad

$$= \frac{\text{Produc. Gasificador en Kcal/h}}{3.722 \text{ Kcal/kg}}$$

Necesidad de materia prima con un 50% de contenido de humedad

$$= \frac{\text{Prod. Gasificador en Kcal/h}}{1.989 \text{ Kcal/kg}}$$

- (4) Necesidad equivalente de aceite

$$= \frac{(\text{C.V.}) \times (8.435,7 \text{ Kcal/h/C.V.})}{(\text{Kcal/l}) \times 0,80 (\text{Rend. caldera})}$$

Aceite # 2 = 9.387,6 Kcal/l

Aceite # 6 = 9.990 Kcal/l

. Rentabilidad

Los precios del gas y de la energía calorífica que se generan en este proceso son inferiores a los de los combustibles tradicionales.

En la Tabla 10 se establece una comparación entre el coste de la leña y el de los combustibles fósiles más utilizados. De ella se desprende que la cantidad de leña que se requiere para producir 1 MKcal, cuesta la tercera parte y la mitad, respectivamente, de los crudos #2 y #6 que se necesitan para producir la misma cantidad de energía, según los precios que en Enero de 1982 regían en New England.

En la Tabla 11 se resumen los aspectos económicos de la instalación de este sistema, en los casos en que sustituya a los crudos #2 y #6, respectivamente. En ella se refleja el caso de una caldera industrial que necesita un suministro anual de energía de 29.760 MKcal para producir vapor o agua caliente.

Se supone que el sistema de gasificación se aplica a una caldera ya existente, de 400 C.V. de potencia, que deja de funcionar durante diez semanas al año.

El ahorro energético que se consigue al emplear el sistema de gasificación descrito en una instalación de estas características es de 507.600 y 181.900 \$, según que sustituya al Aceite #2 ó #6, respectivamente.

Las inversiones a realizar se estiman en unos 280.000 \$, incluyendo la totalidad de los equipos de almacenamiento y manipulación de combustible. El coste real varía con la ubicación y situación de cada caso concreto.

Un importante aspecto a tener en cuenta es la reducción del 20% de impuestos que tuvieron en 1981 los sistemas de gasificación de la madera. Un 10% en concepto de inversiones, y otro 10% por tratarse de una fuente de energía renovable.

El período de recuperación del capital es de 7 y 18 meses, respectivamente, según que el sistema de gasificación sustituya al consumo del Aceite #2 o al del Aceite #6.

La tasa interna de retorno se considera en un 115 y 38%, respectivamente, según que el sistema de gasificación sustituya al Aceite #2 o al Aceite #6. Para su cálculo se ha supuesto una amortización en 5 años de tipo lineal y una tasa de impuestos del 40%.

Por otra parte, se espera que los precios del gas natural se eleven hasta alcanzar los del Aceite #2. Sin embargo, en un estudio reciente realizado por el "Stanford Research Institute" sobre las veinte principales compañías productoras de energía, se llega a la conclusión de que los precios del gas natural se incrementarán hasta igualar a los del Aceite #6 con bajo contenido en azufre, en el año 1985.

En la Tabla 12 se indican los cambios introducidos en algunas de las condiciones que se consideraron en el caso de sustitución del Aceite #6 por el sistema de gasificación de la madera, así como sus respectivas consecuencias. Cuando el precio de este Aceite pasa de valer 0,171 a 0,224 \$/l, el período de recuperación del capital es de 0,8 años. En el caso de que se produzca un incremento en el consumo anual de combustible, por funcionar la caldera 48 semanas en vez de 42, el período de recuperación del capital es de 1,1 años. Finalmente, cuando el precio de las astillas sea de 14 \$/t en vez de 17 \$/t, por tra

tarse de una materia prima más verde y con un mayor contenido de humedad, el período de recuperación del capital es de 1,2 - años.

TABLA N° 10.- Comparación entre el precio de la leña y los de los combustibles fósiles

<u>Tipo de combustible</u>	<u>Coste de adquisición</u>	<u>Coste de suministrar 1 MKcal a la caldera</u>
Crudo #2	0,264-0,317 \$/l	28,2 - 33,7 \$
Crudo #4	0,198-0,251 \$/l	20,6 - 26,2 \$
Crudo #6	0,171-0,224 \$/l	17,1 - 22,4 \$
Gas natural	0,162 \$/m <sup>3</sup>	18,3 \$
Carbón bituminoso con bajo contenido de azufre .....	75-85 \$/t	11,3 - 12,7 \$
Astillas con un 50% - de contenido de humedad .....	14-17 \$/t	7,7 - 9,3 \$

Nota. Estos precios son los que regían en Enero de 1982 en New England.

TABLA N° 11.- Ahorros que se producen al sustituir los combustibles fósiles por el proceso de gasificación Forest Fuels en el caso de una caldera de 400 C.V.

AHORRO DE COMBUSTIBLE

Tipo de Combustible	<u>Aceite # 2</u>	<u>Aceite # 6</u>
. Consumo anual .....	3.170.000 l	2.979.930 l
. Coste unitario .....	0,2642 \$/l	0,1717 \$/l
. Coste anual del aceite .....	837.500 \$	511.800 \$
. Coste anual de la madera (17 \$/t) .	-279.900 \$	-279.900 \$
. Ahorro bruto anual .....	<u>557.600 \$</u>	<u>231.900 \$</u>
. Incremento del coste de operación *	-50.000 \$	-50.000 \$
. Ahorro neto anual .....	<u>507.600 \$</u>	<u>181.900 \$</u>

COSTE DEL PROCESO DE GASIFICACION

. Equipos de almacenamiento y manipulación de combustible, secadero y gasificador .....	350.000 \$
. Exención de Impuestos (20%) .....	-70.000 \$
Coste neto del sistema .....	<u>280.000 \$</u>

ANALISIS DE LA INVERSION

<u>Caso</u>	<u>Cuando la gasif. sustituya al Ac. #2</u>	<u>Cuando la gasif. sustituya al Ac. # 6</u>
Período recuperación del capital	7 meses	18 meses
T.I.R. (después de pagar impuestos, con una amortiz. lineal y una tasa de impuestos del 40%) .	115%	38%

Nota \*Se ha considerado el incremento de la mano de obra, servicios y materiales que requiere el empleo de los combustibles sólidos.

TABLA N° 12.- Variaciones económicas que se pueden presentar en el caso de sustitución del Aceite #6 por el proceso de gasificación de la madera

<u>Cambios en algunas de las condiciones que se supusieron anteriormente</u>	<u>Consecuencias (el período de recuperación del capital del caso expuesto era de 1,5 años)</u>
. Cuando el precio del Aceite #6 pasa de 17,1 a 22,4 \$/MKcal (a) ...	0,8 años
. Cuando el consumo anual del Aceite #6 pasa de 2.979.930 a 3.405.740 l (b) .....	1,1 años
. Cuando el coste de la tonelada de astillas con un 50% de humedad pasa de 17 a 14\$ (c) .....	1,2 años

Nota:

- (a) Incremento en el precio del Aceite, desde 17,17 a 22,45 ¢/l.
- (b) Disminución del tiempo de descanso de la caldera, de 10 a 4 semanas/año.
- (c) Contratos actuales para compras de gran volumen.

## 7.14.- PROCESO CARBON INTERNATIONAL, LTD

### 7.14.1.- Descripción del proceso

En la Figura 43 se expone el diagrama de flujo de un proceso genérico de Pirólisis Integral.

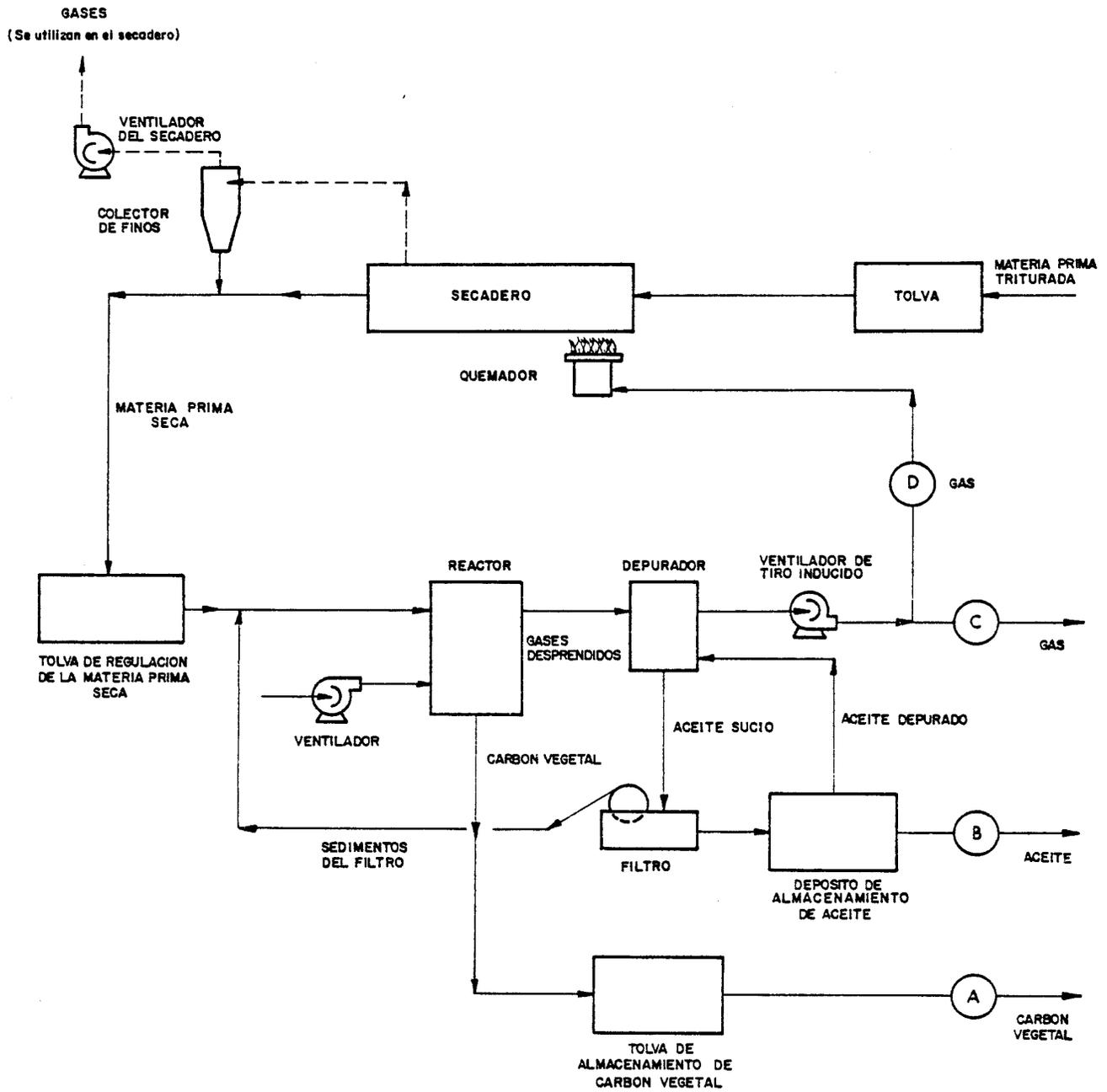
La materia prima se recibe, reduce de tamaño mediante trituración o astillado (en caso necesario) y almacena. Operaciones adicionales tales como la eliminación de metales ferrosos, vidrios, etc., se pueden realizar antes de su almacenamiento.

Desde el lugar de almacenaje se transporta al secadero a una determinada velocidad, en donde se reduce su contenido de humedad hasta un nivel inferior al 10% (sobre base húmeda), para pasar a continuación a una tolva o depósito de regulación, en donde permanece provisionalmente durante un cierto período de tiempo. Desde aquí, se transporta a una cierta velocidad hasta la unidad de pirólisis, en donde se verifica el proceso térmico de transformación, con la obtención de carbón vegetal, aceite y gas.

El carbón vegetal se descarga por la parte inferior del reactor, a una determinada velocidad, a un transportador cerrado de tornillo sin fin, en donde se enfría merced a una pulverización con agua. Una vez frío, pasa a través de una válvula rotatoria a otro transportador, que lo envía finalmente a una tolva de almacenamiento de producto terminado.

El aceite y los vapores gaseosos salen por una lumbrera situada en la parte superior del reactor, merced a la acción de un ventilador de tiro inducido de velocidad variable. Esta

DIAGRAMA DE FLUJO DE UN PROCESO GENERICO DE PIROLISIS INTEGRAL SIN  
INCLUIR LA PLANTA DE FABRICACION DE BRIQUETAS



rriente fluye a través de un sistema de depuración-enfriamiento que utiliza el aceite frío como medio refrigerante. En él, las partículas sólidas que transporta la corriente se lavan, mientras que la mayor parte de los vapores de aceite se condensan. Los gases incondensables, con algunas neblinas de aerosoles que arrastran, pasan a un equipo de decantación en donde se incorporan dichas nieblas al seno de la corriente de aceite líquido, recién separada. Parte de estos gases, por medio de un ventilador de tiro inducido, se conducen hasta los quemadores, para suministrar el aporte calorífico que se necesita en el secadero de materia prima y en otros lugares de la instalación, como el secadero de briquetas, las cámaras de combustión de las calderas de vapor, etc.

El aceite recién condensado, y el ya depurado, se mezclan en una corriente única que fluye a través de un filtro de vacío rotatorio, en donde tiene lugar la eliminación de las partículas sólidas.

El aceite limpio se dirige a un depósito de almacenamiento. Una porción del mismo se suministra al sistema de depuración-enfriamiento, y el resto se utiliza como combustible líquido. La mezcla de sedimentos del filtro-finos de carbón y el aceite se reciclan al reactor junto con la materia prima desecada.

El carbón vegetal almacenado anteriormente se extrae de la tolva correspondiente, para transportarse a la planta de fabricación de briquetas, que por regla general, se suele instalar junto al reactor, a fin de aprovechar el gas producido en la pirólisis de la forma más eficaz y económica posible. En la Figura 43 no se describe el diagrama de la planta de elaboración de briquetas.

Después de trituirarlo (en caso necesario) se transporta de forma continúa a una mezcladora de paletas, en donde se aña de un producto específico como la piedra caliza, para prolongar su período de quema o ignición, y un aglutinante, como el almidón u otro material, como por ejemplo, las melazas.

A continuación, la mezcla pasa a una prensa contigua. A las briquetas así formadas, se las somete a un proceso de desecación y curado con el fin de que adquieran suficiente resistencia.

Finalmente, mediante unos alimentadores vibratorios provistos de una parrilla para eliminar los finos, se conducen las briquetas desde la tolva de almacenamiento hasta el equipo de envasado.

Se dispone de una extensa serie de modelos y tamaños, para satisfacer las necesidades de cada caso, utilizándose equipos de funcionamiento sencillo y manual, así como otros completamente automatizados.

El tipo de prensa a elegir dependerá tanto del género de materia prima como de la capacidad de la planta.

La experiencia demuestra que la mayoría de los equipos se pueden construir localmente.

Los productores tienden a usar equipos de segunda mano, modificados, con la consiguiente disminución de la inversión inicial.

Por último, se describen brevemente las principales operaciones o equipos de que consta una planta de este tipo.

#### 7.14.2.- Preparación de la materia prima

La materia prima se recibe en camiones, desde donde pasa a una criba que selecciona los fragmentos de mayor tamaño, y los envía a un molino de martillos, para su posterior reducción. Los productos así triturados, junto con aquellos otros de menor tamaño, se transportan a la tolva de almacenamiento por medio de un elevador de cangilones. Desde aquí, un transportador de tornillo sin fin los conduce al secadero. Esta tolva posee unos dispositivos sensoriales para controlar su descarga.

#### 7.14.3.- Secadero

El secadero puede ser de uno de los tres tipos siguientes:

- . Rotatorio de simple paso
- . Rotatorio de triple paso
- . De diseño especial, provisto de un transportador de tornillo sin fin

En cualquiera de ellos, los gases calientes que se conducen a su interior, pasan a través de la materia prima. La temperatura del gas de entrada varía con el diseño del secadero, oscilando normalmente, entre los 200 y 700°C. Por otra parte, el gas que sale del secadero se dirige a un ciclón, con el fin de eliminar las partículas sólidas que arrastra.

#### 7.14.4.- Reactor

El reactor consta de un cuerpo exterior de acero revestido de un material refractario, un mecanismo de extracción de materia prima situado en su parte inferior, una cámara de pleno -

más baja, un tornillo sin fin para el transporte del carbón vegetal, una antecámara de compresión donde poder descargar dicho producto, una cubierta aislante y un sistema de inyección de aire.

Funciona normalmente a una presión ligeramente inferior a la atmosférica, cerrándose herméticamente con el fin de evitar la entrada de aire del exterior.

La materia prima desecada alimenta a la antecámara de compresión, próxima a la cubierta del reactor. La velocidad de alimentación del reactor se controla por el sistema de extracción, mientras que un indicador de nivel de tipo nuclear regula la velocidad de avance de la materia prima en su interior.

A medida que los compuestos descienden en el seno del reactor, se calientan a una temperatura máxima de 900°C, aproximadamente, para experimentar una descomposición térmica, con la consiguiente producción de carbón vegetal y vapores gaseosos.

El carbón, se descarga en el interior de una cámara de pleno inferior, en donde se enfría mediante una pulverización con agua, transportándose a continuación por medio de un tornillo sin fin y a través de una esclusa neumática hasta el depósito de almacenamiento.

Los vapores gaseosos que se desprenden, fluyen en sentido ascendente, calentando a la materia prima descendente, por lo que se establece una corriente de doble dirección y sentidos contrarios. Finalmente, salen por una lumbrera situada en la parte superior del reactor.

A efectos de protección, se incorporan varios mecanismos de seguridad, tales como:

- . Puertas de desahogo o alivio
- . Reguladores automáticos de temperatura
- . Reguladores automáticos del agua de refrigeración o en  
friamiento

#### 7.14.5.- Sistema de eliminación y aprovechamiento del gas

Todas las superficies interiores del sistema de conduc  
ción, eliminación y aprovechamiento del gas, son de acero inoxid  
dable, para evitar problemas de corrosión.

Las principales funciones de este sistema son las si  
guientes:

- . Facilitar la salida de los gases producidos en el inte  
rior del reactor, para su posterior lavado y enfriamien  
to, con el fin de eliminar las partículas sólidas que  
arrastren. A las temperaturas más bajas tiene lugar la  
condensación del aceite.
- . Conducir los vapores gaseosos limpios a un decantador  
en donde la neblina de aceite sobrante se recoge y eli  
mina.
- . Dirigir el gas combustible, con la ayuda de un ventila  
dor de tiro inducido, al quemador del secadero, a otros  
lugares de la instalación y/o a una chimenea de antor  
cha. El objeto de ésta es permitir a los gases que se  
quemem limpiamente y se viertan a la atmósfera, debien  
do cesar en tal caso la demanda del quemador o la de  
cualquier otra aplicación. La antorcha se puede utili  
zar en el arranque inicial hasta conseguir la calidad  
del gas deseado.

En él, también se incorporan diversos mecanismos de seguridad, tales como:

- . Válvulas de muelle, que abren cuando se alcanza una presión de 300 mm de columna de agua, aproximadamente.
- . Reguladores automáticos de alta temperatura. Cuando en este sistema se inicie el fuego, el ventilador tendrá que parar. Al mismo tiempo, se deberá interrumpir el suministro de aire y vaciarse el reactor, eliminándose los gases residuales a través de la antorcha de emergencia.
- . Interruptores de energía eléctrica. Si se produce una avería en el suministro de energía, se paralizan el aprovisionamiento de aire y el ventilador. Sin aire, el proceso se detiene por sí solo. Los gases residuales fluirán en tal caso hasta la chimenea de antorcha, en donde se quemarán sin peligro alguno.

#### 7.14.6.- Sistema de manipulación y almacenamiento del carbón

El carbón vegetal producido se descarga desde la antecámara de compresión al tornillo de extracción del reactor, enviándose a continuación por medio de un transportador de tornillo sin fin a un elevador de cangilones, que se encarga de llenar un depósito o tolva de almacenamiento. Todos estos elementos se diseñan para servicio muy pesado.

Cuando se manipula un producto polvoriento o aquellos otros que contienen vapores gaseosos, existe siempre un posible peligro de explosiones. Por eso, la parte superior de la tolva se diseña contra probables explosiones, para que se pueda levantar

tar y dar salida a los gases, siempre que la presión interior - supere el valor límite establecido. De esta manera se protege su integridad estructural. Además, en su parte superior se disponen cuatro puertas o trampillas de peso directo.

#### 7.14.7.- Balances de materia y energía

En el proceso de pirólisis parcial se puede tratar cualquier tipo de materia prima, con la correspondiente variación - en los rendimientos de aceite y gas obtenidos. Este hecho se controla principalmente por la relación aire/materia prima, según se ha podido comprobar en diversos ensayos realizados a escala comercial.

En la Figura 44 se muestra la distribución energética correspondiente a los tres productos que se originaron en la pirólisis de una mezcla de serrín y corteza de pino triturada, en función del rendimiento del carbón vegetal.

La curva del producto sólido se ha obtenido en la realización de varios ensayos. Mientras que en una planta comercial los rendimientos en carbón variaron entre un 19,5 y un 38,6%, en una piloto oscilaron entre un 8 y un 45%.

En esta figura se observa que el contenido energético - del carbón vegetal aumenta a medida que se incrementa su rendimiento, a la vez que disminuye el del gas. No obstante, conviene advertir que una cantidad constante de energía, en forma de gas, se destina para el secadero. En este caso concreto, se trata de un secadero de diseño especial, que necesita unas 880 kilocalorías por kilo de agua eliminada.

El poder energético del aceite aumenta ligeramente con

forme se incrementa el rendimiento del carbón vegetal, desde un 10 a un 25%, para disminuir con valores más altos.

En este proceso de pirólisis parcial se recupera hasta el 95% de la energía que contiene la materia prima desecada. Para la mezcla anterior de serrín y corteza de pino triturada, se ha calculado un poder calorífico superior de 4.835 Kcal por kilo de materia prima seca. En la misma figura se puede ver, que para un rendimiento en carbón vegetal del 10%, la energía total de los productos obtenidos es de 4.588 Kcal por kilo de materia seca.

Las curvas de distribución energética indican la flexibilidad de este proceso de pirólisis parcial. El sistema se puede regular para maximizar aquellos productos de mayor valor o para satisfacer la demanda local.

El contenido energético del aceite, gas y carbón obtenidos, también varía con el tipo de materia prima que se procese.

En la Tabla 13 se indican los datos que se obtuvieron en unos ensayos realizados a nivel de planta comercial y piloto, - respectivamente, con astillas de copas de pino, cortezas de pino trituradas y una mezcla de serrín y corteza de pino triturada. El poder energético del carbón vegetal, para un mismo rendimiento del mismo, fue aproximadamente igual para los tres tipos de compuestos ensayados. Sin embargo, para un rendimiento en carbón del 20%, el poder energético del aceite que se obtuvo con las astillas fue el mayor, mientras que el del que se consiguió con las cortezas fue el menor. El rendimiento más alto que se alcanzó para el carbón vegetal fue de un 45,7% (sobre base seca), al tratar corteza de pino triturada.

VALOR ENERGETICO DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS EN LA PIROLISIS DE UNA MEZCLA DE SERRIN Y CORTEZA PINO TRITURADA EN FUNCION DEL RENDIMIENTO DE CARBON VEGETAL

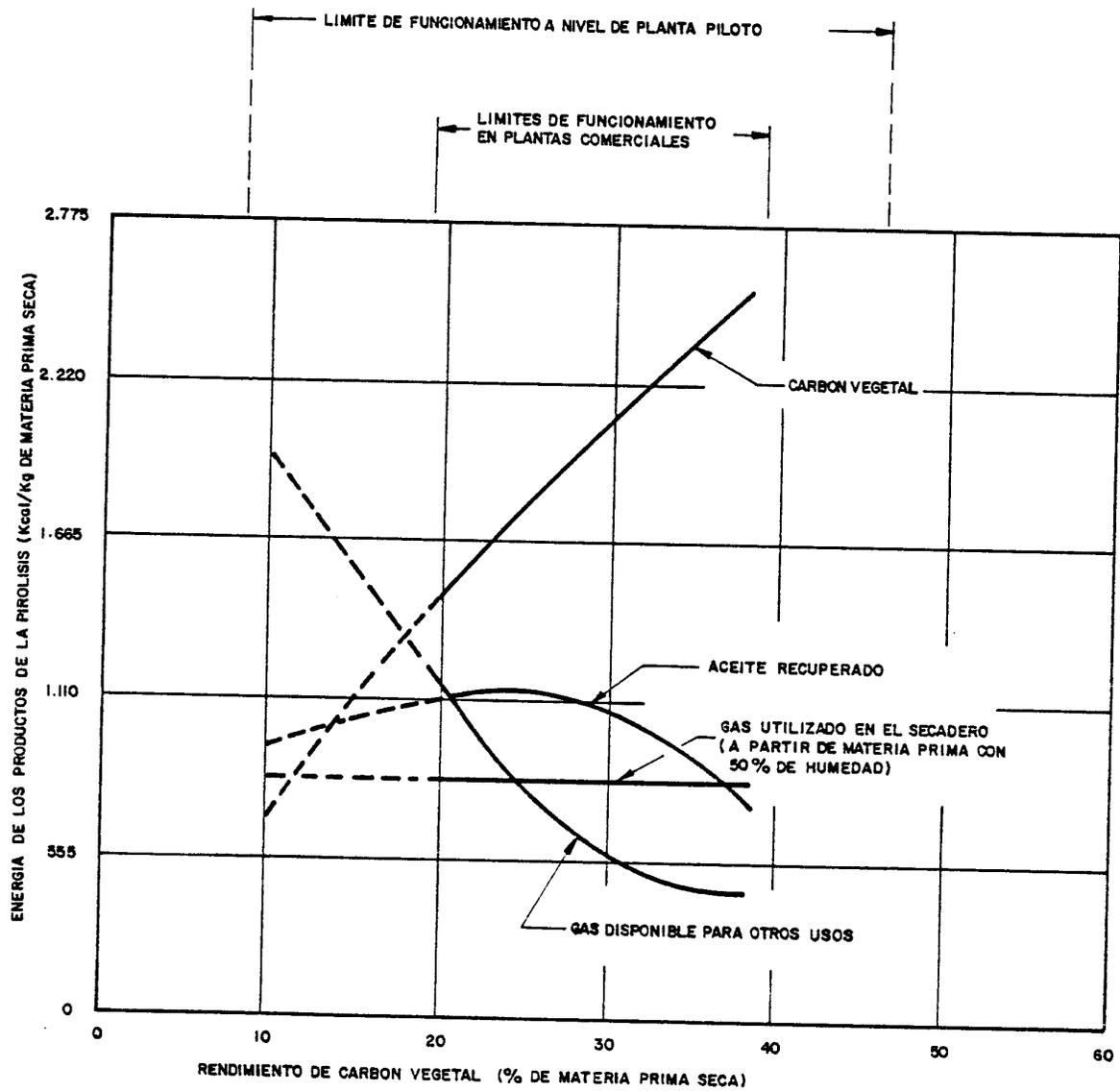


TABLA N° 13.- RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LOS BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA DEL PROCESO DE PIROLISIS LLEVADO A CABO CON DIFERENTES TIPOS DE PRODUCTOS LEÑOSOS

CONCEPTO	UNIDADES	MATERIAS PRIMAS						
		Astillas de copas de pino		Mezcla de serrín y corteza triturada de pino		Corteza triturada de pino		
		Ensayo A	Ensayo B	Ensayo A	Ensayo B	Ensayo A	Ensayo B	
Poder calorífico superior	Kcal/kg de M.S.	4.965	4.965	4.910	4.782	4.813	4.951	4.890
Contenido de humedad (sobre base fresca o húmeda)	%	5,7	5,8	1,4	0,5	13,5	12,2	7,4
Rendimiento en materia:								
• Carbón vegetal	% de M.S.	20,5	25,6	20,5	24,4	38,2	18,9	45,7
• Aceite	% de M.S.	34,6	31,9	19,2	23,7	17,5	7,8	12,8
• Gas	% de M.S.	76	71	103	103	111	116	88
Rendimiento energético:								
• Carbón vegetal	Kcal/kg de M.S.	1.462	1.895	1.538	1.839	2.591	1.345	3.188
• Aceite	Kcal/kg de M.S.	1.943	1.763	1.210	1.249	598	463	686
• Gas	Kcal/kg de M.S.	1.372	1.104	1.704	1.640	1.234	2.917	731

NOTA: M.S. = Materia seca

También se llevó a cabo un estudio para determinar el mínimo rendimiento de carbón vegetal sin que se formen escorias. Los datos obtenidos al tratar durante 72 horas en una planta piloto, astillas de pino, se muestran en la Tabla 14. Se analizaron dos modelos de funcionamiento. En el de paso continuo o único, la materia prima pasa una sola vez por el reactor. En el de recirculación, se incrementó la producción de carbón vegetal, con un rendimiento equivalente al 20%. Las partículas gruesas se volvieron a introducir en el reactor junto con la materia prima, eliminándose los finos y cenizas por medio de cribas. En el primer procedimiento se obtuvo un rendimiento en carbón del 8,2%, mientras que en el segundo bajó a un 3,8%. Incluso con menores rendimientos, el reactor funcionó como un equipo de pirólisis, con una menor producción de aceite que en el caso de las astillas de copas de pino, para un rendimiento en carbón del 20%.

La recirculación del carbón es otra opción eficaz para el tratamiento de residuos, con producción de gas, aceite y una mínima cantidad de carbón vegetal. Esta técnica también se puede emplear para evitar las condiciones de escorificación, y conseguir bajos rendimientos de carbón vegetal, cuando el contenido de cenizas es alto.

Esta última circunstancia es de una gran importancia para el proceso de pirólisis de algunos residuos agrícolas con un alto porcentaje de compuestos inorgánicos incombustibles.

#### 7.14.8.- Planta de Pirólisis Parcial, Completa o Integral

El término "Completo o Integral" se asigna a la planta de Pirólisis Parcial que se incorpora a una instalación ya existente, con el fin de conseguir el mayor ahorro económico posi

TABLA N° 14.- Resumen de los datos obtenidos en los ensayos realizados con astillas de pino para un rendimiento mínimo de carbón vegetal

Concepto	Unidades	Forma de Funcionamiento		Recirculación del carbón vegetal cribado
		Paso contínuo		
		Ensayo A	Ensayo B	
Aire inyectado .....	kg de aire/kg de M.S.	0,56	0,69	0,92
Temper.máx. del lecho	°C	1.018	1.029	1.129
Rendimiento en materia:				
• carbón vegetal .....	% de M.S.	10,9	8,2	3,8
• aceite .....	% de M.S.	25,3	32,3	30,7
• gas (1) .....	% de M.S.	119,8	128,5	157,5
Rendimiento energético:				
• carbón vegetal .....	% de M.S.	16,7	12,2	5,4
• aceite .....	% de M.S.	28,0	36,1	33,2
• pérdidas de calor(2)	% de M.S.	4,6	4,6	4,6
• gas (1) .....	% de M.S.	50,7	47,1	56,8

NOTA:

(1) Se ha calculado por diferencia

(2) Se ha supuesto dicho valor en función de datos obtenidos anteriormente

ble. En otras palabras, la nueva planta se diseña para utilizar de forma óptima los recursos de materia prima disponibles, así como los productos terminados obtenidos.

En la Figura 45 se indican una serie de industrias relacionadas entre sí.

Una planta de pirólisis puede proporcionar el carbón vegetal obtenido a una fábrica de carbón activado, reservándose una parte del mismo para su propia fabricación de briquetas, a la vez que suministra el aceite producido a las industrias de ladrillos, tableros, destilerías, etc., para que lo empleen como combustible en sus respectivos quemadores y calderas de vapor.

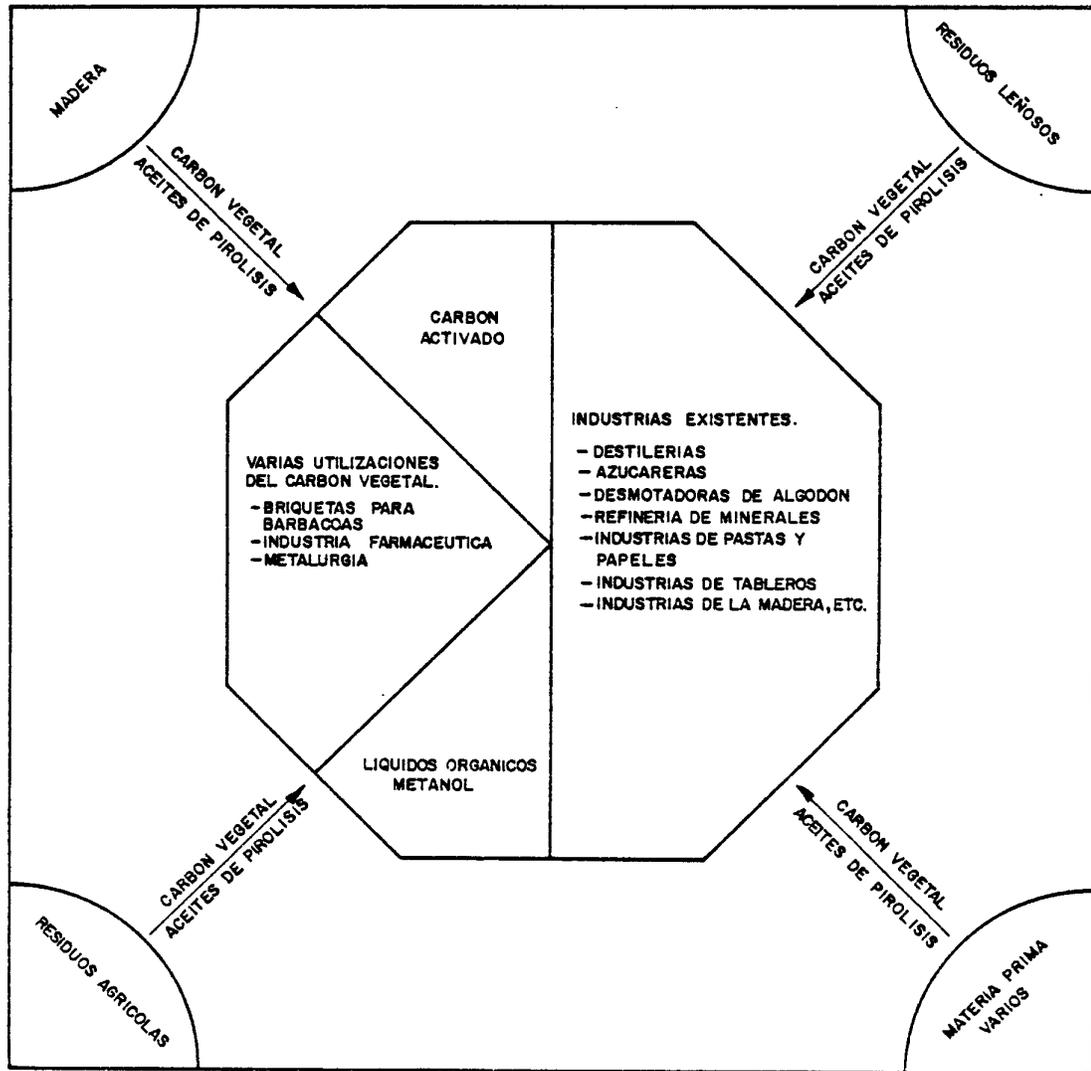
Se ha comprobado que las posibles interconexiones entre todos estos tipos de industrias, varían mucho de un país a otro.

En los industrializados, existen muchas plantas de pirólisis parcial que tienden a emplear calderas de vapor auxiliares o complementarias, alimentándose con la cantidad total de gases producidos, sin tener que efectuar operación de condensación alguna.

El vapor producido se vende a continuación a industrias próximas o adyacentes.

También se han realizado ensayos para ver el comportamiento del aceite de pirólisis en los hornos de cemento. Durante varios meses se alimentaron con una mezcla de dicho aceite y fuel oil # 6 (en la proporción del 20%).

PRODUCCION INTEGRAL DE CARBON VEGETAL MEDIANTE EL EMPLEO DE CUATRO UNIDADES DE CARBONIZACION



Un reactor de pirólisis parcial se puede considerar como un generador principal de gas a partir de la materia prima que recibe en forma sólida. Análogamente, un horno de carbón activado efectúa básicamente las mismas funciones. Por consiguiente, la combinación de ambas operaciones representa a un potente generador de gas, según se ha demostrado en muchas plantas.

De aquí que se hayan hecho con anterioridad cuidadosas consideraciones acerca de la viabilidad del concepto de planta integral. De lo contrario se corre un gran riesgo, en el sentido de que la energía de que se disponga no se pueda utilizar de modo razonable. En tal caso se desperdiciaría energía, con la consiguiente disminución de la rentabilidad de la planta.

#### 7.14.9.- Capacidad

El término pirólisis parcial resulta algunas veces engañoso y confuso, al asociarse con producciones a gran escala, con técnicas de ahorro de mano de obra y con equipos sofisticados.

Un equipo de pirólisis parcial se puede diseñar tanto para los pequeños hombres de negocios como para los grandes fabricantes. También, para plantas de funcionamiento manual, si se desea, y para aquellas otras de tipo continuo.

Es de creencia general que, en la mayor parte de las plantas rentables, la capacidad de tratamiento o transformación varía entre 0,5 y 7 toneladas de materia seca por hora. Para mayores volúmenes se ha de modificar el reactor, difiriendo bastante del modelo ya descrito, no siendo ya viables los de funcionamiento manual.

La experiencia adquirida en diferentes países durante mu

chos años, pone de manifiesto que las inversiones no son proporcionales a la capacidad de la planta. Los costes de ingeniería, equipos, etc, varían mucho de unos a otros. Por lo tanto, el volumen de la planta no tendrá gran influencia en los costes iniciales.

Por otra parte, una planta de pirólisis puede emplear perfectamente equipos de segunda mano. Los productores tienden a comprar anticipadamente estos equipos, para nuevas ampliaciones, tan pronto como se disponga de ellos en el mercado.

Las amortizaciones de este tipo de plantas bien diseñadas, no deberán superar normalmente el plazo de 18-24 meses.

#### 7.14.10.- Conservación de los recursos y pirólisis parcial

Los fabricantes tradicionales de carbón vegetal que utilizan el método de los montones de tierra, no consiguen un rendimiento energético total superior al 15-17%, según se desprende de los correspondientes balances energéticos.

Aquellos otros que emplean una tecnología más avanzada, como los hornos Beehive, los hornos Reichenbach y las retortas, consiguen un mejor rendimiento energético si se les compara con los anteriormente citados. En óptimas condiciones dicho rendimiento puede alcanzar hasta un 35-38%.

Como una planta de pirólisis parcial se diseña para la total recuperación de los subproductos, se aísla muy bien y se monta desde un punto de vista integral, son de esperar en ella los mayores rendimientos energéticos. En algunas de estas plantas se obtienen valores por encima del 87%.

En el proceso de Carbonización Integral se alcanzan rendimientos energéticos medios alrededor del 80-85%, distribuidos de la siguiente manera:

- . 30% en el combustible sólido (carbón vegetal)
- . 25% en el combustible líquido (aceite)
- . 25% en el combustible gaseoso
- . 20% de pérdidas.

Una planta de carbonización de tamaño medio, que trata 10.000 toneladas de materia prima (secadas al aire) al año, puede producir:

- . 3.500 toneladas de briquetas de carbón vegetal de 5.200 Kcal/kg
- . 2,5 millones de litros de aceite de 6.000 kcal/kg
- . gas para el proceso/pérdidas.

Durante muchos años prevaleció la creencia generalizada, incluso en los Departamentos Forestales, de que la producción de carbón vegetal era la causa del continuo agotamiento de los recursos naturales y de la supresión de zonas de bosques en muchos países. Aunque la existencia en los países industrializados de una industria de fabricación de carbón vegetal a gran escala es polémica, recientes estudios llevados a cabo en países en vías de desarrollo, demuestran su función beneficiosa.

Sin embargo, es evidente que los fabricantes que emplean montones de tierra, hacen un mal trabajo, al efectuar cada año talas más intensas de bosques, conforme se incrementa la demanda de carbón vegetal. Por otro lado, los leñadores de los

blos y aldeas, junto con los rebaños de ovejas y cabras, producen el mismo daño en los recursos naturales de gran valor, con el consiguiente agotamiento de los mismos.

Por esto es muy importante hacer observar a los ingenieros industriales, de montes, ecologistas y empresarios privados, que existen tecnologías de las que se puede disponer fácilmente, para el aprovechamiento de muchas reservas que están sin explotar hasta ahora y el correspondiente beneficio para mucha gente implicada en el tema.

Finalmente, conviene recalcar la viabilidad técnico-económica de estas tecnologías, al producirse millones de toneladas de productos energéticos transportables.

#### 7.15.- PROCESO CARBOTECNICA

##### . Generalidades

Esta firma dispone de un moderno proceso de gasificación-carbonización para el tratamiento continuo de una amplia gama de residuos agrícolas y forestales, como la cascarilla de arroz, cáscara de piña, matorrales, monte bajo, astillas, serrín, etc.

El proceso se compone fundamentalmente de los siguientes elementos:

- . Un sistema de alimentación, para el abastecimiento y suministro de materia prima.
- . Una o varias cámaras de gasificación-carbonización (CGC), constituidas principalmente por un horno de soleira inclinada. Su pendiente se puede regular en función

del tipo de materia prima de que se trate y de las ca  
racterísticas del gas y carbón que se quieran obtener.  
 En su parte frontal, dispone de un dispositivo de ad  
misión de aire, que también se puede fácilmente regu  
lar.

- . Un sistema de extracción y enfriamiento del carbón pro  
ducido.

Los residuos, que penetran por la parte superior de la  
 cámara, deben poseer una granulometría no superior a 70 mm y un  
 contenido máximo de humedad del 15%. De lo contrario, no se con  
seguirá una buena gasificación-carbonización, obteniéndose un  
 gas sumamente pobre y un carbón de mediana calidad.

El fenómeno de gasificación-carbonización se controla al  
 actuar sobre los dos parámetros siguientes:

- . Velocidad de alimentación/velocidad de extracción del  
 carbón.
- . Caudal de admisión de aire.

Cada cámara ocupa una superficie en planta de 12 m<sup>2</sup>, con  
 una capacidad de tratamiento de 1 t/h de residuos leñosos con  
 un 15% de humedad y un poder calorífico de 3.750 Kcal/kg, obte  
niéndose aproximadamente 1.000 kg/h de gas de 2.000 Kcal/kg -  
 (2 x 10<sup>6</sup> Kcal/h) y 200 kg/h de carbón de unas 6.500 Kcal/kg -  
 (1,3 x 10<sup>6</sup> Kcal/h).

Naturalmente, estos valores dependerán del contenido de  
 humedad y de la propia naturaleza de los residuos que se utili  
cen, como su contenido en sustancias minerales (cenizas), ligni  
na, celulosa, ceras, etc.

En este proceso se pueden variar las producciones de gas y carbón, según el mayor o menor grado de gasificación que se desee. No obstante, a partir de ciertos límites, disminuye el rendimiento horario de las cámaras, al ser la gasificación del carbono fijo un fenómeno intrínsecamente más lento que la destilación de los elementos volátiles, reduciéndose la calidad del carbón al aumentar su contenido en cenizas, una vez que todas las sustancias minerales se hayan carbonizado.

Otro argumento en contra de una excesiva gasificación del carbono es el valor que posee un buen carbón (de una gran reactividad y desprovisto de S y V), como el que se obtiene en las cámaras CGC, superior al que tendría según su contenido energético.

El gas producido se puede quemar en los hornos o cámaras de combustión que emplean normalmente combustibles derivados del petróleo (fuel-oil o nafta), como es el caso de los generadores de vapor.

Para la aplicación de este proceso se recomienda seleccionar industrias que funcionen durante las veinticuatro horas del día, y a ser posible, sin grandes variaciones de régimen, pues de esta manera se simplificará su utilización.

Se admiten también el empleo de quemadores mixtos, que utilicen gas CGC/fuel oil o gas CGC/gas natural, siempre que la instalación esté dotada de equipos de quema y control para estos combustibles.

En el caso de que haya variaciones de régimen, se puede sustituir por ejemplo, el 80% del fuel-oil consumido por gas CGC, y cubrir el 20% restante con fuel-oil. Este combustible, merced a su gran flexibilidad y seguridad, garantiza la regulación

fin de la llama, mientras que el gas cubre la mayor parte de la energía requerida, sin necesidad de efectuar grandes modificaciones durante mucho tiempo.

Las cámaras se deben instalar junto a industrias que consuman combustibles petrolíferos, para abaratar y simplificar el transporte del gas producido en su interior, y que se va a emplear en sustitución de aquéllos, consumiéndose a medida que se produzca.

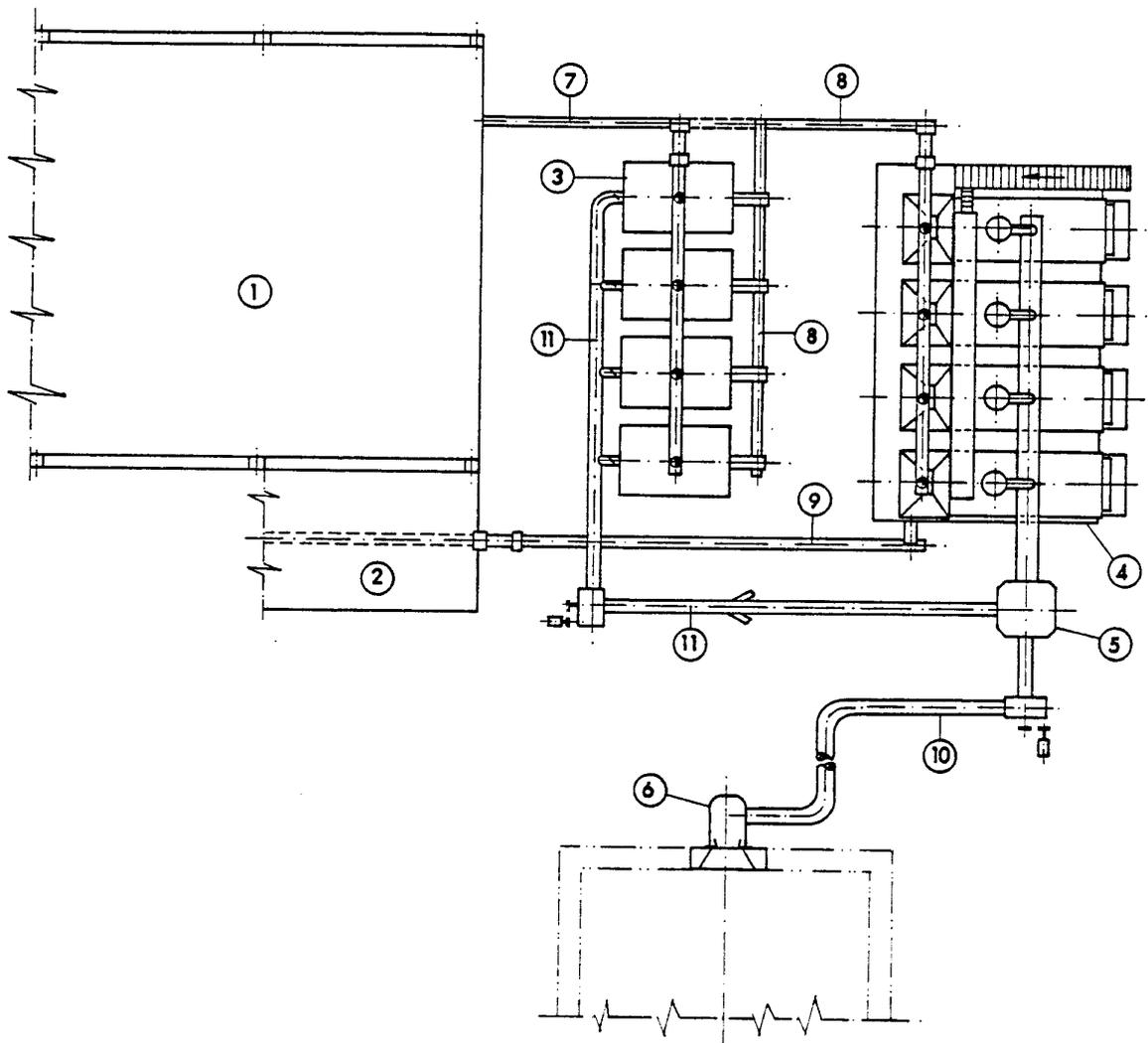
El carbón vegetal obtenido después de un enfriamiento continuo, se almacena, para su posterior expedición a los distintos centros de consumo o a aquellas otras industrias que lo utilizan como materia prima para algún tratamiento especial (activación, fabricación de briquetas, etc.).

. Descripción de una posible instalación

En el caso de que los residuos leñosos lleguen a la planta convenientemente triturados y el gas se quemara en un generador de vapor único, la instalación se compondrá de los siguientes elementos, según se refleja en la Figura 46:

- . Parque de almacenamiento o recepción de los residuos leñosos.
- . Parque o silos para almacenar el carbón producido.
- . Secadero.
- . Cámaras de gasificación-carbonización, con sus respectivos sistemas continuos de alimentación de residuos, y extracción y enfriamiento del carbón.

ESQUEMA DE UNA INSTALACION DE GASIFICACION - CARBONIZACION TIPO  
" CARBOTECNICA "



LEYENDA

- ① PARQUE DE ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA
- ② PARQUE DE ALMACENAMIENTO DE CARBON VEGETAL
- ③ SECADEROS
- ④ CAMARAS GASIFICACION - CARBONIZACION
- ⑤ INTERCAMBIADOR DE GAS/AIRE
- ⑥ QUEMADOR DEL GENERADOR DE VAPOR
- ⑦ SISTEMA PARA TRANSPORTAR LOS RESIDUOS DESDE EL PARQUE DE RECEPCION A LOS SECADEROS
- ⑧ SISTEMA PARA TRANSPORTAR LOS RESIDUOS DESECADOS A LAS CAMARAS DE GASIFICACION-CARBONIZACION
- ⑨ SISTEMA PARA TRANSPORTAR EL CARBON VEGETAL AL PARQUE DE ALMACENAMIENTO DEL PRODUCTO TERMINADO
- ⑩ SISTEMA PARA TRANSPORTAR EL GAS A LOS LUGARES O PUNTOS DE CONSUMO
- ⑪ SISTEMA PARA CONDUCIR UNA PARTE DEL GAS A LOS SECADEROS

- . Intercambiador gas/aire
- . Quemador del generador de vapor
- . Sistema para transportar los residuos desde el parque de recepción al secadero
- . Sistema para transportar los residuos secos a las cámaras de gasificación-carbonización.
- . Sistema para transportar el carbón producido al parque o silos de almacenamiento.
- . Sistema para transportar el gas obtenido a los lugares o puntos de consumo (tuberías y ventiladores).
- . Sistema para la conducción de una parte del gas al secadero.

#### 7.16.- PROCESO THERMEX-REACTOR

##### 7.16.1.- Introducción

Este procedimiento se concibió inicialmente para producir carbón vegetal en una atmósfera carente de oxígeno. Sin embargo se modificó posteriormente al pretender conseguir una total gasificación mediante el suministro de aire.

El proceso es de una gran flexibilidad, pues en virtud de su régimen de funcionamiento u operación, dará lugar a mayores producciones de gas o carbón vegetal, según se desee en cada caso concreto.

### 7.16.2.- Descripción

Los materiales a tratar no han de tener un tamaño superior a 2,5 cm, con una humedad máxima del 55%. Cuando no reúnan estas condiciones se habrán de triturar y desecar, respectivamente.

Para el proceso de secado se pueden emplear parte de los gases producidos en el seno del reactor. También se podrá llevar a cabo mediante la utilización alternativa, en un horno de combustión, de los gases enfriados y lavados, y de los alquitranes obtenidos.

En el caso de materias primas de una gran consistencia, se recomienda un sistema de desecación instantánea, para evitar problemas de manipulación y reducción de tamaño dentro del reactor, con la consiguiente utilización de una fuente calorífica externa en vez de interna. Su coste es relativamente barato.

El contenido adecuado de humedad de la materia prima será aquel que permita que se gasifique la mayor parte de la misma, a la mínima temperatura posible. Mayores temperaturas garantizarán la gasificación, disminuyendo el poder calorífico del gas. Asimismo, se quemará mayor cantidad de carbono, con la consiguiente producción de anhídrido carbónico.

Por regla general, el reactor debe funcionar a temperaturas más altas que aquellas que minimizan y maximizan las producciones de carbón vegetal y gas, respectivamente, pero inferiores a las que originan el máximo rendimiento térmico total. Para su buen funcionamiento se debe mantener a una temperatura comprendida entre 500 y 900°C, aproximadamente.

En la Figura 47 se puede contemplar un esquema genérico del proceso.

La materia prima se transporta, manual o automáticamente desde el parque de almacenamiento hasta la tolva de alimentación del reactor.

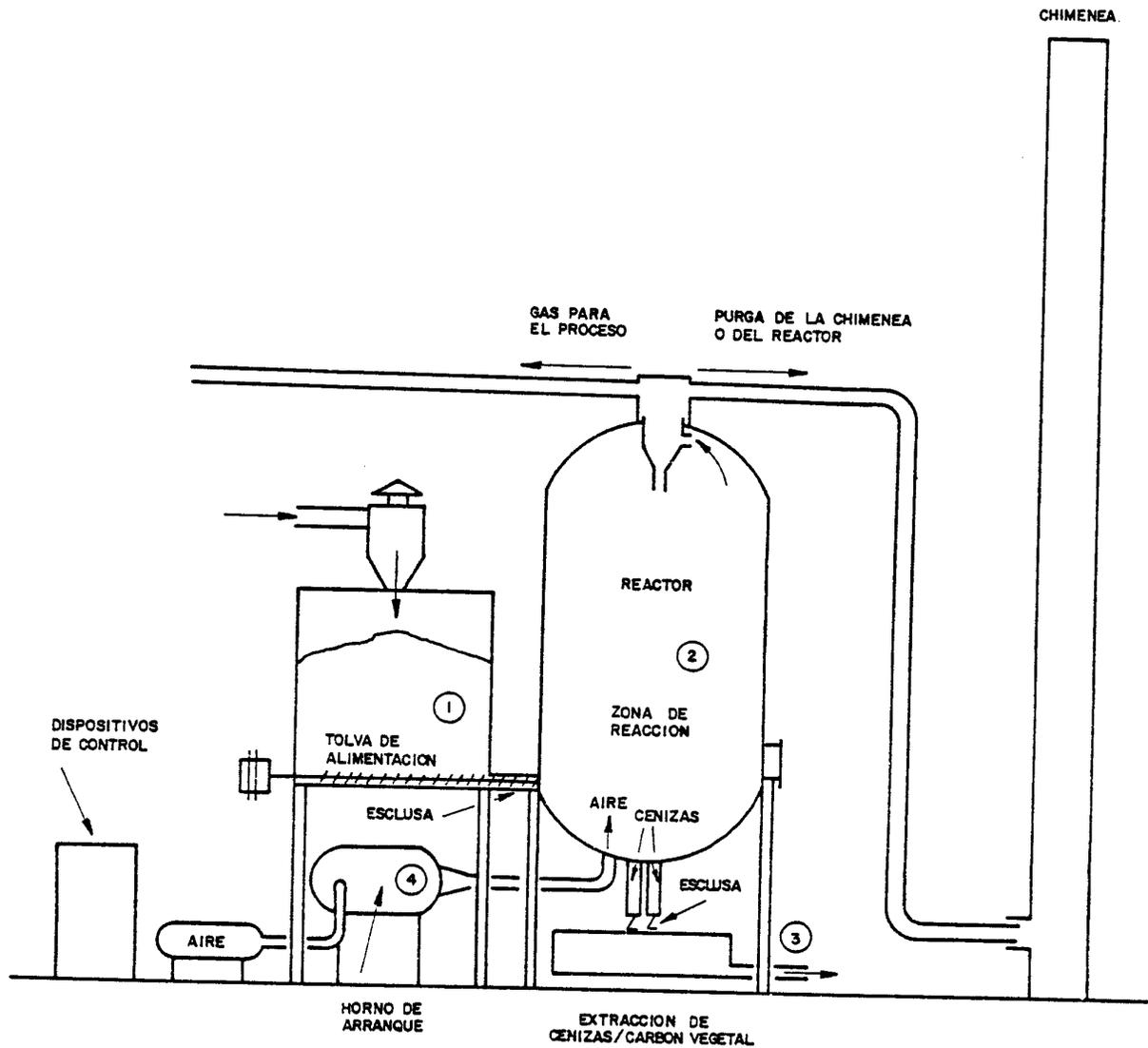
A continuación se dirige continuamente mediante un transportador de tornillo sin fin, accionado por motores hidráulicos de velocidad variable, a un lecho de carbón vegetal incandescente, situado en el fondo de una cámara cerrada (el reactor), en donde se verifican con gran rapidez los fenómenos de destilación y gasificación. Tanto el oxígeno como los gases que se desprenden, se presentan en cantidad suficiente como para mantener el lecho del carbón vegetal y el de las partículas leñosas en un estado fluído turbulento, con la consecución de una temperatura uniformemente elevada desde el principio hasta el fin.

Durante el mismo se produce carbón vegetal de forma continua. Una cierta cantidad se quema y elimina junto con las cenizas. Por otra parte, los gases, ácidos, alcoholes y alquitranes ascienden a través del lecho de carbón vegetal. Los vapores de alquitrán se fraccionan por el calor en hidrocarburos de menor peso molecular. Los gases pasan finalmente a través de una zona desocupada de la cámara, situada por encima del citado lecho, antes de salir del reactor.

Este proceso es autosuficiente desde el punto de vista térmico, suministrándose el calor requerido en el mismo, mediante la combustión parcial del carbono.

Los sólidos que permanecen en el lecho caliente de la zona de reacción y aquellos otros que se recogen en unos ciclones,

ESQUEMA DEL PROCESO "THERMEX-REACTOR"



LEYENDA

- ① ESTRUCTURA Y TOLVA DE ALIMENTACION CON UN TRANSPORTADOR DE TORNILLO SIN FIN EN SU INTERIOR
- ② REACTOR AISLADO Y REVESTIDO DE UN MATERIAL REFRACTARIO
- ③ TRANSPORTADOR ACONDICIONADOR DE CENIZAS O CARBON VEGETAL, CON BOQUILLAS DE RIEGO Y DISPOSITIVOS DE ENFRIAMIENTO POR AIRE, VALVULAS, COMPRESORES Y BOMBAS
- ④ HORNO DE ARRANQUE Y CONTROLES CON TODA LA INSTRUMENTACION Y DISPOSITIVOS DE REGISTRO

salen continuamente del reactor, bien como cenizas o como carbón vegetal, según la modalidad de funcionamiento elegida.

Los sólidos que salen por la parte inferior del reactor pasan a través de una compuerta a un transportador de tornillo sin fin de movimiento continuo. Este transportador es una unidad de acondicionamiento, provisto de bocas de riego y dispositivos de refrigeración por aire. Esta extracción de los sólidos tiene lugar de forma continua.

Al arrancar en frío, la producción de gas no tendrá lugar hasta que hayan transcurrido unas cuantas horas. Una vez que se haya originado el lecho de carbón vegetal, las posteriores paradas y puestas en marcha serán cuestión de minutos.

Después de una parada se puede efectuar una nueva puesta en marcha sin poner en funcionamiento el horno de arranque, requiriéndose únicamente el suministro de aire mediante la bomba correspondiente.

El reactor, revestido de un material refractario aislante, y el carbón vegetal, actúan como un sumidero calorífico, necesitando varios días para enfriarse.

Una sola persona maneja uno o más módulos.

Para lograr un buen funcionamiento se debe realizar un pequeño mantenimiento, como el engrase de los distintos elementos móviles.

Cada uno o dos meses es conveniente abrir el reactor con el fin de comprobar las posibles incrustaciones o concreciones que se hayan podido depositar en las parrillas. Esta operación

no es necesario realizarla en el caso de los aserraderos de funcionamiento continuo.

Aunque se pueden adquirir módulos de funcionamiento manual provistos de equipos de carga, se recomienda desde el punto de vista económico, unidades diseñadas para su posible adaptación al sistema automatizado de los residuos de las fábricas. De esta forma se disminuirá la manipulación de los residuos, y se alcanzará una utilización total de los mismos.

En aquellas fábricas donde se generen más residuos que los que se puedan consumir para satisfacer sus necesidades energéticas, se pueden quemar los gases sobrantes y eliminar a la atmósfera, o se puede producir carbón vegetal, para su posterior almacenamiento o venta a otros consumidores.

#### 7.16.3.- Límites de funcionamiento

- Temperatura de trabajo .....	425°C	925°C
- Contenido de humedad de la materia prima .....	14%	55%
- Tamaño de la materia prima .....	-	2,5 cm
- Peso específico de la materia prima .....	96 kg/m <sup>3</sup>	360 kg/m <sup>3</sup>
- Velocidad de alimentación .....	244 kg/m <sup>2</sup>	976 kg/m <sup>2</sup>
- Ratio .....	3/1	
- Emisión de partículas .....	3,2 gr/Nm <sup>3</sup>	4,5 gr/Nm <sup>3</sup>
- Gases de combustión (CO <sub>2</sub> ) .....	5,4%	16%
- Potencia (reactores de 2,4 a 4,8 m)	40 C.V.	65 C.V.

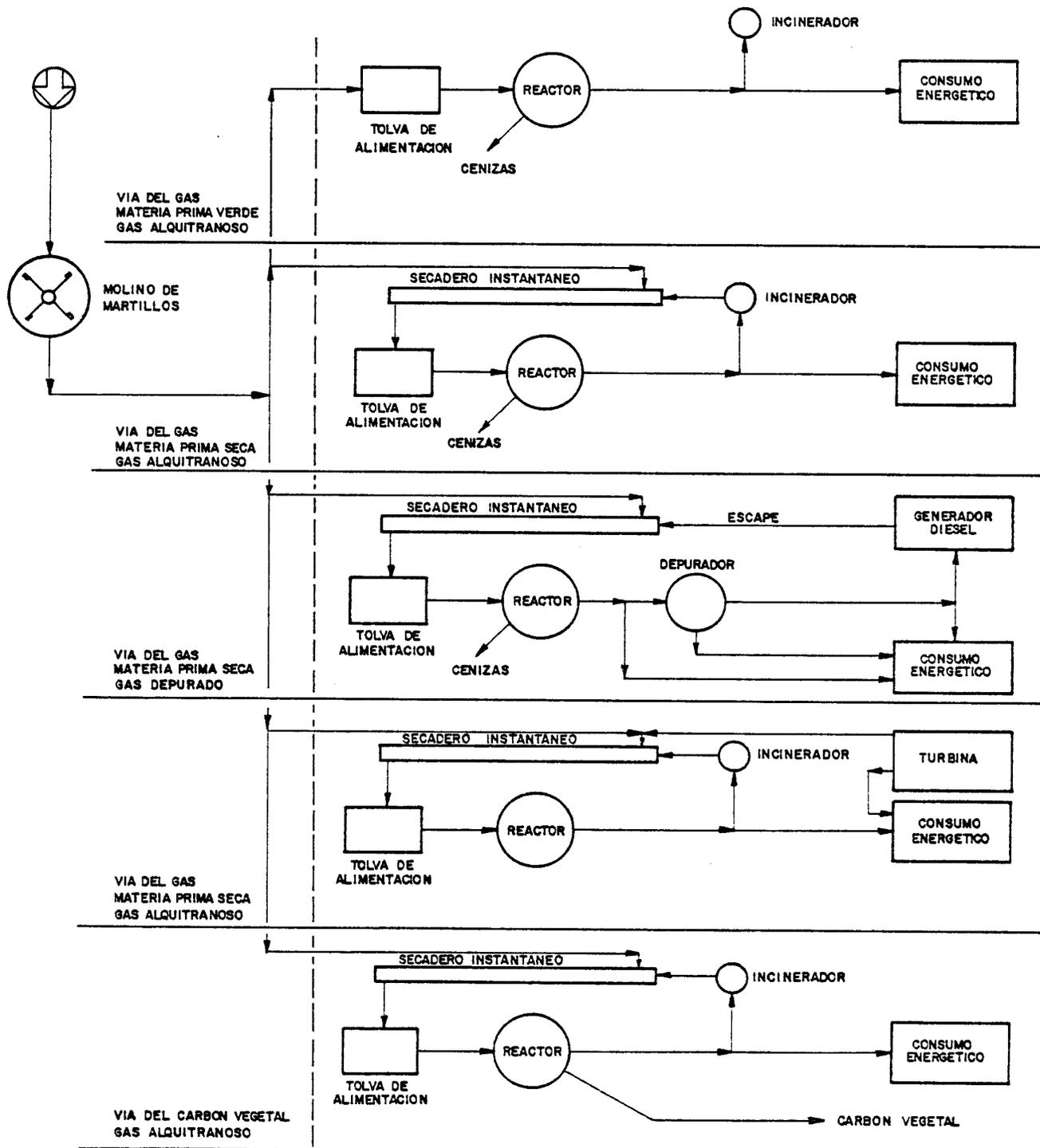
- Pérdidas caloríficas horarias por pa rar .....	13°C	10°C
- Tiempo transcurrido desde el arran- que en frío hasta la producción de gas .....	5 h	12 h
- Tiempo transcurrido desde el arran- que en caliente hasta la producción de gas .....	-	1 min.
- Temperatura de la llama .....	815°C	950°C
- Cenizas residuales .....	0,05%	5%
- Producción de carbón vegetal .....	5%	35%
- Poder calorífico del gas .....	1.400 Kcal/Nm <sup>3</sup>	1.780Kcal/Nm <sup>3</sup>
- Composición característica del gas:		
H <sub>2</sub> .....	18%	
O <sub>2</sub> .....	1,9%	
N <sub>2</sub> .....	46,2%	
CO .....	18,3%	
CE <sub>4</sub> .....	4,1%	
CO <sub>2</sub> .....	10,3%	
C <sub>2</sub> .....	1,2%	
Poder calorífico:	1.585 Kcal/Nm <sup>3</sup>	

No se incluye el poder calorífico de los alquitranes ni de ningún otro producto de destilación.

#### 7.16.4.- Modalidades de funcionamiento

En este proceso existen diversas modalidades de funciona-  
miento según se indica en la Figura 48. En todas ellas se puede  
producir carbón vegetal, bien para almacenar para uso propio, o  
para vender a otras industrias y centros de consumo.

DIVERSAS MODALIDADES DE FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO "THERMEX - REACTOR "



#### 7.17.- PROCESO CROSSET

Se trata de un procedimiento discontinuo desarrollado en Estados Unidos por la citada Compañía.

La leña se carga en unas vagonetas de acero, que se introducen en el interior de una retorta túnel horizontal, en forma de U invertida, en donde tiene lugar el proceso de carbonización. A continuación se meten en unas cámaras horizontales de acero, herméticamente cerradas, con el fin de conseguir el enfriamiento por radiación del carbón producido.

Estas retortas han presentado importantes problemas estructurales, debidos mayormente a su forma, por lo que se han quedado actualmente obsoletas, después de treinta años de funcionamiento. Las deformaciones que se originan son la causa de que entre aire en su interior, dando lugar a grandes fuegos internos y a unos elevados costes de mantenimiento.

#### 7.18.- PROCESO REICHERT

Es un método discontinuo desarrollado en la República Federal de Alemania. En él, las fases de secado y carbonización - se llevan a cabo en una retorta cilíndrica vertical, con una capacidad de producción de 4,5 t de carbón vegetal/día.

Dos retortas constituyen la llamada unidad de operación o funcionamiento. Mientras la carbonización tiene lugar en una de ellas, en la otra se descarga el carbón vegetal, para procederse de nuevo a la carga y secado de la misma, por medio de gases a 170°C, antes que se produzca la carbonización propiamente dicha con gases depurados y calentados a 450-550°C. El calentamiento de estos gases se verifica en una estufa o fogón de recuperación externa.

Una vez que finaliza la carbonización, se corta el suministro calorífico, dejándose descansar la retorta durante unas tres horas, aproximadamente. Entonces el vapor pasa a su parte superior, y cuando aparece por el fondo se descarga el carbón en un recipiente refrigerado y sellado. El enfriamiento se produce en 10-12 horas.

Cuando se utilizan seis retortas durante las diferentes etapas del ciclo de carbonización, y materia prima con un 20-25 % de humedad, los gases que se desprenden se pueden aprovechar para sustituir una gran parte del calor requerido en el proceso, aunque siempre se tenga que suministrar alguna cantidad de gas pobre o natural. Por regla general, los ciclos de secado, carbonización y enfriamiento duran 40-48 horas.

Además del carbón se obtiene ácido acético, metanol, acetona y alquitranes. Estos compuestos químicos, dentro del contexto particular del Mercado Europeo, son tan importantes como el carbón vegetal.

Entre sus desventajas, destaca la dificultad de armonizar o ajustar la duración de las distintas etapas de secado, carbonización y enfriamiento, así como la necesidad de disponer de una planta de condensación muy grande para los vapores de los ácidos piroleñosos y gases depurados.

La capacidad de producción se puede ampliar mediante la instalación de parejas de retortas.

Actualmente están funcionando en la República Federal de Alemania dos plantas de 20.000 t de carbón vegetal/año, cada una.

### 7.19.- PROCESO LAMBIOTTE

Los fragmentos leñosos de 30 cm de longitud y 20-25% de humedad, se cargan por la parte superior de una retorta vertical de tipo continuo. En su descenso, se desecan en primer lugar, merced a los gases ascendentes que se desprenden en el proceso de descomposición térmica. Estos gases se extraen por su parte central a unos 350°C, para volver a introducirse hacia su mitad, previo paso por una cámara de combustión de calentamiento externo, a una ligera presión y 550-700°C de temperatura, según el contenido de carbono fijo que se desee tener en el carbón producido. Es ahora cuando se produce la carbonización, procediéndose a continuación a enfriar a la temperatura ambiente - el carbón obtenido, por medio de un gas, que bien pudiera ser el de un alto horno desprovisto de oxígeno, el que se produce en la propia retorta o el gas natural. Este gas de enfriamiento penetra por la parte inferior de la retorta, para ascender a lo largo de la misma sin cambio alguno. El carbón vegetal, una vez frío, se descarga por su parte inferior.

Por consiguiente, el gas que se utiliza para secar la materia prima es una mezcla del gas de enfriamiento (ahora caliente), del gas procedente de la cámara de combustión externa y del que se desprende en el proceso de destilación de la leña.

Esta mezcla sale de la retorta a 120°C, pudiéndose aplicar, una vez separado el alquitrán, como combustible para producir vapor y otros fines térmicos o para obtención por condensación de diversos productos químicos.

El contenido en carbono fijo del carbón vegetal se puede mantener perfectamente alrededor del 90% y hasta de un 95% a 650°C.

Aunque esta retorta es cara de instalar, requiere escasa mano de obra y reducido mantenimiento, con un operario y un peón para el proceso de carga de la leña, por cada turno de 8 horas. Asimismo, posee una gran eficacia desde el punto de vista térmico y económico.

Si no se dispone del gas combustible carente de oxígeno - anteriormente mencionado, se necesitará un sistema de predesecación, para reducir el contenido de humedad de la materia prima hasta un 10-15% y acelerar el proceso de pirólisis. Sin embargo, esta operación, con los gases de la combustión residual, entraña unos costes adicionales de capital y funcionamiento. El secado al aire es el método más barato siempre que se pueda reducir la humedad a un 20-25%. En la práctica se puede evitar la predesecación mediante retortas de mayor altura, con el fin de prolongar la zona donde tiene lugar el secado propiamente dicho.

En el caso de que se quieran recuperar productos químicos, no se necesitan condensadores tan grandes como en el proceso Reichert, pues el recorrido del gas tiene lugar a velocidad constante, abandonando la retorta a una temperatura ligeramente superior a la del punto de rocío.

Estas retortas pueden ser de varias dimensiones, con capacidades de tratamiento de 25, 35 y 55 t/día. Su volumen varía con el cuadrado de su diámetro, por lo que los modelos mayores deberían ser más baratos por cada tonelada de carbón producida.

Desde el punto de vista teórico es factible una retorta de 100 t/día y 5,5 m de diámetro, mientras que otra de 3,3 m - tiene una capacidad de 35 t/día, lo que representa una capacidad tres veces mayor para un incremento de diámetro del 66%. Una retorta de 55 t/día y 4,2 m de diámetro, debería producir un

66% más para un incremento de diámetro del 25%.

Hoy se cree que para que una retorta de este tipo sea rentable, debe poseer una capacidad mínima de 55 t.

Recientemente se ha observado que la reducción de la leña a fragmentos de 20 cm incrementa la producción diaria de carbón en un 15%, al secarse la materia prima más rápidamente. Por norma general, la reducción de tamaño y el secado de la leña, mejora la calidad del carbón y hace que el proceso de pirólisis transcurra con mayor rapidez.

#### 7.20.- PROCESO CONSTANTINE

Este procedimiento se desarrolló en Wundowie, al Oeste de Australia. Su funcionamiento mecánico es parecido al del modelo Crossett ya descrito, con un mejor diseño, mayor robustez estructural, sin ningún problema de deformación y costes de mantenimiento más bajos. Posee una retorta cilíndrica horizontal que utiliza gases como fuente calorífica externa.

Por regla general, los métodos discontinuos son muy caros debido a las grandes cantidades de acero que llevan las vagonetas de carga y a la mucha mano de obra que requieren, así como a la imposibilidad de producir carbón vegetal con un alto contenido en carbono fijo, como consecuencia de las limitadas temperaturas a que se puede someter el acero dúctil.

Incluso en aquellos lugares en donde el precio de la mano de obra es bajo, los costes de capital son actualmente desfavorables.

No obstante, se considera factible un sistema vertical -

que utilice esta retorta convenientemente mejorada, y que prescinda de las vagonetas de carga.

Por tal motivo, la propia compañía diseñó una retorta - discontinua vertical, en la que los gases producidos en su interior se emplean para los procesos de secado y carbonización de la materia prima, respectivamente. El carbón producido se enfría entonces, al hacer pasar estos gases a través del mismo. A continuación se descarga por su parte inferior a una cinta transportadora que lo lleva a la zona de almacenamiento.

Los subproductos se pueden recuperar, aunque para ello se requerirá el suministro de una fuente calorífica externa.

Salvo en el caso de que las temperaturas de carbonización que se necesiten para obtener un carbón con un alto contenido - en carbono fijo, superen los 550°C, se puede emplear acero dúctil. Por encima de ella habría que recurrir a aceros resistentes al calor.

Siete u ocho retortas que funcionasen durante las diferentes etapas del ciclo, podrían ser autosuficientes para el aprovechamiento del gas.

Para una producción de 55 t/día, se necesitarían ocho retortas de 7 t cada una, las cuales se podrían aumentar paulatinamente en caso de que la demanda lo exigiese. Por esto, este procedimiento es más flexible que el Lambiotte, pues en este último, si se dispone de una retorta de 50 t, la instalación de una segunda sólo tendrá justificación posible ante unos enormes incrementos de la producción adicional. En este caso se podrían utilizar dichas retortas con una Lambiotte, en virtud de la similitud de sus principios operacionales.

### 7.21.- PROCESO NICHOLS-HERRESHOFF

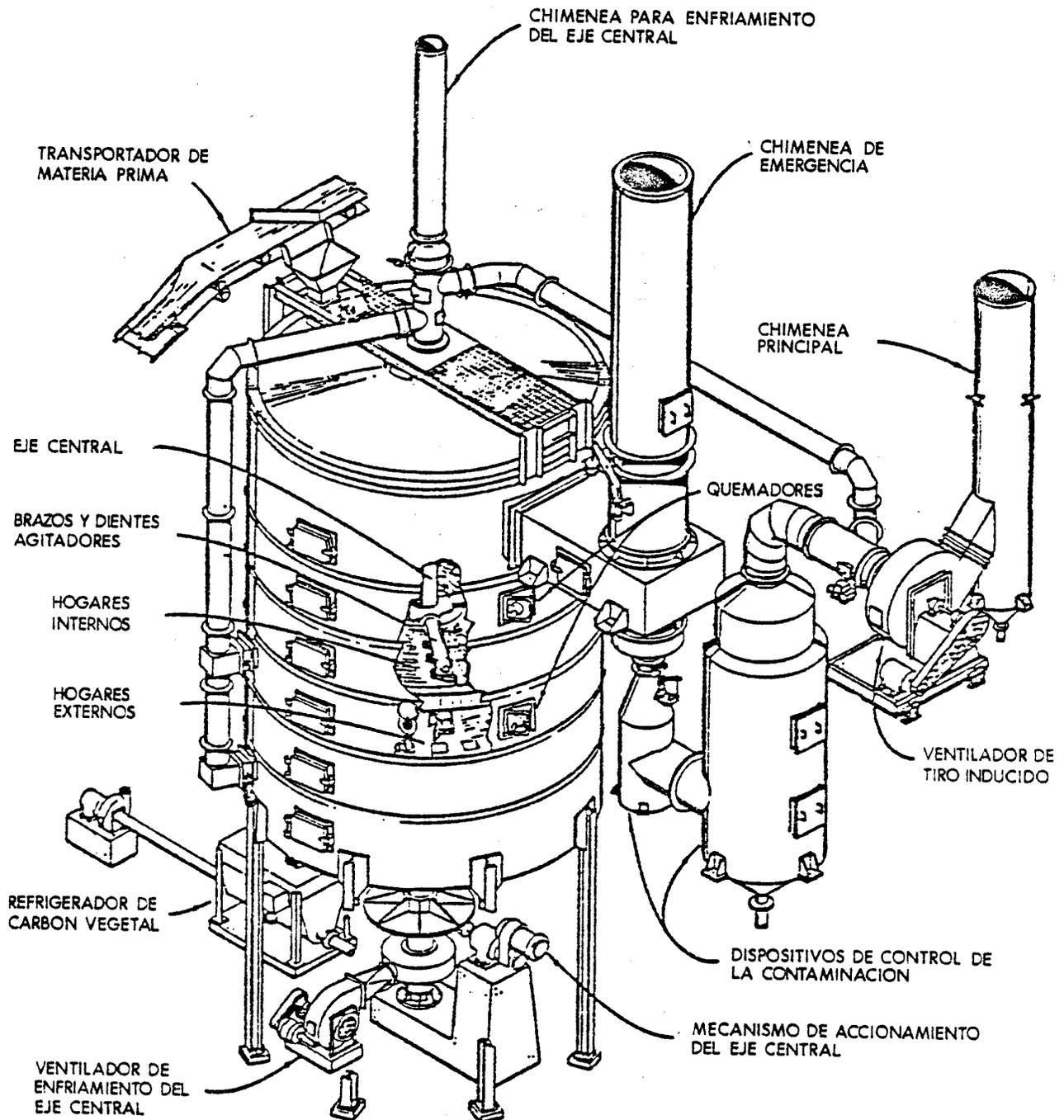
Uno de los principales métodos continuos que se utilizan actualmente para producir carbón vegetal es el horno Nichols-Herreshoff o de hogares múltiples, diseñado por la Compañía estadounidense Nichols Engineering and Research Corporation.

En las Figuras 49 y 50 se indica una perspectiva genérica y una sección de este tipo de horno.

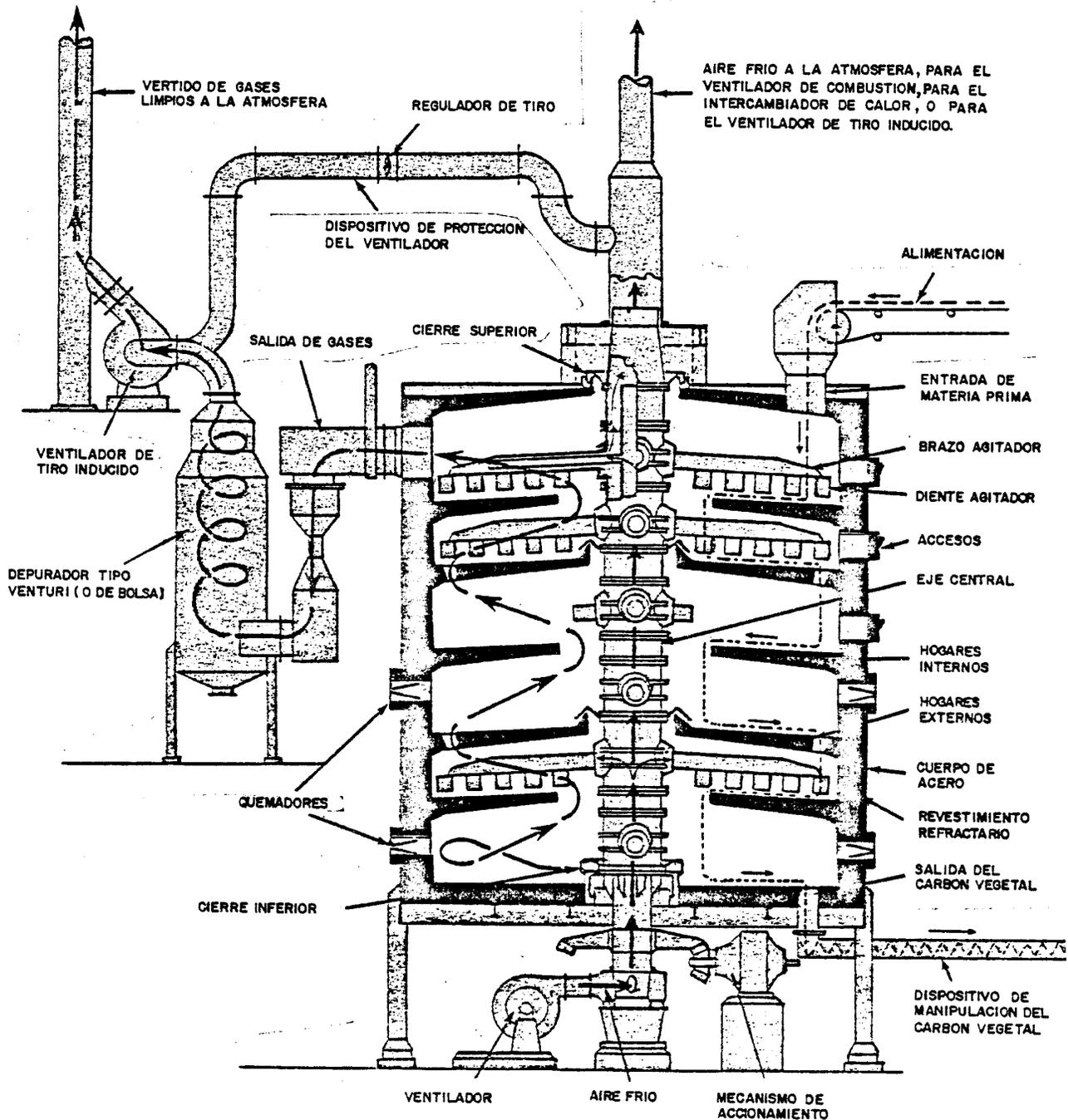
Consta de varios hogares o cámaras de combustión, situadas unas encima de otras. Su número varía según el proceso, demanda de calor y cantidad de materia prima a tratar. Se sitúan en el interior de una cuba cilíndrica metálica, revestida con un material refractario, dividiéndola en una serie de compartimentos. Cada uno de ellos limita con el fondo del hogar, situado por encima y con el techo del hogar, situado por debajo.

En su centro, y para facilitar el avance del material en su recorrido interno, dispone de un eje rotatorio vertical, provisto de dos a cuatro brazos agitadores por hogar, equipados a su vez con una serie de cuchillas. Este eje gira lentamente, a 1 ó 2 r.p.m. aproximadamente y voltea constantemente el material, desplazándolo de un hogar a otro, según una trayectoria en espiral, exponiendo el material fresco a la acción de los gases calientes que se desprenden. En hogares alternos se disponen dientes oblicuos para obligar a pasar a la materia prima desde el eje a las paredes laterales y desde éstas al eje. Alrededor de éste hay un espacio anular, a través del cual cae de unos hogares a otros, alternativamente, mientras que la que queda en ellos desciende por medio de unos agujeros, situados en el fondo de los mismos. De esta manera, la materia prima, que penetra por la parte superior del horno, avanza de forma alter

HORNO DE HOGARES MÚLTIPLES "NICHOLS-HERRESHOFF"



SECCION DEL HORNO DE HOGARES MULTIPLES "NICHOLS - HERRESHOFF"



nativa de unos hogares a otros, con el consiguiente incremento de la temperatura hasta alcanzar su parte inferior, momento en que se procede a descargarla a través de una o más lumbreras.

Los flujos de los gases desprendidos y de la materia prima son de sentido contrario, pues mientras el primero es ascendente, el segundo es descendente. De esta forma se calienta la carga a la temperatura que se necesita para que se verifique la reacción deseada.

Existen unidades de distintas capacidades, con producciones desde 10 hasta 85 t de carbón por día.

El primer paso en la fabricación del carbón es la clasificación por tamaño de los diferentes compuestos leñosos (residuos de las fábricas de madera, mezclas de abeto, pinabete y cedro, etc.). Se almacenan al aire libre hasta el momento de procesarlos. Su tamaño inicial, una vez triturados, deberá ser tal que permita el paso del 95% de los materiales a través de una criba con malla de 2". No obstante, se necesita reducir aun más su tamaño, por lo que se transportan hasta una trituradora o molino de martillos por medio de un transportador de cadena o cinta, en donde se vuelven a fragmentar hasta un tamaño que permita su paso a través de una criba con malla de 3/4". Aquellos - que no pasen, se separan, volviéndose a triturar. El tamaño mínimo requerido es crítico para el siguiente paso, el secado.

Cuando la materia prima triturada posee una humedad superior al 50%, hay que reducirla a un 35-37%, o incluso menos, - bien en un secadero de paso único o en otro de paso múltiple.

El secadero de paso único es por regla general más grande que el de paso múltiple, necesitando una temperatura mayor

del gas para secar una cantidad equivalente de producto. Sin embargo, el segundo es más caro. Para el desecado se pueden emplear los mismos gases que se desprenden en el proceso de carbonización. Normalmente, estos gases se diluyen con aire del exterior, en vez de utilizar el atmosférico, que pase a través de un intercambiador de calor. Con ello se consigue regular la temperatura a la entrada del secadero entre 260 y 538°C.

Una vez que los compuestos leñosos están en el tambor de secado, se cambia la forma de realizar el transporte, que deja de ser mecánico para hacerse neumático. Un ventilador de tiro inducido situado debajo de la corriente del secadero, arrastra los gases calientes hasta la entrada del mismo. Este aparato - crea una succión lo suficientemente grande a la salida, como para arrastrar las astillas y demás partículas que se encuentran en el seno de la corriente de gas.

A partir del secadero, se han de separar las astillas y los gases. Esta operación se puede efectuar en un separador o ciclón. Los gases separados contendrán un pequeño porcentaje de partículas menudas (17,5-21 gr/cm<sup>3</sup>).

Estos gases, cargados de polvo, se pueden quemar en un horno incinerador o en una caldera. Normalmente, una parte de los mismos se quema en el propio horno con el fin de obtener el calor necesario para el proceso de pirólisis.

Desde el ciclón, las astillas caen a un transportador de tornillo sin fin de velocidad variable, para subir a continuación, mediante un transportador de cangilones, hasta la parte superior del horno de carbonización propiamente dicho. En éste, atraviesan distintas zonas hasta que finaliza el proceso con la obtención del carbón. En sus partes más altas tiene lugar un se

cado adicional, en las medias se produce un precalentamiento y descomposición de la materia prima, y en las más bajas un calentamiento final y gasificación, con la separación del gas sobrante y obtención del carbón, que se descarga por el fondo del mismo.

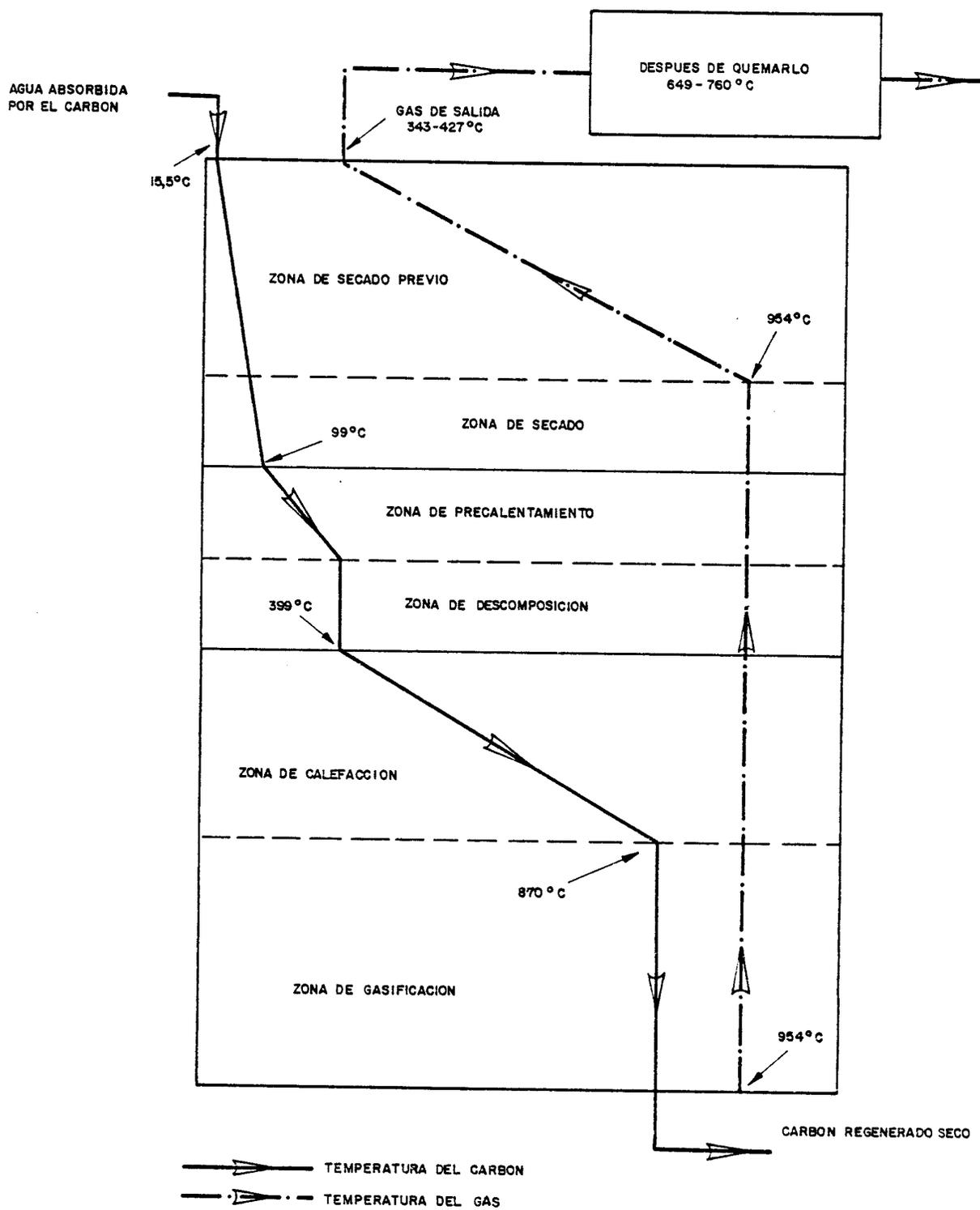
El calor inicial que se requiere para su arranque, se suministra por medio de unos quemadores de aceite o gas, instalados junto a los hogares. Una vez que se ha alcanzado la temperatura de régimen, cesa el funcionamiento de estas fuentes auxiliares. Para encender una parte de los gases desprendidos y mantener la temperatura de operación o funcionamiento, se emplea aire. Todos los gases que se producen salen por la parte superior del horno.

El carbón vegetal que se extrae se enfría normalmente mediante unas pulverizaciones con agua, pudiéndose controlar automáticamente por reguladores térmicos.

En la Figura 51 se señalan de forma esquemática sus distintas temperaturas más características. El gas entra por su parte inferior con una determinada cantidad de aire. Esto permite una combustión parcial de las astillas, suministrando el calor necesario para la gasificación, calefacción, descomposición y secado, respectivamente. Asimismo, en la Figura 52 se muestran sendos diagramas de flujo del gas y de la materia prima, y en la 53 un esquema del proceso continuo de producción de carbón.

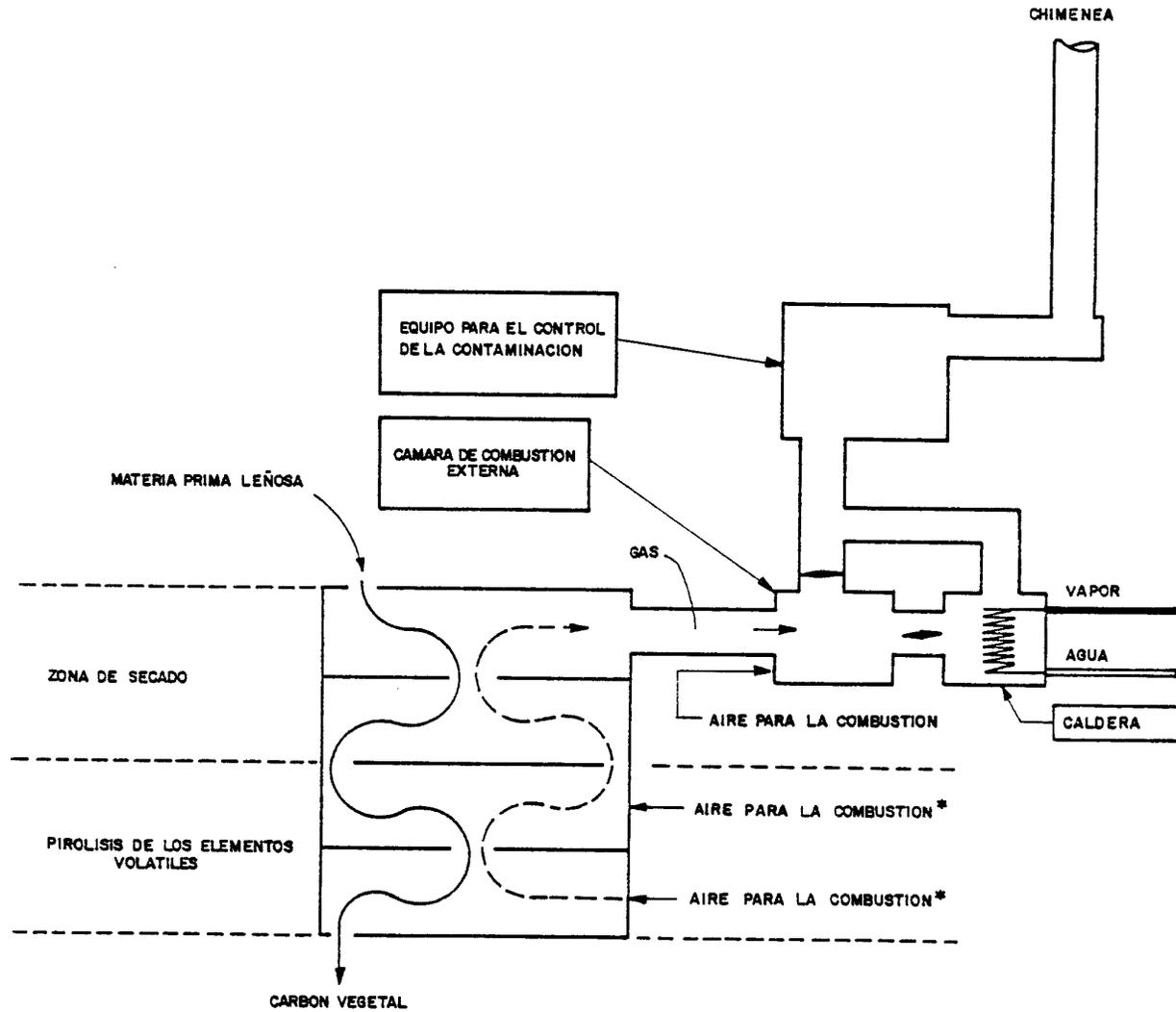
Uno de los mayores inconvenientes de este proceso es la recogida o utilización de los gases. Son de bajo poder calorífico, del orden de  $900-1.800 \text{ Kcal/Nm}^3$ , estando constituidos por hidrocarburos volátiles condensables, hidrógeno, monóxido de carbono y una elevada concentración de partículas de carbón, al

TEMPERATURAS CARACTERISTICAS DEL HORNO "NICHOLS - HERRESHOFF "



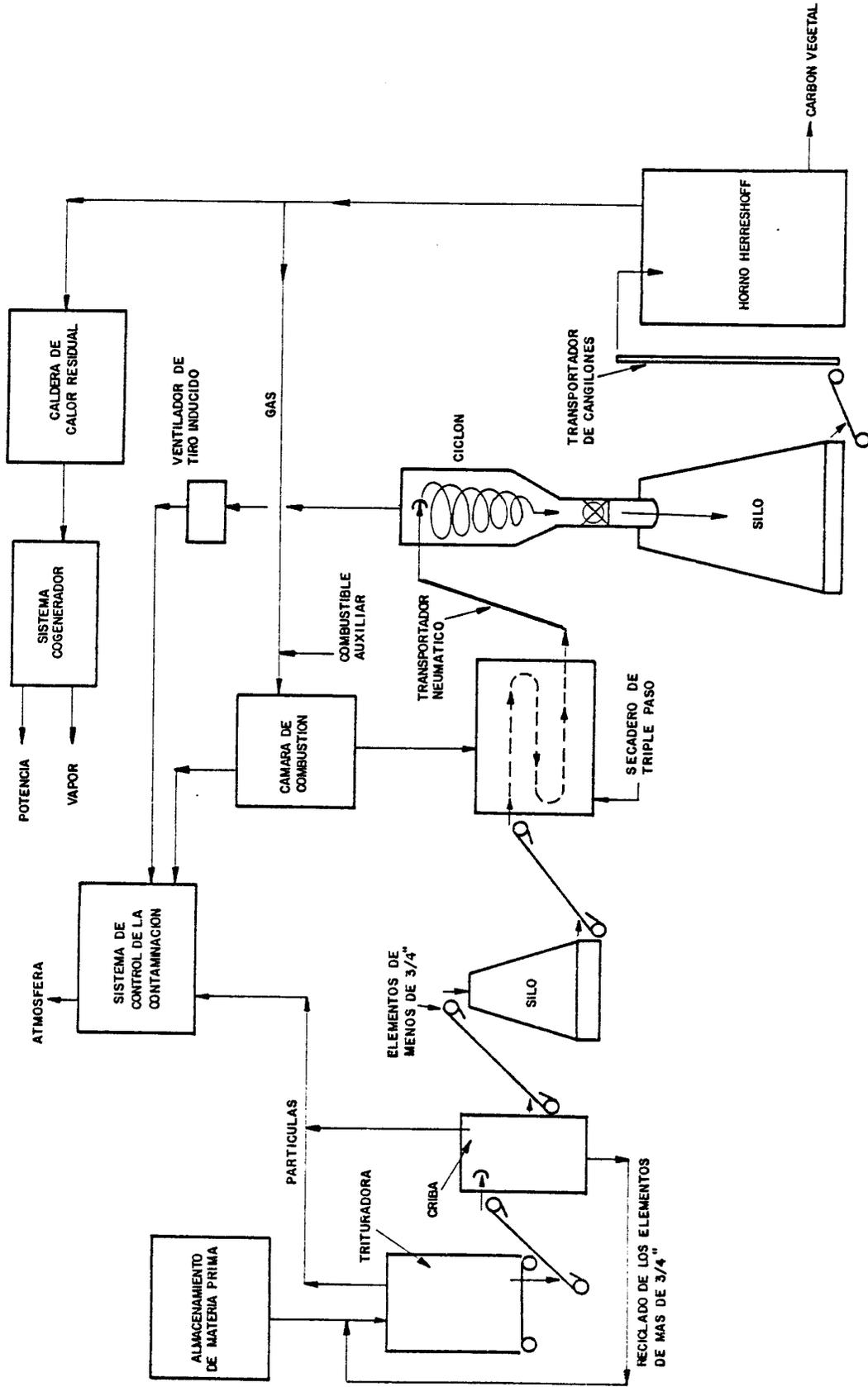
REFERENCIA. " NICHOLS HERRESHOFF MULTIPLE HEARTH FURNACES "

DIAGRAMAS DE FLUJO DEL GAS Y DE LA MATERIA PRIMA EN EL HORNO  
"NICHOLS - HERRESHOFF"



\* PASO DE AIRE CONTROLADO PARA  
REGULAR LA TEMPERATURA

ESQUEMA PARA PRODUCIR CARBON VEGETAL DE FORMA CONTINUA EN "UN HORNO" NICHOLS-HERRESHOFF"



REFERENCIA " CHARCOAL PRODUCTION FROM BIOMASS RESIDUE"

rededor de 30-85 gr/cm<sup>3</sup>. Su combustión mediante incineración ha sido la única forma típica de tratarlos; sin embargo, el gas resultante es bastante contaminante, pues contiene unos 0,55-0,60 gr/cm<sup>3</sup>, por lo que se ha tenido en tiempos pasados la creciente oposición de los grupos ecologistas.

La propuesta de depurar el gas, con vistas a transportarlo por tuberías o a utilizarlo en turbinas para generar energía eléctrica, ha demostrado la inviabilidad económica del proceso de carbonización de la madera.

Para resolver este problema se han presentado dos soluciones, que todavía no se han ensayado con resultados aceptables:

- . Quemar el gas en una caldera que emplee combustible gaseoso de bajo poder calorífico y donde suplementariamente se puedan utilizar los compuestos leñosos.
- . Dirigir los gases de la combustión desde las cámaras de incineración a una caldera de calor residual, provista de un dispositivo anticontaminante.

Esta segunda opción puede necesitar un gas auxiliar o un crudo. Los gases de combustión de cualquiera de las calderas se pueden depurar mediante un ciclón múltiple o con una gran diversidad de equipos de lavado y purificación.

Cuando los gases de la combustión se conducen directamente desde el incinerador, se destruirá cualquier dispositivo metálico que se haya instalado para controlar la contaminación y que no se haya revestido de un material refractario, conforme vayan alcanzando temperaturas comprendidas entre 871 y 1.093°C.

Esta dificultad se solucionó utilizando un sistema de refrigeración por agua, ante la entrada de las chimeneas del incinerador, quien enfría el gas a 204°C antes de entrar en el equipo anticontaminante.

El análisis económico del proceso de combustión de la caldera pone de manifiesto que, en una planta con un factor de utilización del 70% como mínimo, los sistemas adecuados para el control de la contaminación atmosférica y la planta de combustión del gas residual son costes eficaces. Para una instalación de 17 Mw y un desembolso en 10 años podría suponer una inversión del orden de 0,05 \$/Kwh.

El rendimiento en carbón de la transformación oscila al rededor del 25%, sobre materia seca.

Conviene también señalar que se necesitan grandes y continuas cantidades de materia prima. Este hecho impide el que se instalen en zonas donde no existan muchos residuos y recursos leñosos. Asimismo, se dificulta la sustitución de los hornos discontinuos por los continuos, al instalarse la mayor parte de aquéllos en zonas aisladas o solitarias.

Entre las principales ventajas de este tipo de horno destacan las siguientes:

- . Escasas necesidades de mano de obra, con un solo hombre por turno.
- . Reducción de la influencia manual o artesanal al mínimo.

- . Gran uniformidad y calidad en la producción de carbón vegetal, con control en los contenidos de carbono fijo y elementos volátiles.
- . Mínimos gastos de mantenimiento.
- . A los operarios se les puede preparar rápida y eficientemente, adquiriendo un alto grado de aprovechamiento.
- . Escasas necesidades de combustible exterior, a medida que se reciclan los gases que se producen en el proceso de descomposición térmica de la madera.
- . Utilización de una amplia gama de residuos procedentes de la industria de la madera, tales como serrín, astillas, cáscaras, cortezas, etc.

Algunos de sus inconvenientes son:

- . La producción continua de carbón requiere grandes inversiones que no pueden realizar muchas compañías privadas.
- . Posee una compleja instrumentación, por lo que se necesita una mano de obra cualificada.
- . No se ha encontrado solución para tratar la alta concentración de partículas de carbón que contienen los gases que se desprenden en la carbonización de los distintos elementos constituyentes de la biomasa.
- . Requiere una gran cantidad de energía eléctrica, lo que plantea graves problemas en muchas instalaciones rurales y empresas privadas.

## 8.- CARBON VEGETAL

### 8.1.- INTRODUCCION

El carbón vegetal es el segundo combustible más antiguo que utilizó el ser humano, después de la leña, de la que proce  
de.

Para comprender los numerosos aspectos y singularidades de este producto, se debe tener un claro conocimiento sobre lo que realmente es, así como de sus especiales propiedades que le otorgan mayores ventajas al compararlo con la madera. Presenta importantes virtudes respecto a los compuestos leñosos en las áreas del transporte, almacenamiento, comercio, eficiencia de la combustión, contaminación y en aplicaciones específicas dentro de ciertos campos, como los de la metalurgia y química, res  
pectivamente.

Se define como el residuo sólido que queda, cuando se so  
meten los distintos materiales leñosos, a un proceso de piróli  
sis, bajo unas determinadas condiciones y en un espacio cerrado, horno o retorta.

En el programa energético de cualquier país se deben te  
ner en cuenta los tres aspectos siguientes:

- . Volumen y características de los recursos de materia prima existentes, así como su futuro desarrollo y evolución.
- . Consumos actuales de leña y carbón vegetal y estimación de su probable evolución.
- . La distribución del suministro actual, junto con las posibilidades de racionalizarlo y mejorarlo.

Por regla general, es muy útil empezar por preparar diversos planes sobre el consumo actual y futuro, según los datos de población y de las necesidades por persona de que se dispone. De esta manera se puede reconstruir con bastante rapidez la velocidad a la que se debe recolectar la leña y efectuar las repoblaciones forestales pertinentes. Conociendo la distribución de la masa forestal y las principales zonas de consumo de un país, se puede trazar con gran facilidad la red de distribución principal, así como las diferentes cantidades que tienen que llegar a los distintos mercados.

El consumo total de leña y carbón vegetal no se puede estimar sobre una base anual, por lo que se deben construir tablas que muestren las necesidades de mantenimiento, en función del incremento de población que se espera alcanzar en los próximos veinte años. Este período suele ser lo bastante largo como para que la estabilización de la producción/consumo tenga el efecto deseado.

Si se introducen en esas tablas los rendimientos de la leña recolectada por hectárea, de las diferentes zonas de producción, se podrá cuantificar la masa forestal que habrá que repoblar cada año.

En los países con pequeña densidad de población y grandes zonas de bosques, las perspectivas de producción de carbón son buenas. La superficie forestal que se necesite será suficiente, debiéndose dedicar, siempre que sea posible, adecuadas extensiones para producir la cantidad de carbón que se requiera constantemente, aun cuando los bosques puedan tener un crecimiento anual bajo, ante cualquier sistema viable de administración. No obstante, se tiene que considerar estable el crecimiento de la población, pues de lo contrario, los recursos forestales, aunque sean abundantes, no podrán satisfacer la demanda futura.

En los casos de los países con mayor densidad de población y menor riqueza forestal, la superficie de bosques de que disponen no es suficiente para garantizar las necesidades futuras de leña y carbón vegetal, a menos que tomen las medidas oportunas para el control de la situación.

Los planes que se establezcan para superar estos problemas exigen un gran conocimiento y experiencia en el tema, debiéndose tener en cuenta todos aquellos factores que afecten a las situaciones técnica y social.

## 8.2.- PRODUCCION

La rentabilidad de una fábrica de carbón vegetal depende tanto de la cantidad como de la calidad del producto que elabora.

La calidad se define, por regla general, por su dureza, fragilidad y densidad. Algunas veces se considera su composición química, incluyendo sus contenidos en carbono fijo, volátiles, humedad y cenizas.

El método más corriente para determinar la producción es dividir el peso del carbón obtenido por el de la materia prima desecada que se utiliza. De esta manera se consigue eliminar la variable contenido de humedad. Comúnmente, la humedad del carbón producido, una vez enfriado por convección y radiación natural y descargado en una atmósfera seca (con un 3-4% de agua), no se tiene en cuenta a la hora de hacer los cálculos. Sin embargo, si el carbón se produce y enfría en una atmósfera muy húmeda, habrá que considerar el contenido acuoso al efectuar los cálculos.

No siempre es posible pesar la madera antes de cargar el reactor y de que se inicie el proceso de carbonización. Por otra parte, en muchas ocasiones la materia prima se compra por volumen. Entonces, la producción se ha de determinar en función del peso que se estime por cuerda o metro cúbico de productos leñosos.

A continuación se describen algunas de las variables que influyen en dicha producción.

#### 8.2.1.- Contenido de humedad

Antes de que se inicie el proceso de carbonización se ha de evaporar el contenido de humedad de la materia prima. El calor que se necesita para este menester se suministra merced al proceso de combustión de la leña que tiene lugar en la pila de carbonización.

En unos experimentos realizados en unos hornos de 10 m<sup>3</sup> de capacidad, con madera dura sazónada y una humedad del 32%, se obtuvo un 30% de carbón. Por el contrario, sólo se consiguió un 27% con una carga parecida con una humedad del 44%, y un 25% con otra semejante y un 47% de humedad.

En la Figura 54 se indica la relación existente entre la producción de carbón vegetal y el contenido de humedad de la materia prima, a través de 25 ensayos efectuados.

#### 8.2.2.- Especie de madera utilizada

La producción de carbón de un horno es directamente proporcional a la densidad de la materia utilizada.

En las Tablas 15 y 16 se señalan los distintos pesos específicos de diferentes maderas desecadas, así como la relación entre el volumen de madera y la producción de carbón obtenida, a partir de dichas maderas.

#### 8.2.3.- Tamaño del horno

No se tienen resultados experimentales que indiquen una determinada relación entre el tamaño del horno y la producción de carbón vegetal elaborada. La producción de un horno de 11 m<sup>3</sup> es inferior a la de otro de 25 m<sup>3</sup>, al admitir los hornos de mayor capacidad trozos de madera más grandes, siendo a su vez más fácil de carbonizar satisfactoriamente.

Para idénticas materias primas, los métodos, temperaturas y tiempos de carbonización, son prácticamente iguales en los diferentes tipos y tamaños de hornos.

#### 8.2.4.- Condiciones atmosféricas

La producción de carbón vegetal depende mucho de los cambios de temperatura estacionales. Este hecho se acusa en gran medida en los hornos metálicos, donde las pérdidas calóricas - que tienen lugar en los meses de invierno son muy altas, con

PRODUCCIONES DE CARBON VEGETAL A PARTIR DE DIVERSAS ESPECIES DE  
MADERA DE DISTINTOS CONTENIDOS DE HUMEDAD SEGUN 25 ENSAYOS  
REALIZADOS EN UN HORNO "MARK-V" EN NAKAWA, UGANDA ENTRE EL  
27-1-70 Y EL 12-8-70

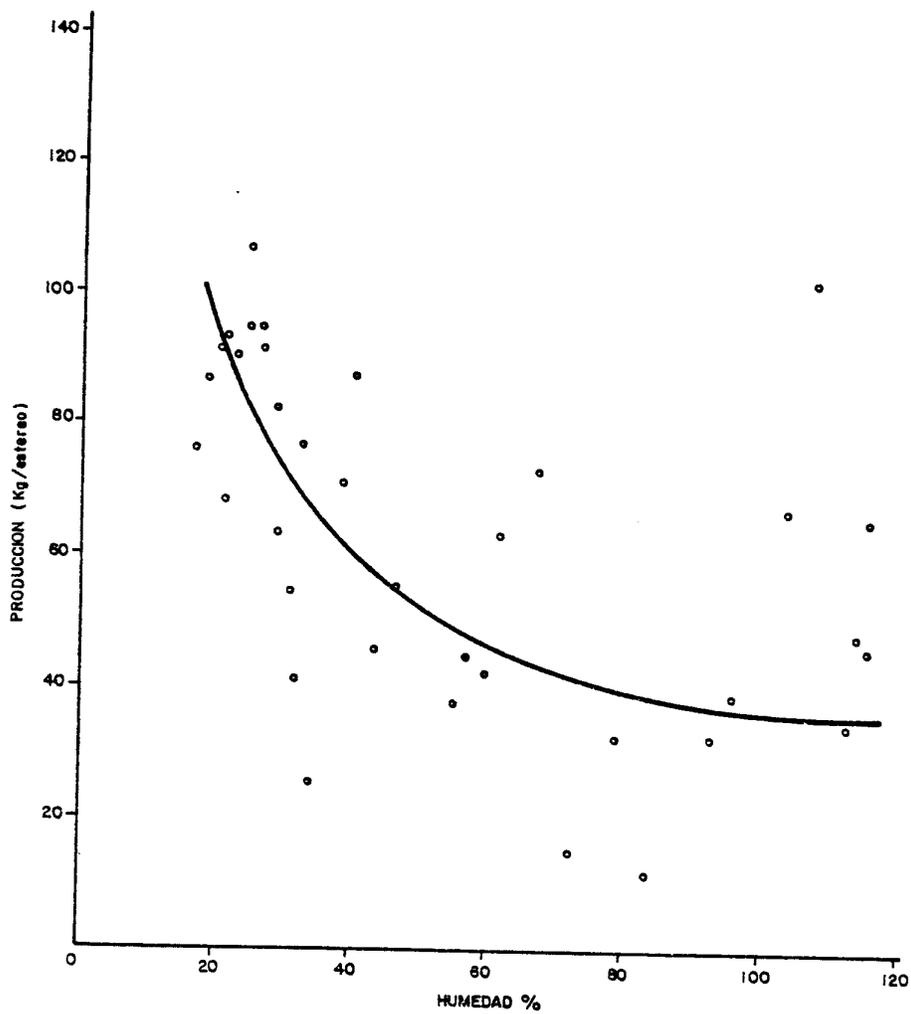


TABLA N° 15.- Peso de diversas especies secadas al horno

<u>Especies</u>	<u>Peso seco al horno (kg/m<sup>3</sup>)</u>
Aliso rojo (1) .....	432
Fresno blanco (2) .....	640
Alamo temblón (1) .....	416
Tilo americano (1) .....	400
Haya (3) .....	672
Abedul (3) .....	656
Alamo americano (1) .....	432
Abeto Douglas o (Pino del Pacífico) (2) .....	512
Abeto (1) .....	432
Nogal americano (3) .....	672-832
Enebro (2) .....	544
Pino loblolly (2) .....	544
Pino alerce (1) .....	432
Pino de hoja larga (4,2) .....	624
Madroño (3) .....	688
Arce rojo (2) .....	544
Arce dulce (3) .....	688
Mezquite (3) .....	800-961
Roble (3) .....	672-832
Pino gigante de California (1) .....	416
Pino de hoja corta (2) .....	528
Pino de hoja corta y laciniada (4,2) .....	656
Ocozol (2) .....	544
Nisa (2) .....	544
Nogal (2) .....	560

---

(1) Grupo de especies ligeras

(2) Grupo de especies semipesadas

(3) Grupo de especies pesadas

(4) Especies con un contenido medio en resina alrededor del 6-8%

TABLA N° 16.- Relación para diversas especies entre el volumen de madera y la producción de carbón vegetal (\*)

Especies	1.840,8 dm <sup>3</sup> de madera, cáscaras y cortezas por cuerda		2.407,2 dm <sup>3</sup> de madera, cáscaras y cortezas por cuerda	
	Peso seco al horno por cuerda kg	Producción de carbón vegetal kg	Peso seco al horno por cuerda kg	Producción de carbón vegetal kg
Aliso rojo	796	254	1.041	333
Fresno blanco	1.179	377	1.542	493
Alamo temblón	812	260	1.002	320
Tilo americano	734	236	964	308
Haya	1.238	396	1.619	518
Abedul	1.209	387	1.580	505
Alamo americano	796	254	1.041	333
Abeto Douglas	943	302	1.234	394
Abeto	796	254	1.041	333
Nogal americano	1.238-1.533	396 - 490	1.619-2.005	518 - 641
Enebro	1.002	320	1.311	419
Pino Loblolly	1.002	320	1.311	419
Pino alerce	796	254	1.041	333
Pino de hoja larga	1.150	372	1.503	481
Madroño	1.268	405	1.658	530
Arce rojo	1.002	320	1.311	419
Arce dulce	1.268	405	1.658	530
Mezquite	1.474-1.769	471-566	1.928-2.313	617-740
Roble	1.238-1.533	396-490	1.619-2.005	518-641
Pino gigante de California	812	260	1.002	320
Pino de hoja corta	973	311	1.272	407
Pino de hoja corta y laciniada	1.209	387	1.580	505
Ocozotl	1.002	320	1.311	419
Nisa	1.002	320	1.311	419
Nogal negro	1.032	330	1.349	432

(\*) Se ha supuesto un rendimiento del 32% para la producción de carbón vegetal

la consiguiente disminución de la producción obtenida. Mientras que en diez ensayos de carbonización llevados a cabo durante los meses más fríos del año, se obtuvo un rendimiento en carbón del 27,6%, en los mismos ensayos efectuados en los meses más calurosos del año y en análogas condiciones de funcionamiento, es decir con el mismo contenido de humedad de la materia prima e idénticas temperaturas y duración del proceso se alcanzó un 28,7%.

### 8.3.- ALMACENAMIENTO

La resistencia mecánica que tiene el carbón vegetal es muy reducida.

Como su demanda es por temporadas, conviene almacenarlo para su posterior venta y expedición. Esto permite a las plantas de fabricación de carbón funcionar durante todo el año.

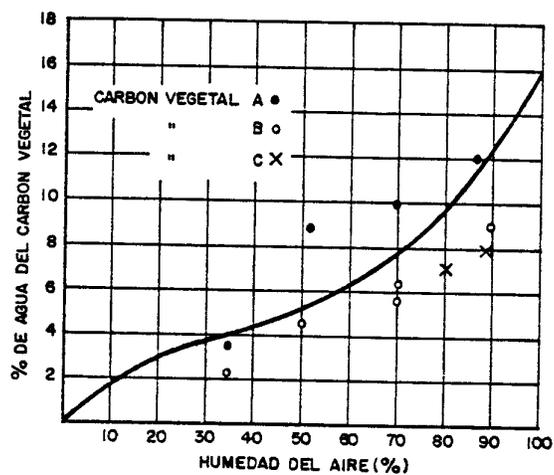
El carbón absorbe fácilmente la humedad del aire, apelmazándose con su propio polvo. Por ello, su apilado, una vez envasado, se realiza en estanterías de madera.

En la Figura 55 se indica la relación que existe entre el contenido acuoso del carbón y la humedad relativa del aire.

Aunque adecuadamente enfrñado es muy estable, puede ser muy peligroso cuando se manipula de forma incorrecta.

Su almacenamiento no se debe efectuar de modo alguno en lugares donde haya peligro de incendio. Por esta razón, es una buena práctica el cribar los finos o menudos, antes de almacenarlo durante cortos o largos períodos de tiempo.

GRAFICO QUE INDICA LA VARIACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CARBON VEGETAL EN FUNCION DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE



Aun cuando la combustión espontánea puede tener lugar - tanto con el carbón almacenado como con el que se enfría rápidamente al pulverizarlo con agua, el peligro real se presenta - al descuidar el "producto caliente", que no es otra cosa que la madera que no se ha carbonizado y enfriado completamente, y que continua ardiendo sin llama durante el envasado. Se aconseja - por lo tanto situar el carbón recién producido en lugares de abundante y buena ventilación, durante un período no inferior a un día, antes de proceder a envasarlo.

También se ha observado que la combustión espontánea es más frecuente cuando el carbón se envasa herméticamente que cuando está sin envasar.

Los finos son muy peligrosos y difíciles de manipular. Se deben disponer en distintos lugares de donde se coloquen los trozos o fragmentos. Antes de envasarlos, conviene airearlos y ventilarlos por espacio no inferior a cinco días, protegiéndolos de la lluvia tanto como de las altas humedades.

#### 8.4.- MERCADO

Desde hace más de cuatro milenios, el hombre utilizó el carbón vegetal como agente reductor en la fundición de los minerales de hierro. Asimismo, descubrió que era un excelente combustible para la preparación de alimentos, al quemarse sin producir humo. Por tal motivo se empleó desde entonces en el arte culinario, tanto en las cavernas como plazas públicas, patios de las casas, playas y campings.

A mitad del Siglo XIX, con la aparición de la industria química sofisticada, se abrieron nuevos e inesperados campos para los fabricantes de carbón vegetal.

En la actualidad, se distinguen dos importantes tipos de mercado: el de los consumidores o doméstico, y el que proporciona la industria.

No obstante, conviene señalar que hoy en día en que se dispone de información y estadísticas comerciales para una amplia multitud de productos, apenas se tienen datos oficiales relativos al carbón vegetal.

Las predicciones se basan en unos datos con muchas limitaciones, aunque se pueden tomar con cierta confianza y seguridad, para constituir algo más que una mera o simple indicación.

#### 8.4.1.- Mercado consumidor uso doméstico

Mientras que al principio de los años setenta un 65%, - aproximadamente, de este mercado se destinó a la preparación de alimentos, al final de la década, solo se utilizó en otros menesteres del 10 al 15%.

En algunos países la realización de barbacoas coincidió con la era espacial y con la aparición del estilo de vida contemporáneo.

En este mercado el carbón vegetal se presenta en dos formas: fragmentos y briquetas.

El precio es, con mucho, el factor más importante a la hora de elegir una u otra forma. En Estados Unidos, durante el año 1979, los precios de los fragmentos fueron bastante superiores a los de las briquetas (340\$ frente a 290\$ la tonelada), - mientras que en Europa tal diferencia no estuvo tan clara.

El consumo del carbón vegetal que se emplea en la preparación de alimentos está sujeto a la demanda estacional.

Las fechas de utilización del carbón pueden variar mucho de un país a otro, según las condiciones climáticas y situación geográfica de cada uno de ellos.

Para los futuros fabricantes de carbón vegetal es fundamental conocer los posibles mercados y la actitud de los consumidores y posibles clientes, antes de instalar una planta. En caso contrario se pueden ver obligados a interrumpir la producción durante meses, o a invertir grandes sumas de dinero en medios de almacenamiento.

Los resultados de las predicciones para este tipo de mercado son bastante difíciles de obtener. La briqueta es la forma de preparación y presentación de más futuro, como consecuencia de su combustión durante mayor período de tiempo. En los Estados Unidos las ventas de briquetas se estiman en un 85% del volumen de este mercado. En Europa, en el año 1979, tan solo representaron un 50% del total, lo que supuso un incremento del 100% durante los tres últimos años.

Después del éxito que se alcanzó con el carbón vegetal , comprimido o aglomerado, se efectuaron diversos ensayos para proporcionar al cliente un "combustible adecuado". En ellos se revistieron las briquetas con una envoltura de cartón parafinado de fácil ignición. Todos estos sucesos no causaron gran impacto en el mercado, habiéndose realizado únicamente por unos cuantos productores.

El alto precio de los carbones vegetales de pronta ignición es el principal factor que limita o restringe su mercado.

Los precios de los fragmentos y briquetas están estrechamente relacionados con la capacidad de producción y disponibilidad de materia prima. Por consiguiente, no varían mucho dentro de los diferentes países de la Comunidad Económica Europea.

Al principio de la década de los setenta, cuando la crisis energética no había llegado a los países industrializados, el renacimiento del empleo del carbón vegetal desde el punto de vista culinario, se consideró como un fenómeno de la postguerra. En general, se creyó que el rumbo iba encaminado hacia la preparación de alimentos mediante el empleo de gas. Sin embargo basó una década de experiencia para demostrar que esas predicciones no eran ciertas, quedando anticuadas.

Con las vueltas que tuvo este mercado durante los diez últimos años, no parece que se vaya a producir una caída cercana.

En la Tabla 17 se refleja su volumen correspondiente al año 1979. En un futuro más o menos cercano se cree que ejercerán una gran influencia en él los siguientes aspectos positivos y negativos.

#### Aspectos positivos del mercado

- . Los desembolsos para la preparación de alimentos son muy reducidos al compararlos con los ingresos reales disponibles.
- . El consumo de productos cárnicos y aves, continúa desarrollándose en gran medida.

TABLE N° 17.- Volumen del mercado consumidor en el año 1979

Pafs	Volumen de ventas (Mt)	Crecimiento estimado para el año 1980 (%)	Relación fragmentos/briquetas	Precio de la tonelada (\$)
U.S.A.	1,10	9-11	2 : 98	240-280
Europa	0,19	-	40 : 60	-
C.E.E.	0,12	12	-	380-620
Otros	0,07	7	-	290-320

- . El creciente y continuo fomento de las barbacoas y comidas al aire libre con el empleo de carbón vegetal.
- . El movimiento de la población del centro de la ciudad a zonas periféricas, al igual que el alojamiento familiar de tipo individual, uno de los sectores de más rápido crecimiento en los países industrializados.

#### Aspectos negativos del mercado

- . La idea generalizada entre el público de que el consumo de excesivos productos cárnicos es malo.
- . La estabilización del crecimiento de la población, que puede incluso llegar a disminuir en los países desarrollados.
- . Las condiciones meteorológicas adversas durante los fines de semana, que pueden suprimir virtualmente las ventas inmediatas de carbón vegetal.

#### Especificaciones para la venta

Por lo que respecta a sus especificaciones, los gobiernos no han establecido hasta ahora las regulaciones de venta de carbón vegetal, como combustible de uso doméstico. El proveedor tiene que justificar que su producto no es peligroso para la salud, al entrar en contacto directo con los alimentos los humos o gases que desprende cuando se quema.

Aunque no exista una reglamentación detallada, se debe tener cuidado en el caso de utilizar residuos agrícolas como fuente de materia prima. Se ha observado que durante el proceso de car

bonización se acumulan metales pesados en el carbón producido, pudiendo constituir un verdadero peligro cuando se evaporan después en forma de óxidos. Estos metales se incorporan a dichos residuos por distintos caminos, aunque muy probablemente como consecuencia de las pulverizaciones y aplicaciones que se realizan con insecticidas y pesticidas a los diferentes cultivos.

Los carbones que se obtienen de maderas muy densas o con un bajo contenido de elementos volátiles se encienden con dificultad, siendo rechazados por el mercado.

La Tabla 18 refleja los resultados de las encuestas realizadas por la Compañía de la República Federal Alemana, Carbon International, Ltd., a treinta mayoristas.

### Presentación

Como en cualquier otro tipo de mercado, el envasado es un factor de gran importancia a la hora de llamar la atención de los consumidores. Puesto que se compran pequeñas cantidades, es por lo que se diseñan envases especiales. En los últimos cinco años, las bolsas de 3, 4 y 5 kg se han hecho populares.

La Tabla 19 muestra los resultados de una encuesta realizada recientemente por Carbon International, Ltd., sobre diferentes tipos de envase.

TABLA N° 18.- Exigencias para los fragmentos y briquetas de carbón vegetal desde el punto de vista del mercado consumidor

Características exigidas	Fragmentos	Briquetas
- Carbono fijo	75 - 82%	75 - 82%
- Cenizas	4 - 8 %	8 - 12%
- Lubricantes	-	8 - 25%
- Humedad	Máxima: 6%	Máxima: 6%
- Aglomerantes (solo en el caso de briquetas)	-	Máxima: 8%
- Tamaño	Mínimo: 15 mm Máximo: 30 mm	Mínimo: 20 mm Máximo: -
- Poder calorífico (Kcal/kg)	Aprox.: 6.200	5.000 - 5.500
- Forma	Irregular	De almohada
- Tiempo que ha de transcurrir después de la ignición para su empleo en la preparación de alimentos	10-15 minutos	15-25 minutos
- Duración de la combustión	-	Tres veces superior para la misma cantidad de carbón

TABLA N° 19.- Datos comparativos de una encuesta realizada sobre el tamaño de los envases

	TAMAÑO	1972	1975	1979
U.S.A.	5 lbs (2,25 kg)	9,8 %	7,6 %	7,0 %
	10 lbs (4,50 kg)	44,4 %	56,8 %	60,3 %
	20 lbs (9,00 kg)	44,9 %	33,8 %	30,1 %
	Otros	0,9 %	1,8 %	2,6 %
	Total	100,0 %	100,0 %	100,0 %
EUROPA	3 kg	88,0 %	87,0 %	87,0 %
	5 kg	7,0 %	10,0 %	11,0 %
	Otros	5,0 %	3,0 %	2,0 %
	Total	100,0 %	100,0 %	100,0 %

#### 8.4.2.- Mercado industrial

Antes de emplear el carbón vegetal como combustible de uso doméstico en la preparación de alimentos, se utilizó únicamente como producto industrial, especialmente en los inicios de la era metalúrgica.

Con la diversificación de la industria química y el número creciente de legislaciones relativas al control del medio ambiente, se han multiplicado sus aplicaciones desde el punto de vista industrial. La Tabla 20 muestra una selección de las más importantes hoy en día.

Mientras que en el mercado consumidor para uso doméstico el carbón vegetal no tiene ningún tipo de competencia, en la casi totalidad de las aplicaciones industriales se puede susti-

TABLA N° 20.- Mercado industrial del carbón vegetal

<ul style="list-style-type: none"> <li>. Fragmentos</li> <li>. Menudos</li> <li>. Polvo</li> </ul>
--

<u>Industria química</u>	<u>Industria del hierro y del acero (Metalurgia)</u>	<u>Industria del carbón activado</u>	<u>Generador de gas</u>	<u>Aplicaciones diversas</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bisulfuro de carbono</li> <li>- Cianuro sódico</li> <li>- Carburros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altos hornos</li> <li>- Ferrosilicio</li> <li>- Endurecimiento metales</li> <li>- Ind. metales no ferrosos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Decloración</li> <li>- Depuración de aguas</li> <li>- Purificación de gases</li> <li>- Tratamiento aguas residuales</li> <li>- Recuperación de disolventes</li> <li>- Columnas de destilación</li> <li>- Industria farmacéutica</li> <li>- Industria alimentaria</li> <li>- Catalizador</li> <li>- Tiendas animales domésticos</li> <li>- Filtros de las casas</li> <li>- Baterías eléctricas</li> <li>- Filtros de cigarros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para los coches</li> <li>- Para los motores estacionarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aditivo en alimentación animal</li> <li>- Prevención de heladas en los huertos</li> <li>- Calefacción de los almacenes</li> <li>- Curado de las frutas</li> <li>- Industria mágica</li> <li>- Fuegos artificiales</li> <li>- Pólvora negra</li> </ul>

tuir por el carbón mineral, coque y lignito. Las ventajas de utilizarlo dependen de las seis importantes propiedades siguientes:

- . Bajo contenido de azufre
- . Alta relación carbón/cenizas
- . Impurezas inorgánicas relativamente escasas y reactivas
- . Estructura porosa con una gran superficie específica
- . Buen poder reductor
- . Su combustión apenas produce humo

Al principio de la década de los sesenta la panorámica de su aplicación industrial se mostró menos favorable, particularmente desde el punto de vista económico. No obstante, las producciones a bajo coste neutralizaron esta tendencia. Actualmente, muchos de los proveedores se enfrentan de nuevo a otro gran problema, merced a los costes excesivamente altos de la materia prima como consecuencia del déficit o escasez de la misma en sus propios países.

Por regla general, no se conocen bien las cantidades que se consumieron industrialmente. Recientes informes europeos indican que cerca del 60% de la producción se destina a usos industriales, principalmente a las industrias metalúrgicas y del carbón activado, respectivamente. Estas cifras ascienden a 120.000 t/año.

Hasta 1960, se utilizó mucho en la industria química, para la obtención de bisulfuro de carbono y cianuro sódico. Aunque estos mercados han disminuido, fueron lo suficientemente importantes como para aumentar su demanda como agente reductor - (principalmente en la industria metalúrgica) y absorbente.

En los Estados Unidos, en el año 1960 se consumió con fines industriales una cifra próxima a las 150.000 t. Este valor ha disminuido con posterioridad, al haberse sustituido por considerables cantidades de lignito y algo de antracita y coque.

Aunque la extensión y predicciones de este mercado no se han determinado aun sobre la base de inventarios nacionales, - existe la creencia unísona entre sus proveedores, de que las industrias metalúrgicas y del carbón activado proporcionarán sólidas realidades para su nuevo crecimiento hasta finales de la presente década.

### Precios

Una mayor calidad en el carbón producido se reflejará en unos precios de mercado más altos. Normalmente no se conocen estos precios, variando mucho las cotizaciones según las diferentes especificaciones que prescriban los clientes.

En Estados Unidos, en la primavera de 1980, el precio de la tonelada de carbón vegetal, en forma de fragmentos y con fines industriales, osciló entre 370 y 550 \$, mientras que en el mercado europeo varió entre 400 y 680\$.

Estas grandes fluctuaciones reflejan otra vez la grave situación que existe en Europa respecto al abastecimiento de materia prima, si bien este hecho hace que el mercado europeo sea

más atractivo para los países exportadores.

La industria química y los productores de carbón activado prefieren el carbón en forma de fragmentos, debido a las exigencias de sus diferentes procesos. Las partículas menudas o finas son más reactivas, aunque las pérdidas por emisiones producen finos, producto no deseable en modo alguno. Por consiguiente el polvo y los finos se emplean exclusivamente en aquellos procesos donde se realiza una compactación o aglomeración antes de incorporarlos.

También hay que tener en cuenta otras muchas consideraciones, como por ejemplo, el contenido en cenizas, que puede ser un factor de gran importancia.

Puesto que durante el proceso de carbonización, todas las sustancias incombustibles se acumulan normalmente en los finos y polvo de carbón, el contenido en cenizas de estas fracciones es muy superior cuando se le compara con el de los fragmentos.

### Especificaciones

Cada aplicación tiene sus propias y estrictas especificaciones, que se deben examinar para determinar tanto las exigencias del proceso actual de producción como las prescripciones futuras, en virtud de posibles alteraciones en la tecnología del mismo.

Esta circunstancia se dejó sentir en tiempos pasados, dando lugar a cambios en las técnicas de producción o a la paralización de las plantas que no las observaron detenidamente.

Sus cotizaciones llevan adjuntas, por regla general, las

características más corrientes, como los contenidos de carbono fijo, cenizas, volátiles y humedad, densidad, peso específico y análisis del tamizado o cribado.

El contenido en carbono fijo y volátiles se determina según las normas ASTM o DIN, que se aplican al carbón mineral y lignito.

El término volátiles se refiere a los subproductos del proceso de carbonización que permanecen en el carbón vegetal, - una vez finalizado el mismo, entre los que se incluyen el alcohol metílico, el éter, la acetona, el alquitrán, etc. Las proporciones de estos componentes dentro del total de volátiles no se solicita generalmente.

En las Tablas 21 y 22 se indican las especificaciones generales de los fragmentos y finos de carbón vegetal, respectivamente.

### Transporte

El carbón vegetal recién obtenido no se puede transportar de forma inmediata, por la tendencia que tiene a absorber oxígeno, encendiéndose con gran frecuencia. Necesita un período de curado o reposo, de razonable duración. Por tal motivo no se suelen aceptar partidas sin una certificación que acredite un tiempo de reposo suficiente.

Por último, se puede afirmar que los finos, el polvo y el carbón vegetal propiamente dicho, no caen dentro de la categoría de productos marítimos autóinflamables, aunque se registran o inscriben como tales. A pesar de que no necesitan ningún permiso de transporte especial, no se pueden transportar por -

barco junto con otros compuestos inflamables, como los productos de la madera, etc.

TABLA N° 21.- Especificaciones genéricas para los fragmentos de carbón vegetal con fines industriales

- Carbono fijo (%) .....	78 - 85
- Volátiles (%) .....	10 - 15
- Cenizas (%) .....	4 - 7
- Densidad .....	0,215-0,400
- Peso específico (kg/m <sup>3</sup> ) .....	180 - 320
- Humedad (%) .....	3 - 5
- Tamizado .....	En caso de solicitarlo

TABLA N° 22.- Especificaciones genéricas para los finos o menudos de carbón vegetal

- Carbono fijo (%) .....	82 - 92
- Volátiles (%) .....	Sin datos
- Cenizas (%) .....	Hasta el 18
- Densidad .....	Sin datos
- Peso específico (kg/m <sup>3</sup> ) .....	Mínimo de 150
- Humedad (%) .....	Hasta el 12
- Tamizado .....	En caso de solicitarlo

Los detalles y particularidades de sus principales aplicaciones industriales se describen a continuación.

#### 8.4.2.1.- En la Industria Metalúrgica

El carbón vegetal se empleó universalmente como agente reductor desde que el hombre empezó a manipular el hierro. Durante el Siglo XVIII se introdujo el coque como alternativa. En

los comienzos del desarrollo de esta industria ya existían pequeños altos hornos y otras clases de hornos de reducción.

Actualmente, la industria de fundición de hierro que lo emplea aun perdura en un cierto número de países, continuando su expansión y modernización. Sin embargo, el centro se alejó de los países industrializados. Hoy día es Brasil el más importante en el empleo del carbón vegetal, dentro de la industria de lingotes de hierro.

También existen plantas que lo utilizan en Australia, Argentina, Paragúay y el Reino Unido.

El consumo de carbón vegetal en los altos hornos de estos países, durante 1979, fue el siguiente:

	<u>Mt</u>
- Brasil .....	3,50
- Australia .....	0,30
- <u>Parag</u> úay .....	0,11
- Argentina .....	0,08
- Reino Unido ....	0,08

Su aplicación en la industria del hierro es una buena solución, por muchas razones, entre las que destacan:

- . La escasez de combustibles fósiles convencionales.
- . Las abundantes existencias de minerales de hierro de una gran riqueza y pureza.

- . Las unidades de producción de pequeño y mediano tamaño, que no pueden competir con las de mayor escala de la industria del hierro y del acero.
- . Los requisitos especiales para las excelentes propiedades físicas y químicas de los lingotes de hierro.
- . La función complementaria general para los programas de producción de aceros normales procedentes de plantas que utilizan coque.

La industria del hierro y del acero emplea fragmentos de un determinado tamaño específico.

Aun cuando el carbón vegetal que se emplea en los hornos de fundición se ha desplazado a otras partes del mundo, la fundición de metales no ferrosos y los procesos de endurecimiento de la industria del acero, mantienen su mercado en los países industrializados.

Los finos seleccionados se mezclan con hidróxidos alcalinos y se granulan, dando lugar a un producto de precio elevado que realiza de forma excelente la tarea de endurecer los metales no ferrosos y las aleaciones.

De un modo genérico se puede afirmar que el carbón vegetal actúa de la misma manera que el coque en los hornos de fundición.

### Especificaciones

Como los hornos se diseñan de distintas formas, adaptándose se a las características de cada combustible, éstos tienen que cumplir estrictas especificaciones.

No es posible considerar las de todas las variedades de la industria metalúrgica, por lo que los productores de acero establecen sus propios requisitos de calidad. Únicamente se pueden dar datos globales, como son los que se indican en la Tabla 23.

La industria metalúrgica también establece algunas consideraciones respecto a la composición de las cenizas y volátiles.

Los datos límites se establecen para los contenidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , álcalis y para la relación  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ .

La composición de los volátiles es de una gran importancia al intervenir también en los procesos de reducción de los óxidos de hierro. Mejoran hasta cierto grado el balance de carbono del proceso de los hornos de fundición.

Los valores para el caso de los finos y polvo de carbón vegetal son similares a los expuestos en la Tabla 23, variando únicamente el apartado correspondiente al tamaño.

Las propiedades fuertemente reductoras del carbón vegetal son comparables a las del coque. Cuando se mezcla con minerales que contienen óxidos y sulfuros metálicos y se calienta, su carbono fijo se combina fácilmente con el oxígeno y azufre, respectivamente, con la consiguiente extracción del metal. En tal sentido se ha utilizado principalmente con los minerales de cobre y hierro.

Con el perfeccionamiento de la técnica, la cantidad de carbón vegetal que se necesita para producir una tonelada de lingotes de hierro oscila alrededor de los 600-700 kg.

TABLA N° 23.- Características generales que debe reunir el carbón vegetal destinado a fines metalúrgicos

- Carbono fijo (%) .....	85 - 92
- Volátiles (%) .....	22 - 26
- Cenizas (%) .....	Máximo de 4
- Azufre (%) .....	0
- Fósforo (% de $P_2O_5$ ) .....	Máximo de 0,08
- Humedad (%) .....	Máximo de 8
- Poder calorífico (Kcal/kg) .....	6.500-7.000
- Temperatura de ignición (°C) ...	240
- Tamaño (mm) .....	12-60
- Peso específico ( $kg/m^3$ ) .....	220-280
- Resistencia a compresión( $kg/cm^2$ )	25-50
- Friabilidad .....	En caso de solici- tarlo
- Porosidad (%) .....	70-80

Algunas de las ventajas de utilizar el carbón vegetal en vez del coque en las fundiciones de hierro son las siguientes:

- . Menor consumo de carbón vegetal que de coque para la obtención de 1 t de lingotes de hierro.
- . En los hornos de carbón vegetal se necesita como mucho una tercera parte de la caliza que se utiliza normalmente por cada tonelada de lingotes de hierro.
- . Los hornos de carbón vegetal tienen una temperatura crítica más baja.

. Para la misma capacidad de producción, la carga que se necesita para un horno de carbón vegetal es el 65% de la que requiere un horno de coque.

El futuro del carbón vegetal en las fundiciones de hierro se ha comprobado adecuadamente en Brasil. Un país con grandes recursos forestales, minerales de hierro de buena calidad y bajos salarios, puede producir hierro de superior calidad y en unas condiciones tan económicas como en el caso de utilizar coque.

Las fundiciones de Brasil, Argentina, Malasia, Australia e India, que lo utilizan, se apoyan en grandes cantidades de recursos forestales bien administrados. El carbón apropiado debe ser duro y denso. En la India estos carbones se obtienen a partir de los aclareos y entresacas que se efectúan en las plantaciones de teca y en algunas ocasiones con mezclas de diversas especies de madera dura.

#### 8.4.2.2.- En la Industria del Carbón Activado

La utilización del carbón vegetal en la producción de carbón activado no es muy antigua si se compara con su empleo en las industrias metalúrgica y química, respectivamente. En Europa, los primeros mercados se empezaron a desarrollar a principios de siglo, merced a sus propiedades de depuración, absorción y adsorción.

La publicidad que se le dió durante la Primera Guerra Mundial estimuló la investigación, proliferando durante los años siguientes su firme y continuo crecimiento.

El término carbón activado se refiere a diversas formas de carbones que han sufrido un tratamiento más o menos complicado con el fin de aumentar sus propiedades de adsorción.

Se utilizan en forma de polvo o gránulos, en los procesos de adsorción de las fases líquidas y gaseosas.

En el mercado también se conocen formas esféricas, aunque en cantidades muy limitadas.

Desde hace tres años se ha introducido un nuevo tipo, el "Carbón Activado Biológico" (CAB). Son unos gránulos con una relación porosidad específica/volumen de poros que mejora el crecimiento bacteriano sobre la superficie de sus partículas, ofreciendo de este modo una mayor capacidad de adsorción de materia orgánica.

Aunque el incremento de superficie y la capacidad de adsorción de todos los carbones activados están interrelacionados, el volumen de la superficie es sólo una característica para medir la capacidad de adsorción de un determinado carbón para un fin específico.

Es también de gran importancia la distribución del volumen de poros en función de los diferentes tamaños de poros. Las características estequiométricas controlan el acceso o entrada de las partículas adsorbidas en el interior de las superficies, por lo que una molécula de adsorbato puede ser rechazada en un caso y sin embargo "ser adecuada" para otras clases de carbón activado.

En otros términos, los carbones activos con una gran superficie total y microporos pueden ser efectivos para la elimi

nación de las pequeñas impurezas olorosas de los gases e ineficaces en la adsorción de los compuestos coloreados de las soluciones. Esto puede explicar el gran número de tipos, calidades y formas de carbón activado de que se dispone en el mercado.

Teniendo en cuenta las características básicas de los carbones activos presentes en el mercado, existen por lo general más de setenta clases distintas.

Sus aplicaciones, fundamentalmente para la industria aunque también para usos domésticos, son las siguientes:

Para la fase líquida:

- . Depuración de las aguas de beber.
- . Depuración de las aguas de las piscinas.
- . Depuración de las aguas de los estanques piscícolas.
- . Depuración de las aguas residuales de las plantas municipales.
- . Depuración de las aguas residuales de las plantas industriales.
- . Purificación de grasas, aceites y bebidas.
- . Depuración de las aguas que se emplean en las fábricas de cerveza.
- . Depuración de las aguas que se emplean en la limpieza de las botellas y depósitos de bodegas.

- . Depuración de las aguas que se emplean en la limpieza de los recipientes que van a contener insecticidas y pesticidas para posteriores operaciones de pulverización.
- . Limpieza de los baños de electrodeposición o galvanoplasticos.
- . Decoloración de las soluciones de azúcar procedentes - tanto de la caña como de la remolacha.
- . Decoloración de las soluciones de vitaminas y otros - productos farmacéuticos.
- . Decoloración de los jarabes de maíz ricos en fructosa.

Para la fase gas/vapor

- . Purificación de los gases que entran y salen en un de terminado proceso.
- . Purificación del aire de recirculación.
- . Recuperación de los disolventes que se emplean en las máquinas de imprimir y en aquellos procesos donde se desprenden continuamente elevadas cantidades de productos volátiles.
- . Prevención de peligrosos y malos olores.
- . En las caretas antigas, tanto con fines militares como civiles.

### Otras aplicaciones

- . En los filtros de cigarrillos
- . En los catalizadores de procesos químicos.
- . Como soporte para los catalizadores de platino y pala  
dio.
- . Como aditivo de los alimentos.
- . En la depolarización aire-oxígeno.
- . En las baterías eléctricas.
- . Como aditivo de los neumáticos de goma.
- . Como automotor de los sistemas de control de la evapo-  
ración.
- . En envenenamientos con drogas.
- . En centrales nucleares.

En los países industrializados, un gran estímulo para es  
te mercado es la legislación relativa al control de la contami  
nación del aire y agua.

Desde 1977, las nuevas legislaciones han dado lugar a un  
razonable incremento global del mismo, con la esperanza de con-  
seguir un crecimiento anual del 8-9%.

Las producciones de carbón activado durante el año 1979 fueron las siguientes:

	<u>t</u>
- América del Norte .....	160.000
- Europa Occidental .....	105.000
- Europa Oriental .....	20.000
- U.R.S.S. ....	70.000 (estimado)
- Japón .....	80.000
Total .....	435.000

Como consecuencia del espectacular incremento que sufrieron los precios del carbón activo durante los tres últimos años, los grandes consumidores están buscando en la actualidad modalidades que se puedan regenerar. A finales de 1979 el carbón activo que se empleó para depuración de las aguas alcanzó los 2,20 \$/kg.

Una capacidad de regeneración suficiente se conseguirá dentro de un futuro cercano, lo que sin duda impedirá el crecimiento de este tipo de mercado. Por otra parte, todos los carbones activos de hoy se pueden someter únicamente a un doble proceso de regeneración riguroso, teniéndose que retirar después.

La producción de carbón activado es un proceso de bajo rendimiento respecto a la materia prima de que se parte, tanto si es carbón vegetal como otro producto.

#### Especificaciones

Los requisitos normales que debe cumplir el carbón vegetal para su empleo en la fabricación de carbón activado son los siguientes:

- Carbono fijo ..... Mínimo de 82%
- Cenizas ..... Máximo de 4%
- Volátiles ..... 10%
- Humedad ..... 4%
- pH ..... 4-10

El pH se refiere a una prueba de acidez que se realiza con el agua que se extrae del carbón vegetal.

#### 8.4.2.3.- Como combustible

En diversos países, entre ellos Estados Unidos, se ha empleado directamente para secar lúpulo, tabaco y otros productos similares. En calentamientos indirectos también se ha utilizado como sustituto de los combustibles fósiles. Por otra parte se ha usado en la fabricación de cal y cemento como combustible interno. En estado pulverizado se ha aplicado para encender hornos y mezclado con caliza para producir cal viva.

En la fabricación de cemento Portland los contenidos de humedad y cenizas de estos carbones deberá ser inferior al 4% mientras que el de volátiles debiera superar el 20% para que se produzca la ignición espontánea en el interior del horno. Por regla general se utilizan 0,25 t de carbón vegetal por cada tonelada de cemento Portland. El carbón que se obtiene de eucaliptos, acacias, maesopsias y pinos se considera aceptable para este tipo de aplicaciones.

#### 8.4.2.4.- Como generador de gas

El carbón vegetal se ha utilizado ampliamente en reactores o gasificadores, para producir un gas de bajo o medio poder calorífico. Este gas se ha empleado en los motores de gasolina

y gas-oil de los coches y barcos, en los generadores eléctricos estacionarios y en muchos otros motores previamente preparados.

#### 8.4.2.5.- En Horticultura

Este producto se ha empleado como constituyente de los tiestos y del sustrato del suelo, así como para evitar la contaminación del agua que se utiliza en los cultivos hidropóricos. En alguna ocasión se ha usado como abono superficial de plantas en floración y como depurador del suelo.

#### 8.4.2.6.- Otros usos

El carbón vegetal también se ha empleado y emplea en multitud de otros usos, entre los que destacan los siguientes:

- . En la reparación de las paredes de los hornos. La mezcla que se aplica puede contener hasta un 11% en peso de dicho producto.
- . En la purificación o refino de mezclas de minerales de hierro que contienen cromo, cobalto y níquel. Este proceso consiste en una reducción con carbón vegetal a 740°C por espacio de tres horas, seguida de una disolución con ácido sulfúrico durante veinte minutos.
- . En el ahorro de combustible e incremento de la producción de los altos hornos (los finos). En las fundiciones de hierro brasileñas se ha logrado aumentar la producción de lingotes y ahorrar un 19% de combustible mediante la inyección de 76 kg de finos por cada tonelada de lingote de hierro.

Los finos también se amalgaman con los minerales de hierro para producir bolas autorreductoras.

- . En el desempolvado de moldes en los trabajos de fundición.
- . En la limpieza del hollín que se deposita en las grandes chimeneas.
- . En la producción de silicio cristalino, sílice y cromo.
- . En la fabricación de pólvora, plásticos y caucho.
- . En la preparación de fuegos artificiales.
- . En la alimentación de aves y otros animales.
- . En la producción de cianuros, carburos y bisulfuros.

#### 8.4.3.- Fuentes de suministro

En los países industrializados, el continuo crecimiento de la demanda de carbón vegetal, tanto desde el mercado consumidor para uso doméstico como industrial, ha tenido una importante repercusión en la industria del citado producto.

Después de la Segunda Guerra Mundial, cuando la industria de la carbonización volvió a su ritmo de producción normal, la construcción de nuevas plantas estuvo acorde con la demanda del mercado. Entre 1955 y 1965 se puso de manifiesto la escasez de producto de uso doméstico, lo que aumentó el precio de adquisición, hecho que ha proseguido desde entonces. Durante esta época muchas instalaciones dejaron de funcionar al actuar en unas condiciones nada rentables.

Como consecuencia de esto, el mercado del carbón vegetal se dirigió a otras fuentes de suministro más baratas.

Hasta entonces la industria tuvo la creencia general de que no se exportaría carbón vegetal más allá de los países ve ci nos, merced al alto coste del transporte, idea que se ha ab an donado posteriormente.

En primer lugar se elevaron los precios de mercado para hacer posible el transporte marítimo y el terrestre a larga dis tan cia.

En segundo lugar, la aparición de los grandes recipien--tes o containers, contribuyó a una disminución relativa de los costes de los fletes y posibilitó su puntual distribución según los calendarios y programas fijados de antemano.

Para caracterizar la situación actual se puede afirmar que sin importaciones, desaparecerían pronto los mercados consu--midor e industrial, respectivamente. La industria familiar no es capaz de abastecer estos mercados de forma satisfactoria, no permitiendo las disponibilidades de materia prima la expansión necesaria.

El abastecimiento de los mercados de carbón vegetal si gue diferentes vías y circunstancias. Los de Estados Unidos se surten de los productores de Méjico y de los de algunos países - sudamericanos como Brasil y Venezuela.

Las importaciones de estos países fluctuaron alrededor - de 120.000 t en 1980, principalmente como producto a granel, pa ra la posterior formación de briquetas y aglomerados.

Los mercados europeos se abastecen en la actualidad de más de ocho países, entre los que destacan los productores tradicionales de las naciones del Este de Europa, como Bulgaria, - Hungría, Polonia, Rumanía y Yugoslavia.

Sin embargo, este suministro ha sido esporádico, dependiendo las entregas y distribuciones de las resoluciones de las comisiones de comercio de cada país.

Otras fuentes más seguras para los mercados europeos son las de Méjico, República de Sudáfrica y Brasil.

Los envíos a la totalidad de los mercados también se hicieron desde zonas tan lejanas como las de los Países bañados por el Océano Pacífico, aunque fueron de más pobre calidad, por lo que se suspendió el comercio.

Las cifras y estadísticas de las partidas que se han enviado a los países industrializados de Europa son poco fiables. Algunos Estados omiten ciertos datos comerciales para proteger los intereses de un fabricante en el caso de existir una sola empresa o compañía. Los valores facilitados por grupos interesados, revelaron que durante el año 1979 el total de las importaciones europeas se aproximó a las 90.000 t, esperándose obtener un crecimiento anual del 10% aproximadamente.

También ha habido un fuerte intercambio comercial entre los países industrializados. No obstante, la escasez de materia prima y las exigencias de mercado en cada uno de ellos, reducirá dicho intercambio en un futuro más o menos próximo.

Los fabricantes franceses que exportaron este producto - desde hace varias décadas, interrumpieron esta actividad por -

primera vez en 1979, abandonando sus mercados exteriores. Este vacío fue ocupado por las partidas procedentes de terceros países, que aun persisten todavía.

Los mercados europeos demandan productos terminados. La formación de briquetas ocupa un puesto primordial, al reducir - su elevada densidad los costes del flete de una forma significativa.

Los problemas han surgido hasta ahora con el material de envase y atavíos de transporte, como jergones, cajas y maderos de estibar. En muchos casos la falta de un envase adecuado ha sido perjudicial para su introducción en el mercado, ahogando - las esperanzas de un comercio de exportación satisfactorio

#### 8.4.4.- Estrategia de mercado

Una nueva instalación de carbón tendrá que tener en cuenta las diferencias que se presentan entre sus múltiples aplicaciones, así como una capacidad que le permita asegurar un buen suministro y una uniforme calidad.

Otra tarea que deberá llevar a cabo será la de investigar las rápidas variaciones de las tendencias de los mercados y los cambios tecnológicos de los procesos de producción, que requerirán otros medios distintos a los actuales.

Asunto diferente será la legislación que regule las responsabilidades, el transporte y los cambios en las normas comerciales.

Todos estos hechos han conducido a buscar modelos de mercado ya experimentados, con el fin de encontrar unas formas óptimas.

formas de financiación del producto. En la Tabla 24 se señalan los tipos de mercado más corrientes actualmente.

En definitiva, el proveedor de carbón vegetal, especialmente el fabricante extranjero que no puede recurrir a su propia pericia o habilidad, contratará por lo general los servicios de un representante o de una agencia, que se encargarán de las cuestiones técnicas y comerciales. Estos servicios incluirán:

- . Estudios de mercado
- . Relaciones y avisos de los clientes
- . Estructuración de los precios
- . Preparación de contratos de venta
- . Asistencia técnica a la hora de aplicar los productos
- . Tratamiento y solución de las quejas de los clientes

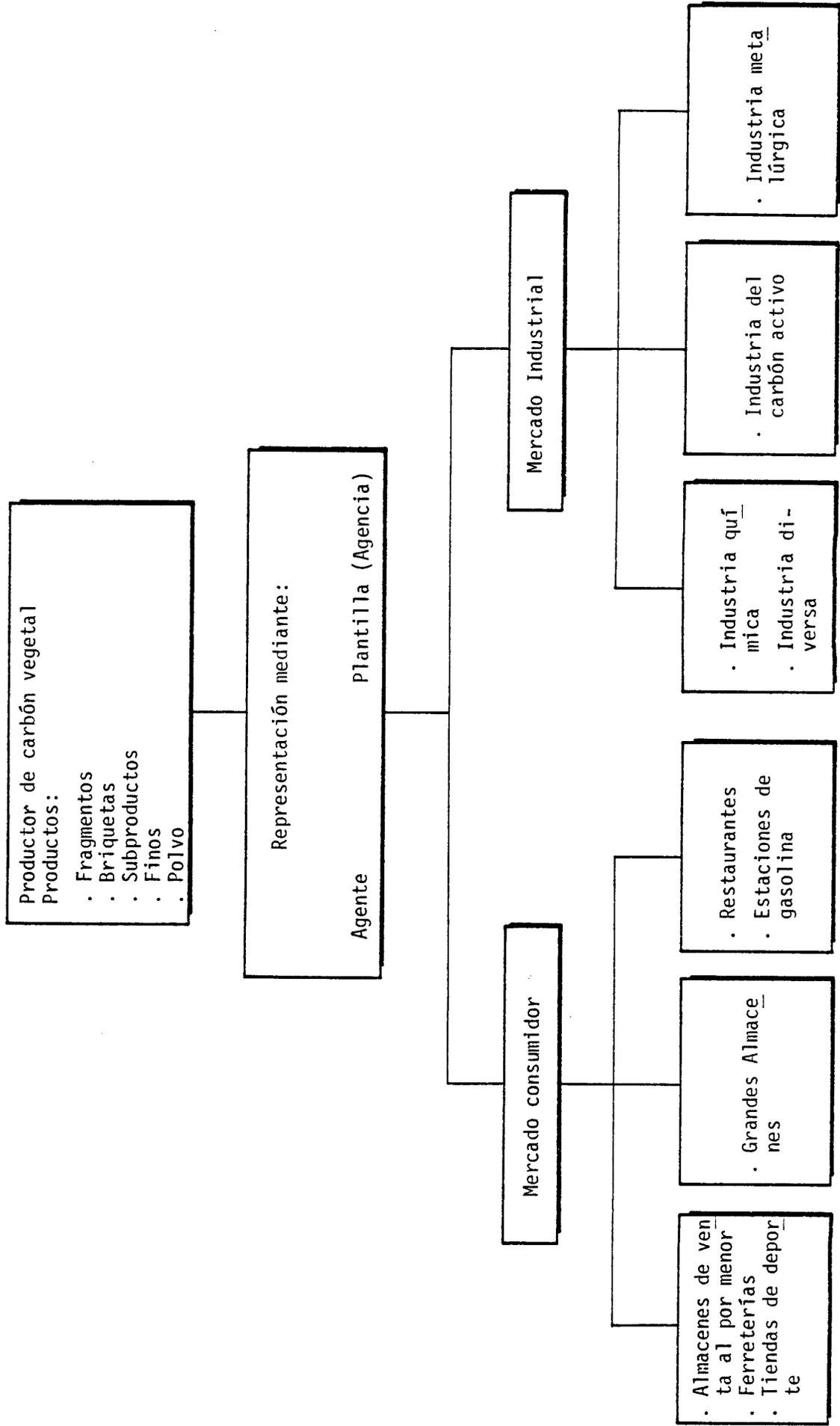
Para cumplir satisfactoriamente las exigencias de este amplio y variado mercado, se deberán considerar los medios de producción de que se dispone. En otras palabras, el diseño de una planta de carbón vegetal puede limitar su flexibilidad al tratar con clientes de mercados de ultramar.

#### 8.4.5.- Situación y perspectiva de los distintos mercados

Es un hecho manifiesto que los mercados americanos difieren en gran medida de los de Europa Occidental, tanto en las específicas formas de aplicación como en todo lo relacionado con las briquetas y fragmentos.

En 1967 el mercado de Estados Unidos ascendió a unas 700.000 t aproximadamente, de las que 500.000 t se destinaron al sector consumidor. Datos más recientes basados en encuestas directas, indican que su demanda total durante 1979 fue de

TABLA N° 24. - Modelos de mercado en los países industrializados



1.200.000 t, de las que solo 55.000 t se emplearon con fines in  
dustriales.

Las cifras dignas de crédito de que se dispone en la ac  
tualidad son escasas, por utilizarse considerables cantidades -  
de lignito, algo de antracita y una pequeña cantidad de coque  
procedente de la nafta líquida, valores todos ellos guardados -  
como confidenciales por parte de la industria.

Durante el mismo período la producción de briquetas pasó  
de un 70 a un 92%, estando equilibrada la de fragmentos y fi  
nos.

Según los datos del Departamento de Comercio de Estados  
Unidos y las cifras y resultados de tres estudios de mercado -  
realizados para la industria, se ha comprobado que durante el  
mismo período de tiempo la cantidad de carbón vegetal con desti  
no a barbacoas aumentó de 45,1 a 59 Mt, esperándose alcanzar en  
1990 los 72,6 Mt.

Otra investigación que se llevó a cabo en 1979 en varias  
empresas seleccionadas de Estados Unidos, muestra que la veloci  
dad de crecimiento anual en cuanto a su producción de carbón ve  
getal fue la siguiente:

<u>Año</u>	<u>Incremento porcentual</u> <u>anual</u>
1967	-
1968	18,5
1969	13,4
1970	11,1
1971	11,1
1972	4,0
1973	1,4

<u>Año</u>	<u>Incremento porcentual anual</u>
1974	3,6
1975	4,3
1976	3,1
1977	1,9
1978	- 3,8

El incremento porcentual que se produjo entre 1967 y 1978 fue del 91,6%.

Por lo que respecta a los mercados de Europa Occidental, la producción total de carbón vegetal en 1967 fue de 180.000 t con unas importaciones de 30.000 t aproximadamente.

Se estima que solo se destinaron al mercado consumidor 80.000 t, empleándose el resto, es decir, 130.000 t, en las industrias químicas, metalúrgica y de filtros.

Desde entonces la producción europea se ha incrementado hasta alcanzar 250.000 t en 1979, siendo también considerables las importaciones efectuadas. Una encuesta que se realizó dicho año entre varios mayoristas seleccionados, reveló que en el transcurso del mismo se llegaron a importar alrededor de 110.000 t.

En cuanto a la fabricación de briquetas aumentó de 15.000 t en 1967 a 90.000 t en 1980, empleándose principalmente como combustible en la preparación de barbacoas.

En la Tabla 25 se hace un resumen de las estimaciones y predicciones referentes al empleo de carbón vegetal en los mercados de Europa Occidental y Estados Unidos.

TABLA N° 25.- Mercado de carbón vegetal en Europa Occidental y Estados Unidos

Año	Crecimiento anual del mercado consumidor		Crecimiento anual del mercado industrial		Importaciones anuales	
	U.S.A.	Europa	U.S.A.	Europa	U.S.A.	Europa
1979	35.000 t	25.000 t	10.000 t	5.000 t	120.000 t	110.000 t
1980	38.000 t	35.000 t	-	5.000 t	130.000 t	120.000 t
1981	40.000 t	25.000 t	-	5.000 t	150.000 t	120.000 t
1982	50.000 t	30.000 t	10.000 t	10.000 t	200.000 t	140.000 t
1983	70.000 t	35.000 t	15.000 t	15.000 t	220.000 t	160.000 t
1984	60.000 t	45.000 t	-	15.000 t	230.000 t	180.000 t
1985	70.000 t	45.000 t	10.000 t	15.000 t	250.000 t	200.000 t
Total	363.000 t	240.000 t	45.000 t	70.000 t	1300.000 t	1030.000 t

#### 8.5.- ASPECTOS ECONOMICOS

Como ya se ha expuesto anteriormente existe una gran variedad de equipos para producir carbón vegetal. Es difícil decidir qué métodos son los más apropiados sin poseer un gran conocimiento y experiencia en el tema. Por otra parte, la proliferación de equipos tiende a concentrar una excesiva atención sobre el proceso de carbonización propiamente dicho, a pesar de que esta fase tiene una repercusión secundaria en la estructura total de los costes.

La fabricación de carbón vegetal se puede dividir en varias etapas o unidades de operación, tales como:

- . Recolección de la materia prima.
- . Desechado y preparación de la misma para el proceso de carbonización.
- . Carga del reactor (horno o reactor) que se utilice en el proceso.
- . Carbonización.
- . Enfriamiento y descarga.
- . Tamizado y carga.

Los costes de producción se pueden analizar convenientemente al considerar los siguientes "costes medios", que muestran con mayor claridad las ventajas e inconvenientes de los diferentes sistemas:

- . El de la materia prima a pie de horno o retorta, incluyendo los gastos de financiación.
- . El de la mano de obra que requiere el proceso de carbonización, incluyendo los correspondientes a la carga y descarga.
- . El del transporte del carbón a los principales mercados y puntos de distribución.
- . El del capital circulante.
- . El de las inversiones a realizar.

Para ver la importancia relativa de cada sistema, todos estos costes se han de referir a la misma unidad básica, como es la tonelada de carbón producido.

A continuación se da un resumen de diversos estudios hechos por la F.A.O. para tener una visión global del asunto en los países en vías de desarrollo principalmente.

En aquellos lugares donde se utilizan los tradicionales hornos de ladrillo y como materia prima los bosques de las sabanas con producciones de 40 m<sup>3</sup> de leña por hectárea, los costes unitarios expresados como porcentajes del coste total del carbón producido son los siguientes:

#### Costos empleando horno de ladrillos

. Coste de leña a pie de horno .....	60%
. Coste de la mano de obra que requiere el horno	9%
. Capital circulante .....	3,5%

. Inversiones .....	1,5%
. Coste del transporte del carbón .....	26 %
Total .....	<u>100,0%</u>

Son claros y de una gran notoriedad los costes de la recolección de la leña y los del transporte del carbón vegetal. - Juntos representan un 86% del coste total.

En casos de emplear retortas de tipo continuo, las inversiones aumentan y los costes de la leña disminuyen, pues se requieren menos de la mitad de ella por cada tonelada de carbón - producido. Si se emplea como materia prima los bosques de las sabanas indicados anteriormente, con producciones de 40 m<sup>3</sup> de leña/ha, los nuevos costes unitarios expresados como porcentajes del coste total del carbón producido, una vez distribuido a los principales mercados, son los siguientes:

#### Costos empleando retortas

. Coste de la leña a pie de retorta .....	45%
. Coste de la carbonización, incluyendo la mano de obra y los gastos de financiación .....	28%
. Coste del transporte del carbón .....	27%
Total .....	<u>100%</u>

El beneficio de la energía eléctrica que se genera con estas retortas oscila alrededor del 26%.

Las dos principales ventajas del sistema de la retorta - son el ahorro de leña con su consiguiente menor coste, y el beneficio que se obtiene al vender la energía eléctrica que se produce por la combustión de los gases que se desprenden en su

interior. Sus inconvenientes son las elevadas inversiones que hay que realizar, que pueden ser superiores a la capacidad de un país en vías de desarrollo, agobiado por sus recursos económicos y por la necesidad de procurar el máximo rendimiento, con el fin de obtener una tasa interna de retorno aceptable. No obstante, para un país dispuesto a hacer grandes esfuerzos, el sistema se recomienda por sí solo, al utilizar la leña de una manera tan eficaz.

En los otros procedimientos, como los hornos de tierra, metálicos, de ladrillo y de hormigón, se puede alcanzar el mismo rendimiento en cuanto a la producción de carbón, si bien varía la eficiencia con que se emplea la mano de obra que requiere la carbonización, la carga y la descarga.

La optimización de todos los factores que intervienen en el coste de producción del carbón por métodos tradicionales se puede ver en los mejores ejemplos de las industrias argentina y brasileña, respectivamente. En estos países se emplean hornos clásicos, de buen diseño, hechos con ladrillos propios, muy bien dispuestos y agrupados, para maximizar la productividad y eficacia de la mano de obra.

Únicamente los sistemas continuos que producen más del doble de carbón vegetal con la misma cantidad de leña, presentan alguna diferencia en cuanto a la estructura de costes y utilización de los recursos.

Un análisis y una comparación más concienzuda demuestra que en función del coste por tonelada de carbón producido durante la vida de los equipos, las diferencias no son tan marcadas como pudiera parecer en principio.

En donde la inversión es elevada se compensa por regla general por los considerables ahorros que se producen en otros aspectos. Esta circunstancia es muy importante cuando la velocidad y los costes de los jornales se incrementan.

En las Tablas 26 y 27 se comparan los costes aproximados de diferentes equipos de carbonización como resultado de los trabajos efectuados por F.A.O. y Carbon International, Ltd., respectivamente.

En la primera de ellas se han estimado las cifras sobre unos datos previos del año 1975, con una cierta tolerancia en la escalada de los costes. Con ello se pretende indicar la posible magnitud de los mismos, pero con el firme convencimiento de que varían de un país a otro. Evidentemente, aunque el coste por unidad de funcionamiento aumenta el coste por tonelada de carbón producido, no es un factor tan importante como puede creerse a priori, especialmente en relación con el coste total, en donde la materia prima lo es mucho más. El transporte y suministro de la misma será probablemente el factor determinante final a la hora de elegir qué sistema se va a utilizar.

En definitiva, todos estos valores se deben considerar a título orientativo como una norma general, pero no predicen en modo alguno los aspectos económicos de las plantas y equipos - que se vayan a instalar.

Normalmente se necesitan  $9 \text{ m}^3$  de una madera de densidad media para producir una t de carbón. Si éste se obtiene de residuos, tales como costeros, recortes, virutas y desechos de la trituración de la madera, el coste medio de los mismos es por lo menos inferior en una tercera parte al de los troncos.

TABLA N° 26.- Costes aproximados de diferentes equipos de carbonización segun F.A.O.

Clase de equipo	Producción anual por unidad (t)	Vida de la unidad (años)	Producción a lo largo de su vida (t)	Coste de la unidad (\$)	Coste por tonelada de carbón vegetal producido para una producción de 600.000 t	N° de unidades que se necesitan durante un período de 30 años para producir 600.000 t	Coste total de las unidades (x 10 <sup>6</sup> \$)	Hombres/día por tonelada de carbón producido
<b>HORNOS:</b>								
• El metálico por tátil de Uganda	72	3	216	1.000	4,63	2.777	2,78	4
• El de ladrillo, de Brasil .....	160	5	800	800	1,00	750	0,60	2,5
• El Missourí (de hormigón) ....	312	7 1/2	2.340	10.000	4,27	257	2,57	1
<b>RETORTAS:</b>								
• La portátil - Constatine (1)	350	20	7.000	12.000	1,71	86	1,01	2
• La discontinua vertical Constatine (2)	2.500	30	75.000	150.000	2,00	8	1,20	0,3
• La continúa vertical Lambiotte (3) ...	20.000	30	600.000	2000.000	3,33	1	2,00	0,2
• La portátil - Lambiotte (4)	3.000	20	60.000	500.000	8,00	10	5,00	1,0

Nota:

- (1) Se transporta únicamente después de largos períodos de tiempo.
- (2) Se incluyen los equipos auxiliares.
- (3) Se incluyen los equipos auxiliares.
- (4) Se transporta probablemente después de largos períodos de tiempo.

El funcionamiento del horno brasileño en Dionisio, donde existen en un lugar determinado 21 unidades, requiere mucha mano de obra.

Los hornos Missouri funcionan en serie en un lugar determinado, con mecanización de la carga y descarga. Requieren una gran inversión.

La retorta portátil Constantine es la que mejor funciona en serie (de 8 a 10) en un lugar determinado, por espacio de 2 a 3 años, según las características y condiciones de cada caso concreto. Requiere mucha mano de obra.

TABLA N° 27.- Costes aproximados de diferentes equipos de carbonización según la Compañía  
Carbon International, Ltd. (R.F. Alemana)

Tipo	Volumen	Producción de carbón vegetal por tonelada de materia prima seca (1)	Forma de actuar	Inversión
Horno de tierra	50 m <sup>3</sup> (óptimo)	190-230 kg	Discontinua	-
Horno Beehive de ladrillo .....	50 m <sup>3</sup>	260-290 kg	Discontinua	26 \$/m <sup>3</sup>
Horno Missouri .	100-200 m <sup>3</sup>	270-290 kg	Discontinua	200-220 \$/m <sup>3</sup>
Retorta portátil	40 m <sup>3</sup>	350-380 kg	Discontinua	100-120 \$/m <sup>3</sup>
Retorta Reichert	100 m <sup>3</sup>	330-350 kg	Discontinua	300-350 \$/m <sup>3</sup>
Reactor de pirólisis rápida (2)	30-200 m <sup>3</sup>	300-320 kg	Continua	200.000-1.800.000 \$

Nota:

(1) Valores medios para especies de madera dura

(2) Las inversiones varían mucho con el tipo de proceso y equipos que se empleen

En la Figura 56 se expresa la relación que existe en USA entre el coste de la madera, en \$/cuerda, y el de producción de carbón vegetal. Asimismo, en la 57 se indica la relación que existe en U.S.A. entre el precio de venta del carbón vegetal y el coste de la mano de obra en el caso de suponer para la madera un precio con el que ni se gane ni se pierda dinero.

Mediante un análisis de regresión con los datos de coste de que se dispone, se ha establecido la siguiente ecuación para determinar el precio a que se podría pagar la madera en el supuesto de no ganar ni perder dinero.

$$\text{Coste de la madera} = 0,395 \times \text{precio de venta del carbón} - 5,008 \\ \times \text{coste de la mano de obra} - 3,485.$$

Esta ecuación se ha obtenido en función de datos exclusivos de U.S.A., por lo que no se puede aplicar de forma general.

En la Tabla 28 se dan los costos de producción del carbón vegetal para tres tipos de hornos discontinuos que se utilizan en U.S.A., en la hipótesis de que no haya ni pérdidas ni ganancias.

TABLA N° 28.- Costes de producción del carbón vegetal para tres tipos de hornos en el caso de que ni se gane ni se pierda dinero

Tipo de horno	Capacidad	Costo por tonelada de carbón vegetal			
		Mano de obra	Madera	Amortiz.	Total
Metálico	1,8 m <sup>3</sup>	26,12 \$	28,68 \$	6,25 \$	61,05 \$
Metálico	5,4 m <sup>3</sup>	23,35 \$	35,73 \$	4,42 \$	63,50 \$
Mamposter.	7,2 m <sup>3</sup> (*)	24,05 \$	24,73 \$	3,44 \$	52,22 \$

(\*) Por extensión de estos datos a un horno de mampostería de 25 m<sup>3</sup>, resulta un coste de producción de 43,25\$ por tonelada de carbón vegetal.

Costes de producción de una tonelada de carbón vegetal al ex-  
cluir los de mantenimiento (\*)

C a p í t u l o s	Coste	
	Por tonelada	Por m <sup>3</sup>
Construcción y amortización del horno ..	8,83 \$	0,96 \$
Carga .....	7,41 \$	0,81 \$
Cierre de la puerta (colocación de tro- zos de madera en las salidas) .....	3,60 \$	0,39 \$
Encendido, control y cierre estanco ....	5,59 \$	0,61 \$
Descarga del horno y carga en camión ...	2,01 \$	0,22 \$
T O T A L	27,44 \$	2,99 \$

Nota:

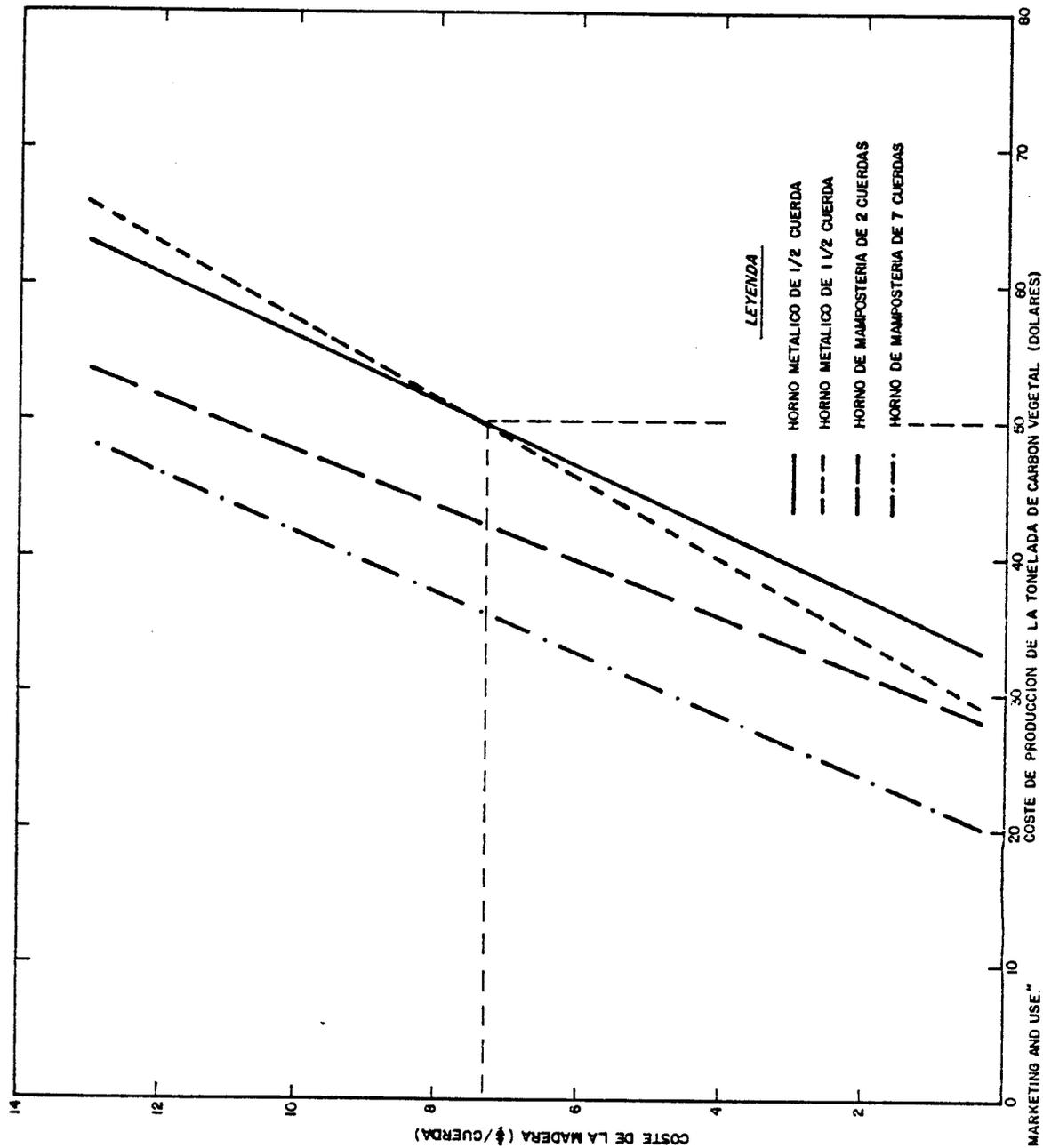
(\*) Se excluyen los costes de mantenimiento por carecer de da  
tos. No hubo que efectuar grandes reparaciones durante los  
14 ensayos realizados.

Referencia: "Charcoal, Production, Marketing and Use".

8.6.- CONSECUENCIAS DE LAS EXPORTACIONES DE CARBON VEGETAL  
PARA LOS PAISES EN VIAS DE DESARROLLO

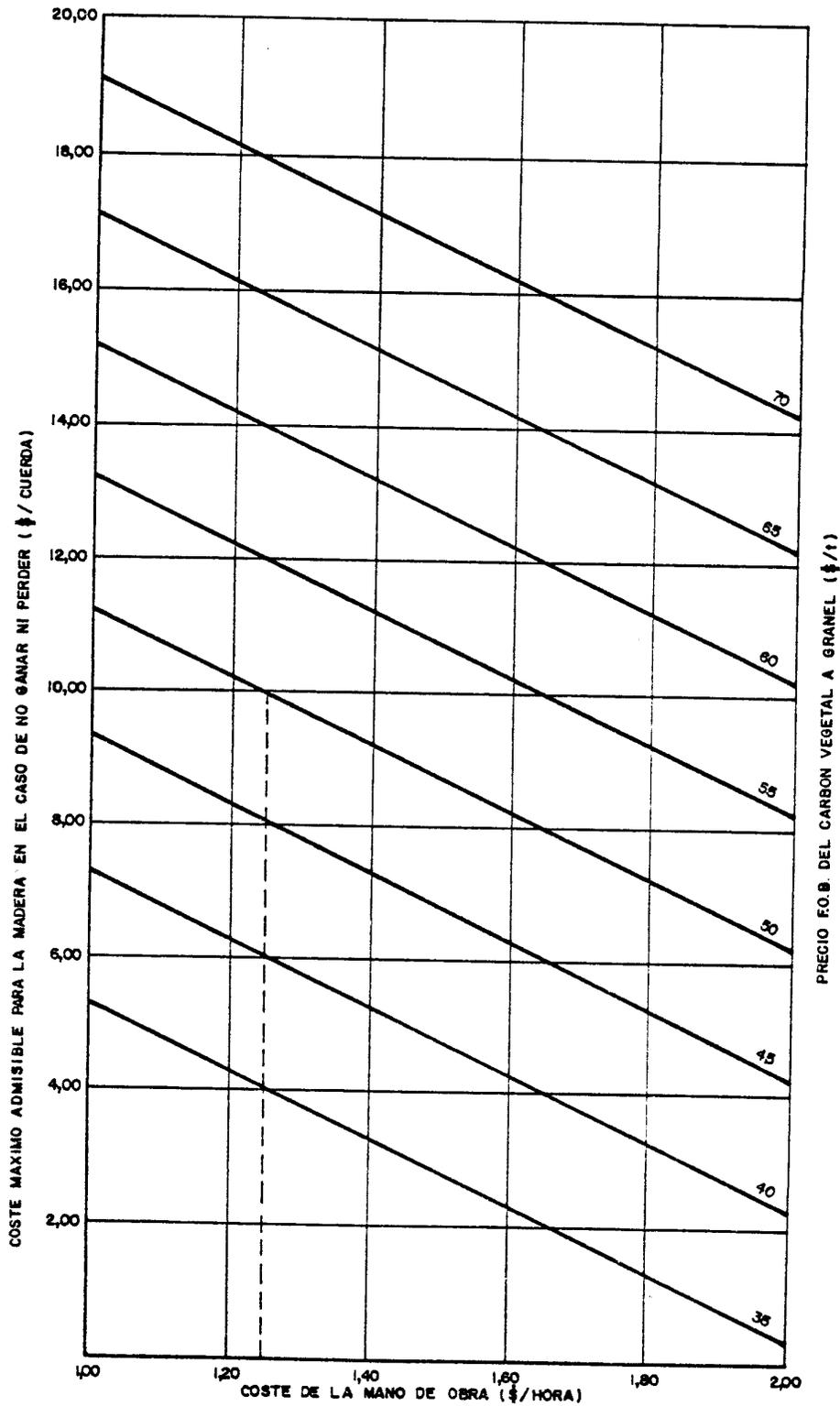
Hasta ahora apenas se han efectuado estudios para inves  
tigar la trascendencia y consecuencias de las exportaciones rea-  
lizadas a los mercados de los países industrializados por parte  
de los que están en vías de desarrollo. Una razón puede ser la  
falta de información acerca de los modelos de comercio y de la  
evolución de la industria.

RELACION ENTRE EL COSTE DE LA MADERA Y LOS DE PRODUCCION DEL CARBON VEGETAL, ENTRE LOS QUE SE INCLUYEN LOS DE LA MATERIA PRIMA, MANO DE OBRA Y AMORTIZACION



REFERENCIA. "CHARCOAL, PRODUCTION, MARKETING AND USE."

RELACION ENTRE EL PRECIO DE VENTA DEL CARBON VEGETAL Y EL COSTE DE LA MANO DE OBRA PARA UN VALOR ADMISIBLE DE LA MADERA (MADERAS DURAS DEL NORTE) EN EL QUE NO SE GANE PERO TAMPOCO SE PIERDA. EL COSTE DE LA MANO DE OBRA INCLUYE LAS COTIZACIONES DEL EMPRESARIO POR INDEMNIZACION, SEGURIDAD SOCIAL Y SEGURO DE DESEMPLEO.



Prácticamente no hay ninguna bibliografía que describa - los diferentes mercados del carbón vegetal. Por lo tanto, todos los intentos de presentar un cuadro donde figuren los aspectos positivos y negativos de las exportaciones, se han reducido a una serie de entrevistas y contactos llevados a cabo por personas y compañías interesadas en el tema.

En la actualidad solo unos pocos países en vías de desarrollo abastecen los mercados de los industrializados.

No obstante, existe una conciencia por parte de los gobiernos y empresas privadas, especialmente en Africa del Sur, de suprimir las relaciones comerciales relativas al carbón vegetal.

En muchos casos se han frenado por no cumplir las normas de calidad exigidas, por falta de envases disponibles y por informalidad en las fechas de recepción de la mercancía.

El carbón de calidad apto para los mercados extranjeros no debe constituir ningún problema, en caso de poder conseguir una adecuada tecnología.

En muchos de los países en vías de desarrollo, la industria de pastas y papel necesaria para la producción de envases, no se establecerá dentro de la década actual. No obstante, este vacío ya se ha superado merced al suministro de sacos, costales, bolsas, cajas, etc., por parte de los importadores o en algunos casos mediante envíos a granel.

Evidentemente, los costes adicionales de los fletes y de la instalación de los equipos de recepción en el caso de productos a granel, se han satisfecho voluntariamente hasta ahora por los compradores.

Sin embargo, el principal problema, la llegada a su debido tiempo de la mercancía según un programa establecido con cuatro o cinco meses de antelación, no se ha resuelto todavía.

Para llegar a alguna resolución respecto a las consecuencias que las exportaciones de carbón vegetal producirán en los países en vías de desarrollo, se ha de contemplar en primer lugar sus recursos antiguos y nuevos así como las obligadas modificaciones a las que tendrá que recurrir la industria de fabricación.

#### 8.6.1.- Recursos de materia prima

##### 8.6.1.1.- Utilización directa de la leña o fabricación de carbón vegetal

En cualquier discusión que se tenga sobre el suministro y exportaciones de carbón vegetal, hay que considerar la situación en que se encuentra la leña como combustible de uso directo, pues los pobres de los países en desarrollo, tanto los de las zonas urbanas como los de las rurales, la siguen utilizando todavía como principal fuente energética en la preparación de alimentos y sistema de calefacción.

Por lo que respecta al consumo de leña, los datos de que se dispone se han estimado en gran manera, pues la mayor parte de la que se produce y maneja se hace por medio de canales comerciales externos, quedando sin registrar.

Se puede afirmar que en Africa las dos terceras partes de la energía consumida por el hombre y los animales procede de la leña; en Asia una tercera parte; en América latina una quinta parte y en los países del Próximo Oriente un 6% como mínimo.

A medida que crece la población esta dependencia conduce a una inexorable reducción de los recursos leñosos, con la consiguiente destrucción de los bosques y el empeoramiento de la situación de cientos de millones de personas, cuya forma de vida depende de los productos forestales.

Aunque su transporte se puede realizar a mayores distancias, las áreas de aprovisionamiento tienden a estar muy próximas.

La leña es un combustible relativamente ineficaz desde el punto de vista energético si se compara con el carbón vegetal. Como su relación peso/poder calorífico es alta, raras veces podrá absorber los costes del transporte, salvo en el caso de cortos recorridos.

Las consecuencias de un suministro de leña localizado -son una creciente reducción del arbolado y vegetación en los alrededores de los núcleos de población, y una disminución de las actividades que la utilizan como combustible.

Diversos estudios llevados a cabo en los países en vías de desarrollo han descubierto que el carbón vegetal puede ser interesante combustible de uso doméstico, incluso cuando se -transporta a distancias muy superiores a las de la leña.

Cuando en los países industrializados se ha considerado oportuna la fabricación de carbón vegetal, se ha discutido también el tema de utilización de la leña o fabricación del carbón vegetal. Siempre se inclinaron por esta última alternativa, al poderse mejorar el rendimiento total del proceso, merced a la recuperación de diversos subproductos.

#### 8.6.1.2.- Los residuos leñosos como recursos del futuro

La moderna tecnología de fabricación del carbón vegetal proporciona métodos para transformar partículas muy pequeñas, incluso de tamaño inferior al serrín. También es muy importante que estos reactores puedan funcionar a pequeña escala, en condiciones económicas favorables, llenando de este modo el vacío que se crea entre los hornos de tierra, las retortas y las plantas a gran escala.

Los residuos leñosos son los restos procedentes de la corta de la madera y de su posterior empleo en la fabricación de diversos productos. Ciertamente el término "residuo" no está muy bien elegido, pues es la misma clase de madera que se recolecta y transforma en artículos de provecho.

Mientras que los residuos industriales están casi siempre secos, los procedentes de las explotaciones forestales e industria primaria, están por regla general verdes.

A pesar de disponer de mejor maquinaria y control de calidad, el rendimiento de madera terminada y seca es muy bajo, inferior al 40% en el caso de troncos típicos.

Como consecuencia de que los precios de los suministros permanecen fijos, los residuos procedentes de las fábricas que antiguamente se quemaban o vertían una vez comprimidos, se aprovechan ahora mucho mejor en los países industrializados. Aunque la forma óptima de utilizarlos varía según los distintos países, el objetivo de cualquier sistema de aprovechamiento de residuos es obtener productos de gran valor.

A través de diversos estudios realizados en países del Próximo Oriente, Africa y América del Sur, se ha visto que la única forma de conseguir esta meta es mediante la recuperación de su contenido energético.

Aunque la mayor parte de estos residuos no se recogen para su empleo directo a causa de su tamaño y distribución, se adaptan muy bien a cualquier programa de producción de carbón vegetal. Es interesante destacar el hecho de que una vez que se aprueba el concepto de carbón vegetal, se puede fácilmente regular la oferta y demanda de los residuos leñosos.

El mayor potencial para el suministro de carbón vegetal lo constituyen los residuos forestales, que desempeñan un importante papel en la propagación de plagas, fuegos y enfermedades. Las operaciones de limpieza y aclareo son unos métodos de inestimable valor a la hora de evitar tales males.

#### 8.6.1.3.- Utilización de residuos agrícolas para producir carbón vegetal

En los países en vías de desarrollo se producen cada año ingentes cantidades de residuos. La mayor parte de los mismos son productos que no se desean, teniéndose que eliminar.

Por esto, la idea de transformarlos en compuestos energéticos encuentra especial apoyo por parte de los distintos gobiernos.

Desgraciadamente, este hecho presenta una serie de problemas. El más importante es su extensa y amplia distribución, con unos costes de recolección cada vez más elevados.

Para poder utilizarlos de una forma rentable habrá que superar el problema del transporte. Este factor no sería tan grave siempre que el poder calorífico de estos residuos fuera más alto, que su contenido acuoso no superase el 50% y si no fueran tan voluminosos.

Muchos experimentos y ensayos a nivel de planta piloto han demostrado la fácil adaptación del proceso de pirólisis, con la consiguiente transformación de los elementos celulósicos y ligninocelulósicos en carbón, aceite y gas. Los primeros trabajos se iniciaron hace quince años.

En todo este tiempo se han tratado una extensa variedad de productos, como las cáscaras de cacahuets, nueces y cocos, los residuos de las desmotadoras de algodón, los de las plantaciones de café y plátanos, los bagazos de la caña de azúcar, etc.

Uno de los principales descubrimientos fue el comprobar que la mezcla de los residuos agrícolas y leñosos produce mejores resultados en el proceso de pirólisis, tanto en calidad como en rendimiento.

Este hecho permite instalar una planta de carbonización en una zona donde el suministro de materia prima limite el funcionamiento continuo garantizado, pudiéndose suplementar con el empleo de uno u otro tipo de residuos de los que se dispondrá temporal o permanentemente.

Diversos estudios de investigación han puesto de manifiesto que la transformación de los residuos agrícolas es la más apropiada para el proceso de carbonización integral, siendo el bagazo de la caña de azúcar una de las materias primas preferidas.

Puesto que la producción de carbón a partir de bagazo es perfectamente controlable, se puede regular la cantidad de gas a las necesidades de la caldera. Con este sistema se logra un mayor rendimiento energético y una diversificación hacia nuevos mercados. Estas son las causas que explican las altas tasas de retorno que alcanzan este tipo de inversiones.

#### 8.6.2.- Modificaciones a realizar en la fabricación de carbón vegetal

##### 8.6.2.1.- Por parte de los aldeanos, empresas familiares y cooperativas

Mientras que en los países industrializados los fabricantes de carbón abordan una serie de operaciones que sólo difieren en su mayor o menor grado de desarrollo, en los que están en vías de desarrollo la situación es mucho más compleja. Existen un gran número de aldeanos, empresas familiares, cooperativas, gobiernos y empresas privadas comprometidos en el tema. Estas últimas representan el grupo con el que es bastante fácil de tratar hasta ahora, en cuanto a programas, fondos y mercados. Sus planes se dirigen hacia la consecución de los máximos beneficios y a evitar la negligencia social y los impactos colectivos.

Las mayores dificultades estriban en convencer a los aldeanos y pequeñas empresas familiares en la adopción de mejores métodos de producción, abandonando los ineficaces hornos de tierra.

Pero este criterio no se aplica únicamente a las gentes de los países en vías de desarrollo. La misma situación prevaleció al iniciarse la producción de carbón en otros países que al

canzaron la evolución y desarrollo industrial más tarde.

¿Qué alicientes se pueden ofrecer a los fabricantes tradicionales? La respuesta es sencilla, virtualmente ninguno.

El presentar y discutir todos los fracasos obtenidos se saldría fuera del alcance de este informe. Sin embargo, uno de los caminos más claros y engañosos es el de los hornos portátiles o móviles. Estos equipos aparecieron siempre en gran número en épocas de guerra, para poder disponer con gran rapidez de carbón con fines militares, desapareciendo después. Las principales causas de su supresión fueron las altas inversiones, los grandes gastos de mantenimiento, el tamaño de los compuestos leñosos, etc.

El primer paso para modificar la producción de carbón vegetal se origina merced a los estímulos económicos y a los programas de actuación patrocinados por los diferentes gobiernos.

Una vez que el fabricante tradicional ha abandonado su antiguo método y se ha asociado en cooperativas con la adopción de nuevas técnicas mucho más perfeccionadas, nunca volverá a él.

Para satisfacer la demanda doméstica y las exportaciones las cooperativas se proveerán de los medios necesarios que les permitan conseguir elevados rendimientos y productos competitivos. Este hecho proporcionará una base sólida para el florecimiento y prosperidad de una nueva industria.

No se debe pasar por alto el escaso avance que en esta dirección ha tenido lugar en los países en vías de desarrollo.

Desgraciadamente, esto puede contribuir en cierto modo

al planteamiento inadecuado de programas y proyectos, patrocinados por diversas organizaciones nacionales e internacionales, - propagadoras de ideas renovadoras. Algunas de ellas son difíciles de realizar, incluso en plan experimental.

Es también muy conocida la idea de que en los países en vías de desarrollo el carbón vegetal es un combustible solo al alcance de los ricos, mientras que los pobres han de emplear leña. En un futuro se pueden esperar algunos cambios en esta situación.

A fin de encontrar una explicación, se han comparado según las diferentes estructuras de producción, los precios del carbón vegetal en los mercados domésticos de estos países. Parece claro que en las zonas donde la mayor parte de los entes de producción son cooperativas, los precios son más bajos y los productos de mejor calidad.

En un futuro no muy lejano no habrá ningún país que se dedique exclusivamente a exportar, aunque tiendan en gran parte a vender sus excedentes. Los cálculos efectuados sobre los distintos modelos de mercado, han llevado a sorprendentes resultados, como el que las exportaciones puedan mejorar la productividad y calidad.

Esta puede ser la característica más esperada en un futuro por todos los países no industrializados como consecuencia del desarrollo del comercio del carbón vegetal.

#### 8.6.2.2.- Por parte de la industria

Conviene señalar la posibilidad de aprovechar los diferentes subproductos que se producen en los procesos de carboni

zación, característica que cada vez está despertando mayor interés a nivel mundial.

Mirando hacia el pasado se observa como dichos subproductos proporcionaron durante cientos de años suficiente materia prima para la industria química que surgió por aquel entonces.

Actualmente se descarta la idea de volver a aquella época por haberse encontrado fuentes mucho mejores y prácticas. Bastantes de los nuevos planteamientos se dirigen con más intensidad hacia la mayor o menor utilización energética de los distintos componentes obtenidos durante la carbonización, en vez de a su posible interés químico.

Habitualmente, a los productos que se obtienen por destilación durante el funcionamiento de las plantas de carbonización se les denomina aceites de pirólisis. Al mismo tiempo se produce otra fracción gaseosa no condensable, el gas de madera, un excelente vehículo para operaciones de calefacción.

En algunas ciudades de Europa se ha empleado durante muchos años como gas de alumbrado.

En la Tabla 29 se indican los principales productos que se obtienen en la industria de la carbonización y sus subsiguientes aplicaciones actuales.

Por regla general se puede tomar la cifra de 0,75 kg de aceite por kilo de carbón producido. Sin embargo, la proporción de gas varía mucho, según las propiedades específicas de las distintas materias primas que se utilicen.

El carbón, el aceite y el gas contribuyen simultáneamen-

TABLA N° 29.- Principales productos de la industria de la carbonización

PRODUCTO	MATERIA PRIMA	APLICACIONES
. Carbón vegetal en fragmentos	Maderas dura y blanda	Carbón activo, ferrosilicio, combustible de parrillas, metalistería, cianuro sódico, bisulfuro de carbono, acero sueco, silicio.
. Carbón vegetal en forma granular	Fragmentos de carbón vegetal	Carbón activo, aditivo de la alimentación animal, compuesto de relleno en las botellas de gas, endurecedor.
. Carbón vegetal en polvo	Fragmentos de carbón vegetal	Carbón activo, revestimiento de los moldes de las fundiciones metálicas, producción de briquetas, cementación granulada, pirotecnia
. Aceite	Maderas dura y blanda y residuos agrícolas	Combustible de calderas de vapor, metalurgia, motores, fábricas de ladrillos, etc. Materia prima para la industria química.
. Gas	Maderas dura y blanda y residuos agrícolas	Para todo tipo de industrias que utilicen combustibles sólidos o líquidos, motores de combustión.
. Vinagre	Maderas dura y blanda	Conservación y condimento de carne y pescado ahumado, industria de aromas y perfumes.
. Alquitrán	Madera dura	Industria de sogas, veterinaria, medicina, brea, creosota.
. Alcohol metílico	Alcohol de madera	Acetato de metilo.
. Disolvente	Alcohol de madera	Esteres de celulosa, aglutinantes, lacas.
. Formiato de metilo	Vinagre + alcohol metílico	Esteres de celulosa, aglutinantes, lacas.
. Acetato de metilo	Vinagre + alcohol metílico	Esteres de celulosa, aglutinantes, lacas.
. Acido acético	Acido acético crudo (sin refinar)	Ind. quím., farmac., alimen., del rayón, textil y del cine, vinagre.
. Acido propiónico	Acido acético crudo (sin refinar)	Ind. farm., de la condimentación, perfumes y aromas.
. Acido butírico	Acido acético crudo (sin refinar)	Ind. farm. y de perfumes.

te al elevado rendimiento energético del proceso de carbonización, el cual puede oscilar alrededor del 80% en situaciones óptimas.

En cuanto al poder calorífico del aceite y del gas, depende de las características de la materia prima de que proceden y de los sistemas de recogida elegidos, pudiéndose considerar comprendido, por término medio, entre 4.000 y 7.500 Kcal.

No parece exagerado afirmar que la elevación de las producciones de carbón vegetal como consecuencia del incremento de las exportaciones, puede ayudar a satisfacer las necesidades energéticas de los países en vías de desarrollo al sustituir una parte de los combustibles que importan. No obstante, han de adaptarse en primer lugar las técnicas de carbonización de dichos países.

#### 8.6.3.- Exportaciones y Mercados consumidores

Se cree que el consumo de carbón vegetal aumentará en los países en vías de desarrollo una vez que mejoren sus condiciones de vida, al ser un combustible de fácil manejo y buenas propiedades.

Diversos estudios realizados demuestran que el mercado consumidor de estos países puede ser mucho mayor que en el caso de los industrializados.

En un reciente censo que se efectuó en cinco países del continente africano se encontró la cifra de 750.000 toneladas anuales. No obstante, esta cantidad es también muy dudosa al no incluirse las partidas que se queman de manera ilegal.

En ellos es también muy difícil conseguir información - acerca de la demanda industrial. Por regla general, estos mercados son más importantes en Asia y América del Sur que en Africa.

Están muy protegidos para suponer si sus exportaciones se incrementarán en el futuro.

En 1979 las diferencias de precios del carbón en los distintos continentes fueron las siguientes:

- U.S.A. ....	320 - 370 \$/t
- Europa .....	550 - 630 \$/t
- América Latina ..	27 - 95 \$/t
- Africa .....	45 - 90 \$/t

Si a estos valores se añade la cifra de 110-170 \$/t como consecuencia del acarreo, transporte terrestre y flete marítimo, se puede uno dirigir a los abundantes mercados de los países en vías de desarrollo.

Es necesario conocer bien los mercados consumidores de estos países, para poder sacar conclusiones de las exportaciones que realizan. Mientras que la disponibilidad y situación de la materia prima está perfectamente reflejada en los mapas de algunos de ellos, por el contrario muy poca información se puede obtener respecto a sus mercados consumidores.

Asimismo, hay que señalar las posibles pugnas que se pueden producir entre el carbón vegetal que se emplea con fines domésticos y el que se exporta. Algunas de ellas se han puesto de manifiesto. Por ejemplo en Somalia, país que ha exportado cantidades bastante considerables de carbón vegetal. Sin embargo, -

cuando la reducción de los recursos naturales se hizo patente, el Gobierno las prohibió allá por el año 1970. Además de los últimos descubrimientos que demostraron que tanto el exceso de malezas y pastos como la falta de riego eran la causa de la depoblación forestal, la economía de Somalia acusó la disminución de divisas que se produjo desde aquel entonces.

Pero sorprendentemente para las respectivas agencias gubernamentales, los fabricantes dirigieron de nuevo sus acciones a los arbustos y matorrales, reduciendo la demanda de leña de sus explotaciones. En otras palabras, nada cambió desde la cancelación de las exportaciones.

También parece claro el incremento del consumo anual de carbón vegetal, al haber aumentado significativamente el número de licencias de producción después de la prohibición de exportar.

Por regla general, una de las consecuencias más importantes de las exportaciones a los países industrializados es el obligar a los fabricantes a mejorar y cambiar las técnicas utilizadas.

El precio, la calidad y la formalidad ejercen una cierta presión en todo lo relacionado con esta industria.

Evidentemente, las ventajas que proporciona a los países en vías de desarrollo son la creación de un número de puestos de trabajo especializados y la mejora general de la tecnología de la zona.

Antes de resumir los aspectos positivos y negativos de las exportaciones de carbón en los países en vías de desarrollo,

se debe de contestar a la siguiente pregunta: ¿Cómo influirá la disminución de las exportaciones en aquellos países que no estén dispuestos o que no sean capaces de abandonar sus tradicionales métodos de fabricación?

Durante los últimos diez años el suministro ha sido discontínuo en la totalidad de los casos, después de un período de prueba más o menos corto.

Aunque han existido múltiples razones, destaca una sobre todas, la falta de calidad.

Entre los aspectos positivos que representan las exportaciones de carbón vegetal destacan los siguientes:

- . Adquisición de moneda fuerte.
- . Mejor administración de los recursos.
- . Propagación de una mejor tecnología.
- . Mayor calidad de los productos obtenidos.
- . Posibilidades de diversificación para la industria - existente.
- . Sustitución de la energía importada por los subproductos obtenidos en esta industria.
- . Creación de puestos de trabajo, tanto ordinarios como cualificados.
- . Financiación de la industria propia por fuentes extranjeras.

Como aspectos negativos sobresalen los siguientes:

- . Posible agotamiento de los recursos naturales.
- . Conflictos y problemas en el suministro energético de los consumidores.
- . Probable aumento en la contaminación del aire y agua.

#### 8.7.- FABRICACION DE BRIQUETAS

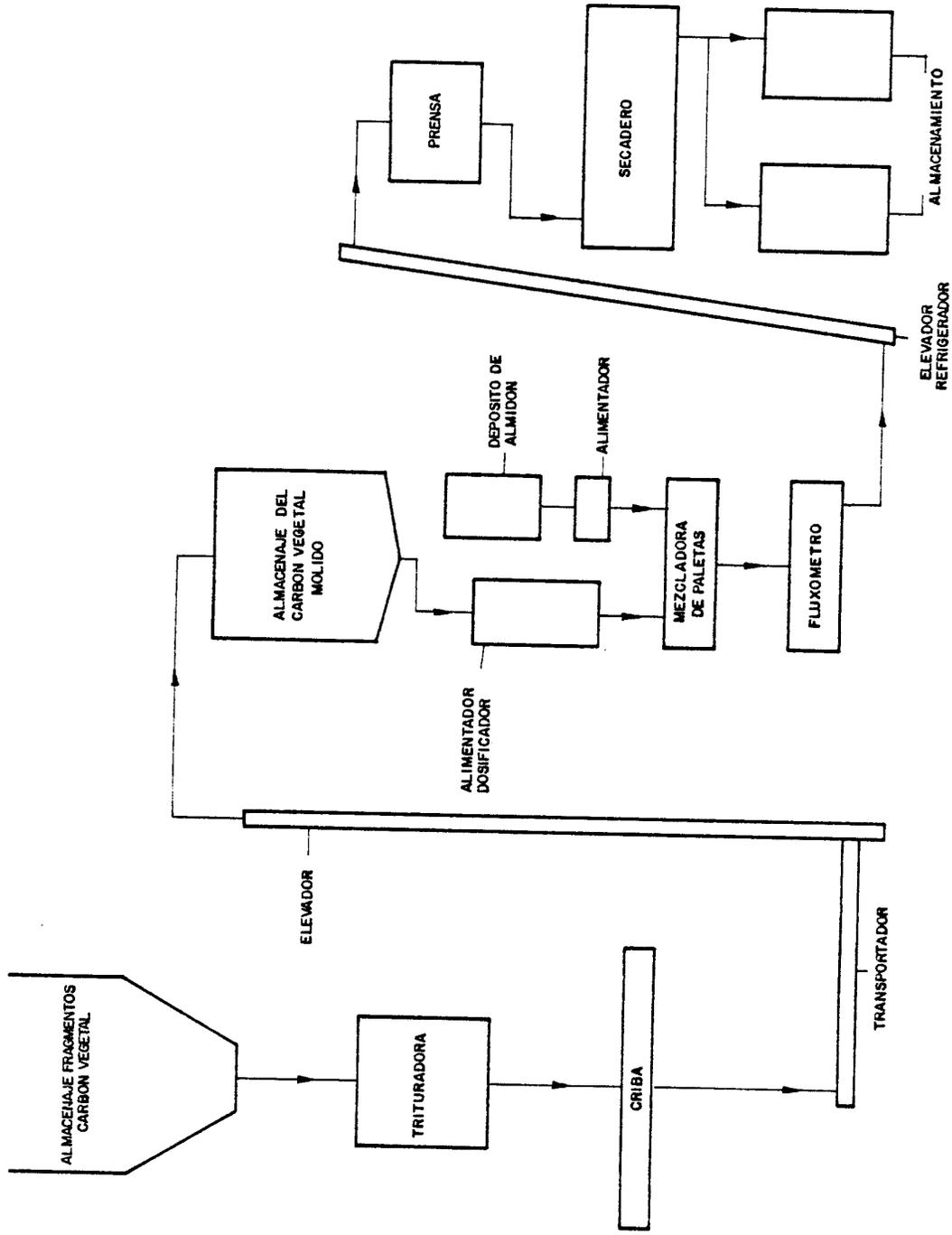
Con la creciente popularidad de las barbacoas, el empleo de las briquetas de carbón vegetal ha aumentado espectacularmente.

El proceso de aglomeración ha contribuido a popularizarlo como combustible de uso doméstico, habiendo hecho posible la penetración de sus derivados dentro de las modernas industrias de filtros y metalurgia, respectivamente.

En la Figura 58 se indica el diagrama de flujo de un proceso comercial. La velocidad de producción varía por lo general entre 1 y 3,5 toneladas de briquetas/hora. Un equipo modelo para la producción de 1 t/h incluye los siguientes elementos:

- . Una prensa con un alimentador de paletas.
- . Un equipo de alimentación de almidón.
- . Un molino de martillos.
- . Un equipo de alimentación de carbón vegetal provisto de tolva de regulación.

DIAGRAMA DE FLUJO DE UN PROCESO COMERCIAL PARA LA FABRICACION DE BRIQUETAS DE CARBON VEGETAL



- . Una mezcladora de paletas.
- . Un secadero de briquetas.
- . Una caldera.
- . Diversos transportadores.
- . Un equipo de envasado.

Por lo que respecta al proceso propiamente dicho es como sigue:

El carbón vegetal se conduce a un molino de martillos o a una trituradora por medio de un transportador de tornillo sin fin, para reducirlo a un tamaño de unos 30 mm o incluso más pequeño. A continuación se transporta mecánica o neumáticamente a una tolva o depósito de regulación, en donde se mide la cantidad de materia prima que se envía a la mezcladora de paletas - junto con un 9-10% de una solución aglutinante, tal como el almidón del maíz, el del trigo y el industrial, y agua, hasta conseguir una mezcla que contenga del 65 al 70% de carbón. Otros componentes como el serrín y los residuos menudos de la madera, se pueden añadir para lograr una quema más rápida o temperaturas más elevadas. Efectuada la agitación de la mezcla se conduce a una prensa, desde donde las briquetas, húmedas, pasan al secadero por medio de un transportador, para permanecer en el mismo por espacio de 3 a 4 horas, a una temperatura de 135°C. De esta manera se obtienen unas briquetas con un 4% de contenido de humedad.

La maquinaria de comprimir y fabricar briquetas ha alcanzado el máximo desarrollo práctico y económico. Las principa-

les etapas de una planta de este tipo son:

- . Trituración de la materia prima.
- . Mezcla de aglomerantes y lubricantes.
- . Conformación.
- . Secado.
- . Curado.

Por regla general, en el mercado se dispone de todos los equipos que se necesitan para este proceso. Sin embargo, los cam  
bios y propiedades específicas del carbón vegetal de que se par  
te, dan lugar a diversas modificaciones, bastante frecuentes y necesarias.

La inversión inicial que hay que realizar en una planta de fabricación de briquetas con una capacidad de producción de 1 t/hora, oscila entre 150.000 y 200.000 \$, aproximadamente, con un coste adicional de 80.000 \$ por cada tonelada por hora que se incrementa la producción.

Como el tiempo de quema de los aglomerados puede ser has  
ta cuatro veces superior al de los fragmentos, merced a la adi  
ción de unos aditivos incombustibles, se dispone de una firme -  
base de apoyo para la conservación de los recursos naturales.

Para el fabricante, el mayor peso específico de las bri  
quetas, le supondrá un considerable ahorro a la hora del trans-  
porte. Por otra parte, también podrá aprovechar los finos que  
hayan quedado dispersos, lo que representará un incremento de

producción próximo al 25% del total, contribuyendo de este modo a una mayor rentabilidad final.

#### 8.8.- SITUACION ACTUAL DEL CARBON VEGETAL EN ESPAÑA

Ante la escasez y falta de datos oficiales por lo que respecta a la situación del carbón vegetal en España, se han mantenido contactos con diversas entidades relacionadas con el tema, con el fin de adquirir una panorámica global conjunta.

De las impresiones obtenidas a lo largo de dichos contactos se pueden extraer las siguientes consideraciones:

##### . Producción

Entre los principales fabricantes de carbón vegetal hay que señalar:

- EL IRATI FORESTAL, S.A. (Pamplona)
- DERIVADOS FORESTALES DE CATALUÑA (Barcelona)
- HERMANOS GUTIERREZ (Salamanca)
- CAVEDESA (Badajoz)
- CARBOGE (Huelva y Sevilla)
- INTERCERE (Extremadura)

La producción total actual oscila alrededor de las 160.000 t/año. De esta cantidad, un 30-35% aproximadamente se exporta, mientras que el resto se utiliza en el mercado interior, tanto en la industria como para barbacoas.

En una primera aproximación se puede considerar distribuida la producción nacional de carbón vegetal de la siguiente forma:

- Para la industria .....	80.000 t/año
- Para barbacoas .....	30.000 "
- Para exportar .....	50.000 "
Total .....	<u>160.000 t/año</u>

#### . Comercialización

Como principales comercializadores de carbón vegetal se encuentran, además de los productores anteriormente citados, - las siguientes compañías:

- TEBA (Zaragoza)
- UNIDESA (Madrid)
- AVELINO PEREZ, S.A. (Madrid)

#### . Exportación

Dentro del mercado exportador de carbón vegetal destacan las siguientes compañías:

- TEBA .....	20.000-25.000 t/año	(la mayor parte al mercado centroeuropeo)
- UNIDESA .....	2.000- 3.000 t/año	(principalmente al mercado centroeuropeo)
- CAVEDESA .....	6.000-10.000 t/año	(principalmente a Francia y algo a Italia)
- IRATI FORESTAL,S.A.	8.000 t/año	(fundamentalmente a Francia)
- El resto no llega a	<u>10.000 t/año</u>	
Total .....	40.000-50.000 t/año	

Conviene señalar que el 80% aproximadamente del carbón vegetal que se exporta a Centro Europa se utiliza para barbacoas, mientras que el que se vende a Francia e Italia se destina a usos industriales.

En los últimos años, el ritmo de crecimiento anual de la exportación ha oscilado en torno a un 20%.

. Consumo

El mercado nacional se puede considerar distribuido de la siguiente forma:

- Para barbacoas se utilizan unas 30.000 t/año, es decir, alrededor de un 20% de lo que se produce.
- Para siderurgia se emplea como reductor, prácticamente el resto, dentro de los siguientes campos:

. En las fábricas de acero:

- ALTOS HORNOS DE VIZCAYA .....	3.000 t/año
- ALTOS HORNOS DE SAGUNTO .....	3.000 "
- ENSIDESA .....	3.000 "
- ECHEVARRIA .....	2.000 "

. En las fábricas de ferroaleaciones:

- CARBUROS METALICOS (La Coruña)	6.000 t/año
- SEFESA (Bilbao) .....	12.000 "
- CEDIE (Santander) .....	6.000 "
- FESA (Medina del Campo) .....	2.000 "
- HIDRO NITRO ESPAÑOLA (Huesca)	4.000 "

. En las fábricas de metales:

- ALUMINIO DE GALICIA (La Coruña)	12.000 t/año
- ALUMINIO ESPAÑOL (San Ciprián)	12.000 "
- SILICIO DE SABON (La Coruña) ...	18.000 "

- Pequeñas cantidades se consumen también en algunas fundiciones, fábricas de pintura, fábricas de discos abrasivos, cementeras, industrias de filtros, etc.

. Tamaño

El 80% del carbón vegetal que se emplea en la Industria es de un tamaño superior a 20 mm, mientras que el 20% restante es inferior a este valor.

En la industria de los metales Silicio y Aluminio se consume todouno exento de finos, eliminándose las partículas de tamaño inferior a 5 mm.

En las fábricas de ferroaleaciones se emplean dos tamaños de carbón vegetal: entre 5 y 15 mm y entre 30 y 100 mm, respectivamente.

En las fábricas de acero se utiliza todouno exento de finos.

Para las barbacoas, todo el carbón vegetal que se maneja tiene un tamaño comprendido entre 30 y 80 mm, distribuyéndose - por lo general en bolsas de 2, 3, 4 y 5 kg.

Las partículas de carbón inferiores a 5 mm no se pueden emplear directamente con fines energéticos, por lo que se sue

len moler y aplicar para pinturas, filtros y discos abrasivos.

También se pueden usar en plantas de fabricación de ovoides para quemarlos en las cementeras.

. Precio

El 90% del carbón vegetal de las siguientes características:

- Carbono fijo ..... 70% como mínimo
- Volátiles ..... 20% como máximo
- Cenizas ..... 12% como máximo
- Humedad ..... 8% como máximo

una vez clasificado, se paga en origen, es decir, sobre almacén de fabricante, a un precio comprendido entre 12 y 15 pts/kg. Hidro Nitro Española, S.A. está pagando actualmente a 12.000 pts/t.

El precio mínimo sobre almacén de fabricante es en la actualidad de 8 pts/kg.

El precio de 22-25 pts/kg que se paga en algunas ocasiones por un carbón vegetal de excelente calidad, con más de un 90% de carbono fijo y un contenido en cenizas inferior al 1%, como es el caso del producido por el IRATI FORESTAL, es poco frecuente, por lo que no se puede considerar representativo.

### 9.- ACEITE DE PIROLISIS

Otro de los productos que se obtienen en la pirólisis de los materiales celulósicos y ligninocelulósicos es un crudo o aceite. Difiere en muchos aspectos de los combustibles derivados del petróleo, según se puede observar en la Tabla 30. Los aceites procedentes de diversos compuestos celulósicos, como - por ejemplo los residuos sólidos urbanos, son líquidos complejos constituidos por un gran número de sustancias de peso molecular comprendido entre 32 y 10.000, y punto de ebullición entre 55 y 300°C. De ellos solo se pueden destilar la mitad, aproximadamente. Su contenido en oxígeno es muy alto, con una relación C/O comprendida entre 1 y 2. En algunas ocasiones a estos aceites se les denomina líquidos orgánicos altamente oxigenados. Son de color parduzco y olor picante.

En la Tabla 31 se indican los análisis finales de los aceites obtenidos en el proceso de pirólisis de diversos compuestos, tales como la cáscara de arroz, la paja, las cáscaras y cortezas de abeto y una mezcla de serrín, cáscaras y cortezas de pino. La fracción soluble en agua se puede concentrar o extraer mediante disolventes.

En la Tabla 32 se reflejan los constituyentes más característicos del aceite obtenido a partir de maderas blandas. Por otra parte, en la 33 se muestran algunas de las más importantes propiedades del aceite producido en el reactor Tech-Air al uti

lizar como materia prima una mezcla de 70% de cáscaras y cortezas de pino y 30% de serrín de pino. Asimismo se realizaron una serie de ensayos con cáscaras de cacahuete y con serrín. En las Tablas 34 y 35 se pueden contemplar los datos a nivel de laboratorio que se obtuvieron, tanto con la materia prima como con el carbón, aceite y gas resultantes.

Algunas de las observaciones relativas al aceite de pirólisis y que han de tenerse en cuenta desde un punto de vista industrial son las siguientes:

- Son líquidos ácidos, con un pH comprendido entre 2,2 y 3,5 - aproximadamente. Esta acidez se debe principalmente a los ácidos carboxílicos como consecuencia de la presencia de los ácidos glicólico, málico, acrílico, fórmico y acético. Por este motivo se almacenan por regla general en depósitos resistentes a la corrosión. No obstante, en ensayos de combustión no se produjo corrosión de las cámaras de combustión ni de las conducciones.
- Las densidades de los aceites procedentes de la pirólisis de materiales predominantemente celulósicos son un 30-50% superiores a las del fuel-oil. Cuando se compara la densidad de los aceites obtenidos a partir de la cascarilla de arroz, de la cáscara y corteza de abeto, y de los residuos sólidos urbanos, se observa que el aceite de la cascarilla de arroz es menos denso que los otros dos. Los datos que indican la relación existente entre la densidad y el contenido de humedad de la materia prima, a la temperatura del lugar, demuestran que a medida que la humedad se incrementa la densidad disminuye. Así por ejemplo, el aceite obtenido de la cáscara y corteza de abeto posee una densidad de 1,31 para un contenido de humedad de la materia prima de un 10%. A medida que este valor au

menta, hasta alcanzar un 20%, la densidad del aceite descien  
de hasta 1,28.

- Contienen muy poco azufre o están exentos de él, por lo que cuando se mezclan con combustibles derivados del petróleo, el contenido total de la mezcla disminuye. Por ello, al encender se estas mezclas emiten menos cantidades de anhídrido sulfuroso.
- El aceite de pirólisis y el carbón vegetal se pueden mezclar como suspensión y utilizarse en las calderas.
- También representan una importante fuente potencial para la producción de plásticos, protectores de la madera y adhesivos. En ocasiones se cree que su valor para tales aplicaciones so  
brepasará al del combustible.
- Se han realizado varios esfuerzos a corto plazo para lograr el funcionamiento de los motores diesel con este tipo de aceite, los cuales acabaron por fracasar.
- Los resultados de los ensayos que se realizaron con el aceite obtenido a partir de una mezcla constituida por un 70% de corte  
za y cáscara de pino y un 30% de serrín de pino, demostra  
ron que dicho aceite contenía un 15% de agua y en un estado de buena dispersión. Su poder calorífico osciló alrededor de un 60-70% respecto al del fuel-oil.
- Las características de combustión del aceite procedente de la pirólisis de las cáscaras, cortezas y serrín de pino no cam  
biaron después de almacenarlo durante ocho meses a 0°C y a la temperatura ambiente, respectivamente. Sin embargo, su viscosi

alidad disminuyó según se puede contemplar en el siguiente cuadro:

Viscosidad aproximada del aceite (centipoises)

<u>Temperatura del aceite (°C)</u>	<u>Muestra A Valor ini cial</u>	<u>Muestra B Almacenada duran te 8 meses a 0°C</u>	<u>Muestra C Almacenada durante 8 meses a la tempe ratura ambiente</u>
30	250	200	100
40	125	125	50
50	90	50	35

- Se ha observado que el aceite empieza a degradarse y descomponerse a la temperatura de 200°C, aproximadamente.
- Los disolventes de este tipo de aceite son los caústicos acuosos diluidos y los oxigenados, tales como el dietilenglicol, los celulósicos y los carbitoles. El agua y el aceite de pirólisis son miscibles en la proporción de 4 a 1. Por encima de esta relación precipitarán los sólidos mientras el 60% del aceite permanecerá disuelto en el agua.

TABLA N° 30.- Propiedades típicas de los aceites procedentes de la pirólisis de la madera y de los combustibles derivados del petróleo (Fuel-oil)

Propiedades	Aceites de pirólisis de la madera (1)		Fuel-oil (2)	
	Condensador	Ventilador de tiro	# 2	# 6
Contenido en agua (%)	14	10,4	Trazas	2
Kcal/kg	5.055	5.883	10.905	10.327
Kcal/dm <sup>3</sup>	5.772	6.515	9.280	9.913
Densidad (gr/ml)	1,142	1,108	0,851	0,960
Punto de congelación (°C)	26,6	26,6	-17,7 máx.	18,3-29,4
Punto de inflamación (°C)	111,6	115,5	37,7 min.	65,5
Viscosidad (CP) (3)	225	233	20	2.262
Análisis elemental:				
. carbono (%)	51,2	65,6	86,1	87
. hidrógeno (%)	7,6	7,8	13,2	11,7
. nitrógeno (%)	0,8	0,9	-	-
. azufre (%)	<0,01	<0,01	0,6-0,8	0,9-2,3

- (1) Los valores se obtuvieron en aceites con el contenido de humedad indicado.
- (2) Los valores para el fuel-oil se consideran típicos. El contenido en azufre variará según su procedencia u origen.
- (3) Se determinó con el viscosímetro Brookfield, Modelo LV, con un sistema Thermosel a 25°C y 60 r/min.

Referencia: "Wood oil from pyrolysis of Pine Bark-Sawdust mixture"

TABLA N° 31.- Análisis finales de los aceites procedentes de la pirólisis de diversos compuestos

Componente	Cascarillas de arroz	Paja	Cáscara y corteza de abeto	Cáscara, corteza y serrín de pino
Carbono	62,4	58,6	60,5	49,4
Hidrógeno	5,8	5,6	6,0	4,7
Nitrógeno	1,4	1,3	0,5	0,16
Azufre	0,1	0,1	0,1	-
Oxígeno	29,4	33,9	30,7	19,7
Cloro	0,3	0,1	0,2	-
Cenizas	0,6	0,5	2,1	0,04
Kcal/kg	5.777	5.222	5.722	5.045
Rendimiento en aceite (%)	44,2	35,7	28,7	-
Contenido en agua (%)	11,2	19,9	15,2	26,0
Densidad(kg/dm <sup>3</sup> )	-	-	-	1,18-1,23

Referencias: "From Garbage-oil"

"A Vertical bed Pyrolysis system".

TABLA N° 32.- Constituyentes más característicos de los aceites de pirólisis, obtenidos de maderas blandas

<u>Compuesto químico</u>	<u>%</u>
Alcohol isobutílico .....	0,76
I-Butanol .....	1,95
Furfural .....	1,81
Alcohol de furfural .....	1,45
5-Metilfurfural .....	0,62
2-Octanol .....	2,18
Fenol .....	4,63
Guayacol .....	5,15
O-Creosol .....	1,02
M y P-Creosol .....	7,90
Naftalina .....	1,24
2-Metoxi - 4-Metilfenol .....	12,98
Dimetilfenol .....	1,29
2-Metoxi - 4-Etilfenol .....	2,19
2-Hidroxi - 4-Metoxibenzaldehido	2,82
Eugenol .....	1,69
2-Metoxi 4-Propilfenol .....	1,17
Isoeugenol .....	8,91

**TABLA N° 33**

**Propiedades de los aceites obtenidos de la pirólisis de la madera en el reactor "Tech-Aur" con una capacidad de tratamiento de 50 t de materia seca/día**

Propiedad	Aceite del condensador	Aceite del ventilador de tiro	Método
Densidad	1,1415 gr/ml	1,1075 gr/ml	ASTM D 95-70
Contenido de agua (°/o en peso)	14	10,4	
Poder calorífico (Sobre base húmeda)	5,056 cal/gr	5,883 cal/gr	ASTM D 240-64
pH	2,9	3,3	5°/o de aceite dispersado en agua
Índice de acidez	75 mg KoH/gr	31 mg KoH/gr	ASTM D 664-58
Punto de inflamación	111° C	121° C	ASTM D 93-73
Sólidos filtrables (°/o en peso)	0,3	0,4	Insoluble en acetona
Punto de congelación	26,7° C	26,7° C	ASTM D 97-66
Azúfre (°/o en peso)	< 0,01	< 0,01	ASTM D 129-64
Cenizas (°/o en peso)	0,08	0,03	-
Destilación			
1ª caída	98° C	101° C	ASTM D 86
10°/o del punto	103° C	105° C	Grupo 3
48°/o del punto final	NA	265° C	-
53°/o del punto final	282° C	NA	-
Solubilidad (°/o en peso)			
En acetona	99,6	99,5	-
En cloruro de metileno	93,5	97,8	-
En tolueno	Escasa	Escasa	-
En Hexano	Escasa	Escasa	-
Análisis Elemental (°/o en peso)			
Carbono	51,2	65,6	-
Hidrógeno	7,6	7,8	-
Nitrógeno	0,8	0,9	-

**Variación de las propiedades del Aceite después de un período de 8 Meses**

Propiedad	Aceite del condensador	
	Valor inicial	8 Meses de almacenamiento
Contenido en agua (°/o en peso)	14	20,5
Poder calorífico (Sobre base húmeda)	5,056 cal/gr	5,444 cal/gr
Índice de acidez	75 mg KoH/gr	87 mg KoH/gr
Viscosidad (1)	275 CP	350 CP
pH	2,6	3,4
		Temperatura ambiente
		24,1

Propiedad	Aceite del ventilador de tiro	
	Valor inicial	8 Meses de almacenamiento
Contenido en agua (°/o en peso)	10,4	15,5
Poder calorífico (Sobre base húmeda)	5,883 cal/gr	5,922 cal/gr
Índice de acidez	31 mg KoH/gr	71 mg KoH/gr
Viscosidad (1)	233 CP	79 CP
pH	3,3	3,1
		Temperatura ambiente
		12,7

(1) Se determinó con el Viscosímetro Brookfield, Modelo LV, con un sistema Thermosel a 25° C y 60 r/min.

Referencia "Wood oil from pyrolysis of Pine Bark -Sawdust mixture".

TABLA N° 34.- Análisis de laboratorio realizados con cáscaras de cacahuete

Elemento	Unidad	Materia prima	Carbón vegetal (1)	Aceite (2)	GAS	
					Componentes incondens.	Composición (%) (3)
Agua	%	4,6	0,6	16,1	N <sub>2</sub>	41,90
Cenizas	%	2,3	9,8	-	CO	24,51
					CO <sub>2</sub>	8,14
Cenizas insolubles en ácidos	%	-	-	-	H <sub>2</sub>	15,07
					CH <sub>4</sub>	8,91
Carbono	%	47,3	73,6	57,6	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,65
Hidrógeno	%	5,7	1,8	8,6	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-
Nitrógeno	%	1,2	2,7	6,5	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,78
Oxígeno (4)	%	43,5	12,1	27,3	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	-
Poder calorífico	MJ/Kg	18,99	29,82	25,01	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-

(1) Los elementos volátiles del carbón vegetal contienen probablemente muy poca cantidad de agua, estando constituidos principalmente por hidrocarburos.

(2) Los análisis de C, H, N, O y el poder calorífico se han realizado en el aceite con el contenido de humedad indicado.

(3) La composición es en volumen, no en peso.

(4) Cálculo del oxígeno:  $O_2 = 1 - N_2 - C - H_2$

Referencia: "Fuel storage: Bark Sawdust, Chips and other green residues"

TABLA N° 35.- Análisis de laboratorio realizados con serrín

Elemento	Unidad	Materia prima	Carbón vegetal (1)	Aceite (2)	GAS	
					Componentes incondens.	Composición (%) (3)
Agua	%	22,3	1,5	26,1	N <sub>2</sub>	53,26
Cenizas	%	4,6	13,6	-	CO	17,03
Cenizas insolubles en ácidos	%	1,4	4,4	-	CO <sub>2</sub>	11,31
Carbono	%	48,3	74,8	53,6	H <sub>2</sub>	12,84
Hidrógeno	%	5,9	1,5	9,1	CH <sub>4</sub>	4,40
Nitrógeno	%	1,2	0,8	1,1	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,41
Oxígeno (4)	%	40,0	10,3	36,2	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,50
Poder calorífico	MJ/kg	20,39	27,77	26,18	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,09
					C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0,18
					C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-

(1) Los elementos volátiles del carbón vegetal contienen probablemente muy poca cantidad de agua, estando constituidos principalmente por hidrocarburos.

(2) Los análisis de C, H, N, O y el poder calorífico se han realizado en el aceite con el contenido de humedad indicado.

(3) La composición es en volumen, no en peso.

(4) Cálculo del oxígeno:  $O_2 = 1 - N_2 - C - H_2$

Referencia: "Fuel Storage: Bark Sawdust, Chips and other green residues"

## 10.- GAS DE PIROLISIS

La composición y calidad (poder calorífico) del gas obtenido en la pirólisis variará con el tipo de proceso que se elija, con la temperatura y presión del mismo, así como con la naturaleza y características de la materia prima que se utilice.

En un reactor vertical de calentamiento directo, funcionando a la presión atmosférica y a baja temperatura, se producirá un gas de bajo poder calorífico ( $700-1.350 \text{ Kcal/Nm}^3$ ). Por el contrario en otro de calentamiento indirecto se generará un gas de poder calorífico medio ( $2.225-2.650 \text{ Kcal/Nm}^3$ ).

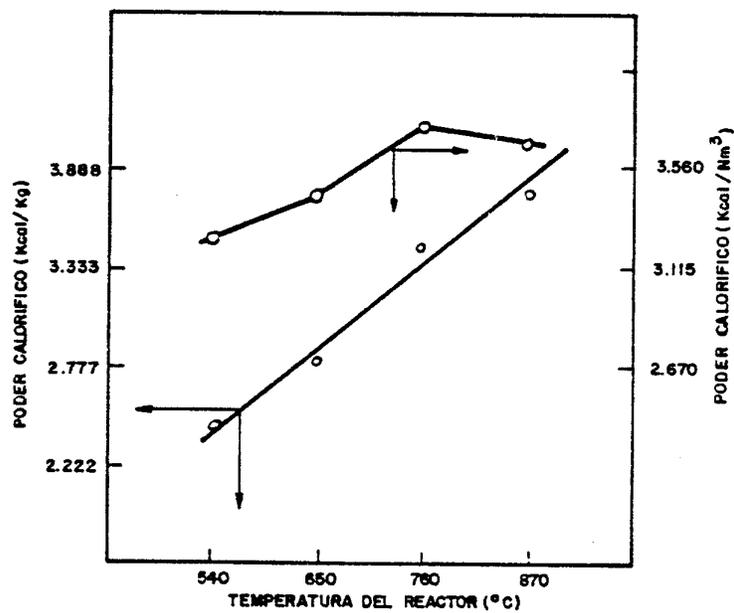
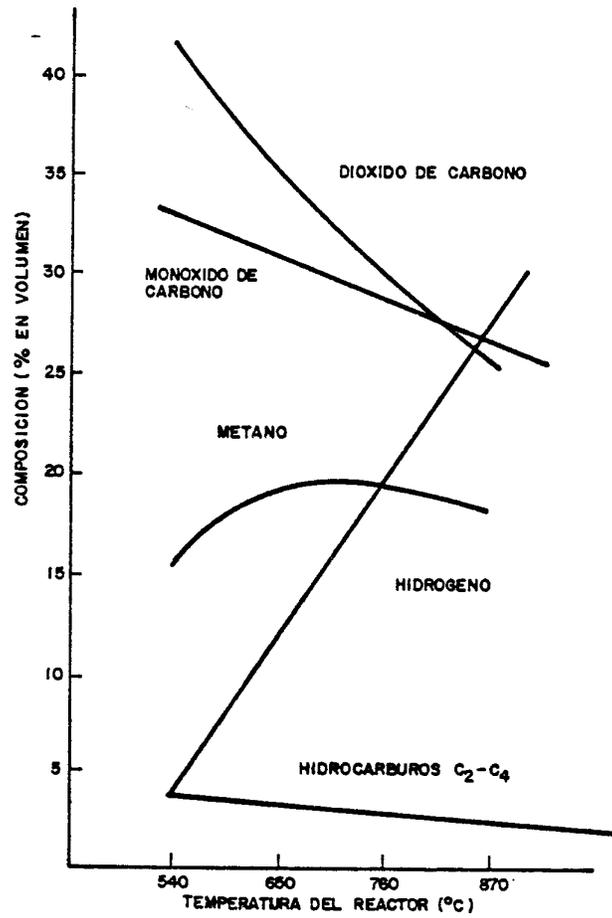
En la figura 59 se reflejan los resultados de unos ensayos de pirólisis realizados con serrín de pino.

El gas de bajo poder calorífico se puede utilizar directamente en una caldera o en cualquier cámara de combustión, con un pequeño ajuste de la relación combustible/aire. Durante la Segunda Guerra Mundial se empleó en Europa para los motores diesel y de gasolina de los coches y camiones, así como para los estacionarios.

El gas de poder calorífico medio se puede usar al igual que el gas natural, pudiéndose también transformar en metano.

Cuando el gas se utiliza directamente en una cámara de

RESULTADOS DE UNOS ENSAYOS DE PIROLISIS REALIZADOS CON SERRIN DE PINO



combustión no necesita depurarse, con el consiguiente aprovechamiento de su calor sensible. Sin embargo, para su empleo en motores se ha de enfriar y depurar previamente.

11 . - ESTUDIO TECNICO ECONOMICO DE IMPLANTACION DE UNA UNIDAD DE CARBONIZACION-GASIFICACION EN ESPAÑA

11.1.- INTRODUCCION

Tomando como base los datos recogidos en capitulos anteriores sobre capacidad de generación de residuos forestales en diferentes zonas de España (Ver Anejo nº 2) y experiencias obtenidas por empresas extranjeras dedicadas a la producción y comercialización de carbon vegetal (ver Anejo nº 3) se ha llegado a plantear la conveniencia de realización de un estudio técnico-económico sobre una ó varias plantas de producción de carbón vegetal en base a la utilización con este fin, de residuos forestales astillados procedentes de limpieza de bosques o aclareo de los mismos.

Para ello, ha sido seleccionado el proceso Carbotécnica, descrito en el apartado 7.15., por razones de simplicidad de operación y mínimo costo de inversión.

Puestos en contacto con esta firma, se encargó un estudio previo de viabilidad que se adjunta como Anejo nº 4.

Para la ejecución de este estudio, se visitaron diferentes empresas que pudiesen estar interesados en la posible implantación de una o varias unidades de gasificación-carbonización, llegándose a seleccionar las firmas, GRESIBER de Plasencia (Cáceres) y CEMENTOS EL LEON de Matillas (Guadalajara).

Sobre los datos de necesidades energéticas, continuidad de marcha y disponibilidad de residuos de ambas zonas, aportados por ambas firmas, se realizaron los correspondientes anteproyectos.

Estos anteproyectos, se toman aquí como base del presente estudio técnico-económico.

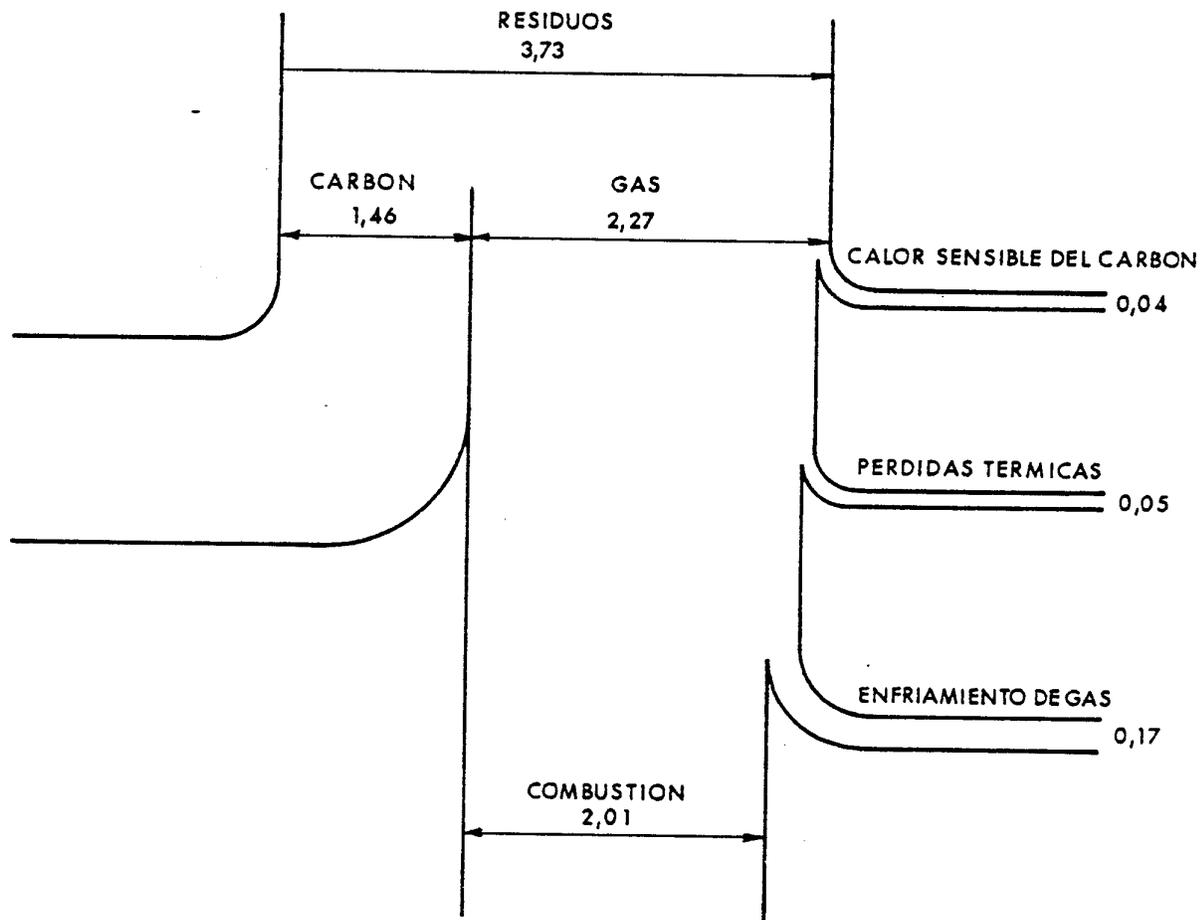
## 11.2.- DATOS TECNICOS BASICOS

### 11.2.1.- Unidad de carbonización-gasificación

Según la información obtenida por Carbotécnica los datos técnicos de operación de una unidad de gasificación-carbonización son los siguientes:

- Capacidad de transformación: 1000 kg/h de residuos forestales con 15% de humedad.
- Productos obtenidos:
  - . Gas combustible: 1000 kgs/h de gas de 2000 Kcal/kg - equivalente a  $2 \cdot 10^6$  Kcal/h.
  - . Carbón vegetal: 200 kgs/h de carbón de 6.500 Kcal/kg equivalente a  $1,3 \cdot 10^6$  Kcal/h.

El balance térmico expresado en Gcal/h de la unidad de gasificación es el siguiente:



Debe tenerse en cuenta que, dentro de ciertos límites, podrá variarse la relación gas/carbón, desplazando en función de las necesidades de cada momento la generación de uno u otro combustible. No obstante, en nuestros cálculos de rentabilidad, - mantendremos las cifras de generación de gas y carbón ya indicadas.

### 11.2.2.- Necesidades energéticas

Durante las visitas realizadas a GRESIBER en Plasencia y a CEMENTOS EL LEÓN en Matillas, hemos obtenido los datos respecto a la posible sustitución de combustible que se expresan a continuación.

#### a) GRESIBER, S.A.

En un atomizador-secador, utilizan gasoleo.

Este equipo tiene un consumo específico de 477 Kcal/kg de producto y trata 4.000 Kgs/h. El consumo horario es por tanto, de  $4000 \times 477 = 1,908.10^6$  Kcal/h, lo cual justifica la instalación de una unidad de gasificación-carbonización.

El consumo de gasoleo mensual resulta del siguiente cálculo:

El consumo específico de 477 Kcal/kg, corresponde a un consumo de 0,053 litros de gasoleo/kg (Poder calorífico del gasoleo 9.000 Kcal/l),

El consumo horario resulta ser de  $4000 \times 0,053 = 212$  l de gasoleo/hora.

Consumo mensual:  $212$  l de gasoleo/hora  $\times$   $24$  h/día  $\times$   $19$  d/mes =  $96.672$  l de gasoleo/mes.

Esta cifra calculada, se corresponde con la cifra de consumo aproximado facilitada por GRESIBER de  $100$  t/mes.

b) CEMENTOS EL LEON, S.A.

Utiliza fuel-oil en el secadero de clinker y gasoleo en un secadero de carbón.

El consumo específico del secadero de clinker es de 200 Kcal/kg de clinker con una producción diaria de 240 t lo que representa unas necesidades energéticas de  $4,8 \times 10^7$  Kcal/día que coincide exactamente con la capacidad de producción de una unidad de gasificación.

El consumo diario de fuel-oil es de 4.800 kgs que sobre 360 d/año de trabajo supondría el ahorro de 1.728 t/año de este combustible y cuyo costo a 27.000 pts/t supone 46,64 MPts.

11.3.- DESCRIPCION TECNICA DE LAS INSTALACIONES

Como consecuencia de las visitas realizadas a las firmas GPESIBER de Plasencia y CEMENTOS EL LEON de Matillas, se recogieron datos relativos a la disponibilidad de terrenos y aprovechamiento de infraestructura existente para la eventual instalación de una unidad de gasificación-carbonización.

En base a estos datos, se han realizado los planos de anteproyecto nº 01-100-09 y 01-101-09 para ambas alternativas.

Cada una de las instalaciones dispondrá de:

- Local de almacenamiento de residuos triturados
- Sistema de alimentación de residuos
- Tolva secadora
- Alimentación de residuos a la unidad de gasificación
- Descarga y enfriamiento del carbón

- Alimentación de carbón a silo de almacenamiento
- Conducto de gas y quemador
- Ventilador de aire caliente para secado del residuo
- Sistema contra incendios

En el siguiente capítulo, al valorar las inversiones, se indican con detalle las características particulares de cada equipo.

#### 11.4.- CALCULO DE INVERSIONES

Realizaremos por separado, el cálculo de inversiones para cada una de las plantas consideradas.

##### 11.4.1.- Planta de Gresiber (Plasencia)

Plano de anteproyecto o1-100-09.

	<u>Inversión estimada</u> (x10 <sup>6</sup> Pts)
Ref. 1 - Almacén de residuos	
Superficie cubierta 160 m <sup>2</sup> , altura 9 m, con puertas para acceso de camiones y <u>ca</u> rril para puente-grua .....	4
Ref. 2 - Puente-grua	
Carga de elevación 2000 kgs, luz entre - apoyos 10 m, longitud de desplazamiento 16 m con cuchara bivalva de 1,5 m <sup>3</sup> a 2 m <sup>3</sup> para 600 kgs de carga útil, altura de <u>des</u> carga 6 m. Potencia instalada 10 CV ....	6
Ref. 3 - Tolva de descarga	
Capacidad 15 m <sup>3</sup> . Construida en chapa, con refuerzos, situada sobre tolva secadora .	0,3

	<u>Inversión estimada</u> <u>(x10<sup>6</sup> Pts)</u>
Ref. 4 - Tolva secadora	
Capacidad 15 m <sup>3</sup> . Construida en chapa, con refuerzos y tubuladuras para entrada de aire caliente, con estructura metálica de apoyo .....	0,4
Ref. 5 - Extractor-dosificador	
Tipo extractor vibrante. Longitud 4 m. Potencia de motor 1 CV .....	0,3
Ref. 6 - Cinta transportadora	
Longitud 4,5 m ancho de banda 400 mm, producción 6 m <sup>3</sup> /hora, potencia de accionamiento, 2 CV .....	0,2
Ref. 7 - Elevador de cangilones	
Altura entre ejes 10 m. Con escalera de acceso a cabeza de accionamiento, tipo de cadenas, carga por drenado caudal 6 m <sup>3</sup> /h. Potencia de accionamiento 1,5 CV .....	1,5
Unidad de gasificación-carbonización compuesta por:	
Ref. 8 - Tolva de alimentación	
Ref. 9 - Alimentador-dosificador	
Ref. 10 - Chimenea	
Ref. 11 - Cámara de gasificación con refractario.	
Ref. 12 - Estructura soporte	
Ref. 13 - Compuerta de descarga	
Ref. 14 - Extractor-dosificador	
Ref. 15 - Enfriadores de carbón	
Potencia instalada, 5 CV .....	17,2

	<u>Inversión estimada</u> <u>(x10<sup>6</sup> Pts)</u>
Ref. 16 - Transportador de carbón horizontal	
Tipo tornillo sin-fin, longitud entre bocas de carga y descarga 2,5 m, caudal 2 m <sup>3</sup> /h, - diámetro 200 mm. Potencia instalada 1 CV ...	0,25
Ref. 17 - Transportador de carbón inclinado	
Tipo tornillo sin-fin, longitud entre bocas de carga y descarga 9,5 m, caudal 2 m <sup>3</sup> /h, - diámetro 200 mm, inclinación 20°. Potencia instalada 1,5 CV .....	0,55
Ref. 18 - Elevador de cangilones	
Altura entre ejes 15,5 m. Con escalera de acceso a cabeza de accionamiento, tipo de cadenas, carga por drenado, caudal 2 m <sup>3</sup> /h. Potencia instalada 2 CV .....	2,4
Ref. 19 y 20 - Silo de carbón con apoyos	
Construcción en chapa, capacidad 65 m <sup>3</sup> con - válvula de descarga, estructura de apoyo y detectores de nivel de máxima y mínima .....	1,6
Ref. 21 - Enfriador de gas	
Compuesto por dos tubos concéntricos de 300 y 400 mm de diámetro, longitud 13,5 m con - aislamiento exterior .....	0,3
Ref. 22 y 26 - Conducto de gas y soportes	
Tubo de Ø 300 mm longitud 18 m con aislamiento y soportes al suelo .....	0,3
Ref. 23 - Ventilador de gas	
Caudal 5000 Nm <sup>3</sup> /h, presión 120/150 mm c.a. - Potencia instalada 5 CV .....	0,5

	<u>Inversión estimada</u> <u>(x10<sup>6</sup> Pts)</u>
Ref. 24 - Mechero	
Para utilización del gas en la cámara de combustión existente .....	0,65
Ref. 25 - Ventilador de aire y conductos	
Caudal 5000 Nm <sup>3</sup> /h, presión 120/150 mm c.a. con tubería de 300 mm entre intercambiador de calor y tolva secadora. Potencia instalada 5 CV .....	0,7
Inversión total en equipo mecánico .	<u>37,15</u>
Instalación eléctrica, centro de control de motores y cuadro de maniobra (10% del equipo mecánico) .....	3,71
Obra civil de zapatas de apoyo de equipos pavimentos y albañilería (coste estimado)	5,0
Red de incendios .....	3,0
Transporte y montaje del equipo mecánico (30% del valor de los equipos) .....	<u>11,15</u>
Inversión del equipo montado .....	60,01
Costos de puesta en marcha (tiempo estimado 2 meses).....	5,00
Repuestos para 2 años de explotación (5% de la inversión en equipo mecánico y eléctrico) .....	2,05
Ingeniería (13% de la inversión del equipo montado) .....	7,80
Imprevistos (15% de la inversión) ,.....	<u>9,00</u>
Suma total .....	83,86
Impuestos e I.T.E. (5%) .....	<u>4,19</u>
INVERSION TOTAL ....	88,05

11.4.2.- Planta de Cementos EL LEON (Matillas)

Plano de anteproyecto nº 01-101-09

	<u>Inversión estimada</u> <u>(x10<sup>6</sup> Pts)</u>
Ref. 1 - Almacén de residuos	
Acondicionamiento del almacén existente de 120 m <sup>2</sup> con pavimento nuevo, demolición de paredes interiores y excavación de fosa ..	0,75
Ref. 2 - Tolva de recepción	
Construida en chapa, capacidad 5 m <sup>3</sup> .....	0,20
Ref. 3 - Alimentador-extractor de cinta	
Capacidad 1.500 kgs/h, ancho 500 mm longitud entre ejes 2 m. Potencia 1,5 CV .	0,40
Ref. 4 - Elevador de cangilones	
Altura entre ejes 11 m, con escalera de acceso a cabeza de accionamiento, tipo de cadenas carga por drenado, caudal 6 m <sup>3</sup> /h. Potencia de accionamiento 1,5 CV .....	1,60
Ref. 5 - Tolva secadora con tornillo de reparto	
Tolva metálica cerrada de 40 m <sup>3</sup> , con tornillo superior de alimentación y estructura soporte al suelo .....	1,80
Ref. 6 - Extractor-dosificador	
Tipo extractor vibrante. Longitud 4 m potencia de motor 1 CV .....	0,30
Ref. 7 - Cinta transportadora	
Longitud 4,5 m, ancho de banda 400 mm, producción 6 m <sup>3</sup> /h, potencia de accionamiento 2 CV .....	0,20

Inversión estimada  
(x10<sup>6</sup> Pts)

---

Ref. 8 - Elevador de cangilones

Altura entre ejes 12 m con escalera de acceso a cabeza de accionamiento, tipo de cadenas, carga por drenado, caudal 6 m<sup>3</sup>/h. Potencia de accionamiento 1,5 CV ..... 1,7

Ref. 9 - Cámara de gasificación y carbonización compuesta por:

Tolva de alimentación  
Alimentador dosificador  
Chimenea  
Cámara de gasificación con refractario  
Estructura soporte  
Compuerta de descarga  
Extractor dosificador  
Enfriadores de carbón  
Potencia instalada: 5 CV ..... 17,2

Ref. 10 - Transportador de carbón horizontal

Tipo tornillo sin-fin, longitud entre bocas de carga y descarga 10 m, caudal 2 m<sup>3</sup>/h, diámetro 200 mm. Potencia instalada 1,5 CV . 0,55

Ref. 11 - Transportador de carbón inclinado

Tipo tornillo sin-fin, longitud entre bocas de carga y descarga 9 m, caudal 2 m<sup>3</sup>/h, con bocas de descarga intermedias, diámetro 200 mm. Potencia instalada 1,5 CV ..... 0,55

Ref. 12 - Elevador de cangilones

Altura entre ejes 9,5 m. Con escalera de acceso hasta plataforma de cabeza, tipo de cadenas, carga por drenado, caudal 2 m<sup>3</sup>/h, potencia instalada 2 CV ..... 1,5

Ref. 13 - Transportador de carbón sobre silo

Tipo de tornillo sin-fin, long. entre bocas de carga y descarga 8 m, caudal 2 m<sup>3</sup>/h, con dos bocas de descarga intermedias, diámetro 200 mm. Potencia instalada 1,5 CV ..... 0,50

Inversión estimada  
(x10<sup>6</sup> Ptas)

Ref. 14 - Silo de carbón con apoyos	
Construcción en chapa, capacidad 100 m <sup>3</sup> , con 2 valvulas de descarga, estructura de apoyo y detectores de nivel de máxima y mínima .....	2,00
Ref. 15 - Ventilador de aire y conductos	
Caudal 5.000 Nm <sup>3</sup> /h, presión 120/150 mm c. a. con tubería de 300 mm entre intercam-- biador de calor y tolva secadora. Potencia instalada 5 CV .....	0,70
Ref. 16 - Enfriador de gas	
Compuesto por 2 tubos concéntricos de 300 y 400 mm de Ø, longitud 11 m, con aisla-- miento exterior .....	0,30
Ref. 17 - Conducto de gas y soportes	
Tubo de Ø 300 mm longitud 11 m, con aisla miento y soportes al suelo .....	0,20
Ref. 18 - Ventilador de gas	
Caudal 5000 Nm <sup>3</sup> /h, presión 120/150 mm c.a Potencia instalada 5 CV .....	0,50
Ref. 19 - Mechero	
Para utilización del gas en la cámara de combustión existente .....	0,65
	31,90
Inversión total en equipo mecánico ..	
Instalación eléctrica, centro de control de motores y cuadro de maniobra (10% del equipo mecánico) .....	3,19
Obra civil de zapatas de apoyo de equipos, pavimentos y albañilería (costo estimado)	5,00

	<u>Inversión estimada (x10<sup>6</sup> Ptas)</u>
Red de incendios .....	3,00
Transporte y montaje del equipo mecánico (30% del valor de los equipos) .....	9,57
Inversión del equipo montado .....	52,66
Costo de puesta en marcha (tiempo estimado 2 meses) .....	5,00
Repuestos para 2 años de explotación (5% de la inversión en equipo mecánico y eléctrico) .....	1,75
Ingeniería (13% de la inversión del equipo montado) .....	6,85
Imprevistos (15% de la inversión) .....	7,90
Suma Total .....	74,16
Impuestos e I.T.E (5%) .....	3,71
INVERSION TOTAL ...	77,87

#### 11.5.- CALCULO DE RENTABILIDAD

Consideraremos diferentes regímenes de marcha en las dos instalaciones objeto de este estudio.

En GRESIBER , se supone una operación de 24 horas/día durante 5 días/semana y 11 meses/año, lo cual totaliza 5.760 horas/año.

En CEMENTOS EL LEON, se supone una operación continua de 24 horas/día, 7 días/semana y 12 meses/año, lo cual totaliza 8.500 horas/año de trabajo, teniendo en cuenta solamente un 3% del global de parada por trabajos de limpieza e imprevistos.

Realizaremos por separado los cálculos de rentabilidad para las dos instalaciones consideradas teniendo en cuenta los datos aportados para cada una de ellas.

#### 11.5.1.- Rentabilidad de la instalación en GRESIBER, S.A.

##### 11.5.1.1.- Inversiones y amortización

Según el punto 11.4.1., la inversión a realizar en esta planta se ha calculado en 88,05 MPts.

Suponiendo un periodo de amortización de 10 años, con valor residual cero, resulta una amortización anual de 8,8 MPts.

##### 11.5.1.2.- Capital circulante

Se considera necesario disponer de 10 MPts para hacer frente a los pagos de la compra de residuos y financiar los stocks de carbón vegetal que se produzcan.

##### 11.5.1.3.- Financiación

A efectos de este estudio, consideramos que el PEN financia el 50% de la inversión (44 MPts) y el resto es aportado por GRESIBER. La financiación devengará un interés del 14% anual y será amortizada en 8 años a partir del 2º año de operación.

#### 11.5.1.4.- Costes de operación

##### Personal

Dado que la planta únicamente requiere una ligera vigilancia de marcha y esporádicamente una alimentación de los residuos por la grua del almacén, se considera que un operario solamente requiere 1/3 de su tiempo en la realización de estos trabajos, dedicando su tiempo restante a otras actividades.

Tendremos por tanto que durante los 3 turnos, únicamente consideraremos 1 operario por jornada de 40 horas semanales - según el régimen de marcha previsto, cuyo costo se calcula en 1,2 MPts/año.

##### Energía eléctrica

Según la potencia instalada, prevista en el punto 11.4.1. para cada uno de los equipos, necesitamos un total de 34 CV - instalados, equivalente a 25 KW que con un coeficiente de utilización de 0,7 tendremos un consumo de 18 Kwh por hora de trabajo, resultando sobre las 5.760 horas/año de trabajo un consumo total anual de 103.680 Kwh que a un precio medio de 7 P./Kwh resulta un costo anual de 0,73 MPts.

##### Mantenimiento y repuestos

Se considera un costo total anual equivalente al 3% de la inversión total.

Costo anual:  $88,05 \times 0,03 = 2,65$  MPts.

Seguros

Se considera el costo de una póliza de seguros contra incendios para cubrir los riesgos de incendio de la planta y de los materiales combustibles almacenados, cuyo costo de prima anual se estima en 0,15 MPts.

Resumen de costos de operación

Personal .....	1,20 MPts/año
Energía eléctrica .....	0,73 " "
Mantenimiento y repuestos ....	2,65 " "
Seguros .....	<u>0,15 " "</u>
Total costos de operación ....	4,73 MPts/año

## 11.5.1.5.- Costos de materia prima

Según lo indicado en el punto 11.2 (Datos técnicos básicos) la capacidad de tratamiento de la planta es de 1000 kg/h de residuo forestal con 15% de humedad.

Dado que este residuo, se recibe en planta con una humedad media estimada del orden del 40%, las necesidades de materia prima adquirida por hora de funcionamiento son de - -  
 $1000 \frac{1,40}{1,15} = 1.217$  kgs. Las horas de funcionamiento anual se han evaluado en 5.760 horas. Por tanto, el consumo anual de residuos forestales triturados es de 7000 toneladas.

Haciendo una previsión de coste de 3000 pts/t el costo anual de la materia prima alcanza los 21 MPts.

#### 11.5.1.6.- Ingresos por ventas

Los ingresos por ventas proceden de la valoración del gas generado y consumido por la Sociedad Promotora y por la venta para usos industriales del carbón vegetal producido.

La energía del gas generado alcanza a  $2 \cdot 10^6$  Kcal/hora que sobre las 5.760 horas de funcionamiento suponen una producción anual de  $11,52 \cdot 10^6$  termias.

Considerando la sustitución de gasoleo de 10.000 Kcal/kg y cuyo costo actual es de 39,5 pts/kg, resulta para este combustible un costo de 3,95 Pts/termia.

El gas generado, a este precio, supone una valoración para el gas de 45,5 MPts/año.

El carbón vegetal producido por hora de funcionamiento, es de 200 kgs/h resultando una producción total anual de 1.150 t.

Consideramos para el cálculo, un precio de venta del carbón vegetal de 16.000 Pts/t franco fábrica, lo cual supone un ingreso por ventas de 18,4 MPts/año.

Los ingresos totales anuales, alcanzan por tanto un monto de 63,9 MPts.

#### 11.5.1.7.- Resumen de los datos base para el cálculo de los Flujos de Caja y de la Tasa Interna de Retorno - (T.I.R.)

- INVERSION .....	88,05 MPts
- AMORTIZACION .....	8,80 "
. En 10 años	

- CAPITAL CIRCULANTE .....		10,00 MPts
- FINANCIACION		
. Del 50% de la Inversión	Desde 6,16 MR, el 1 <sup>er</sup> año de operación a 0,77MR, el 10 <sup>o</sup> año de operación	
. En 10 años		
. A un interes del 14% anual		
- DEVOLUCION DEL PRESTAMO .....		5,50 MPts
. En 8 años		
. A partir del 2 <sup>o</sup> año de operación		
- COSTES DE OPERACION .....		4,73 MPts
. De Personal .....	1,20 MPts	
. De Energ. eléctrica .	0,73 "	
. De Manten. y repuest.	2,65 "	
. Seguros .....	0,15 "	
- COSTES DE MATERIA PRIMA :.....		21,00 MPts
- INGRESOS .....		63,90 MPts
. Por venta de gas .....	45,50 MPts	
. Por venta carbón vegetal	18,40 MPts	

#### 11.5.1.8.- Cálculo de flujos de Caja y T.I.R

En base a los datos aportados se realiza el cuadro de flujo de caja que se indica seguidamente en el cual se han considerado millones de pesetas constantes de 1984.

Los costes, corresponden a la suma de costo de materia prima y costos anuales de operación.

La tasa interna de retorno para el flujo de caja calculado resulta ser del 42,4%.

## 11.5.1.9.- Cálculos de sensibilidad

Para conocer las variaciones resultantes en la tasa interna de retorno en función de otras hipótesis, se han realizado los cálculos que se indican:

## a) Sensibilidad a los ingresos por ventas

Se ha supuesto que los ingresos por ventas (resultantes de un descenso del precio considerado para la termia de gas y del precio de venta del carbón) se disminuyen en porcentajes del 10, 20, 30 y 35%, permaneciendo constantes los costes, amortizaciones, etc. Se obtiene la siguiente tabla de resultados.

INGRESOS POR VENTAS		
% sobre caso base	IMPORTE (MPts)	T.I.R. (%)
90	57,51	32,62
80	51,12	22,51
70	44,73	11,73
65	41,54	5,9
62,5	39,94	2,8
62	39,62	2,1

## b) Sensibilidad a los costes

Se supone que los costes reales, sufren modificaciones al alza respecto de los calculados (suma de costo de residuo forestal y costos de operación) del 10%, 20%, etc.

Se obtiene así la siguiente tabla de resultados.

COSTES		
<u>% sobre caso base</u>	<u>IMPORTE (MPts)</u>	<u>T.I.R. (%)</u>
110	28,30	38,40
120	30,88	34,55
130	33,45	30,55
140	36,02	26,50
150	38,60	22,37

Estos resultados, se presentan en el gráfico adjunto.

Se observa, una mayor sensibilidad a los ingresos por ventas que a los costes.

#### 11.5.2.- Rentabilidad de la instalación en CEMENTOS EL LEON S.A.

##### 11.5.2.1.- Inversiones y amortización

Según el punto 11.4.2., la inversión a realizar en ésta planta, se ha calculado en 78 MPts.

Suponiendo un periodo de amortización de 10 años, con valor residual cero, resulta una amortización anual de 7,8 MPts.

##### 11.5.2.2.- Capital circulante

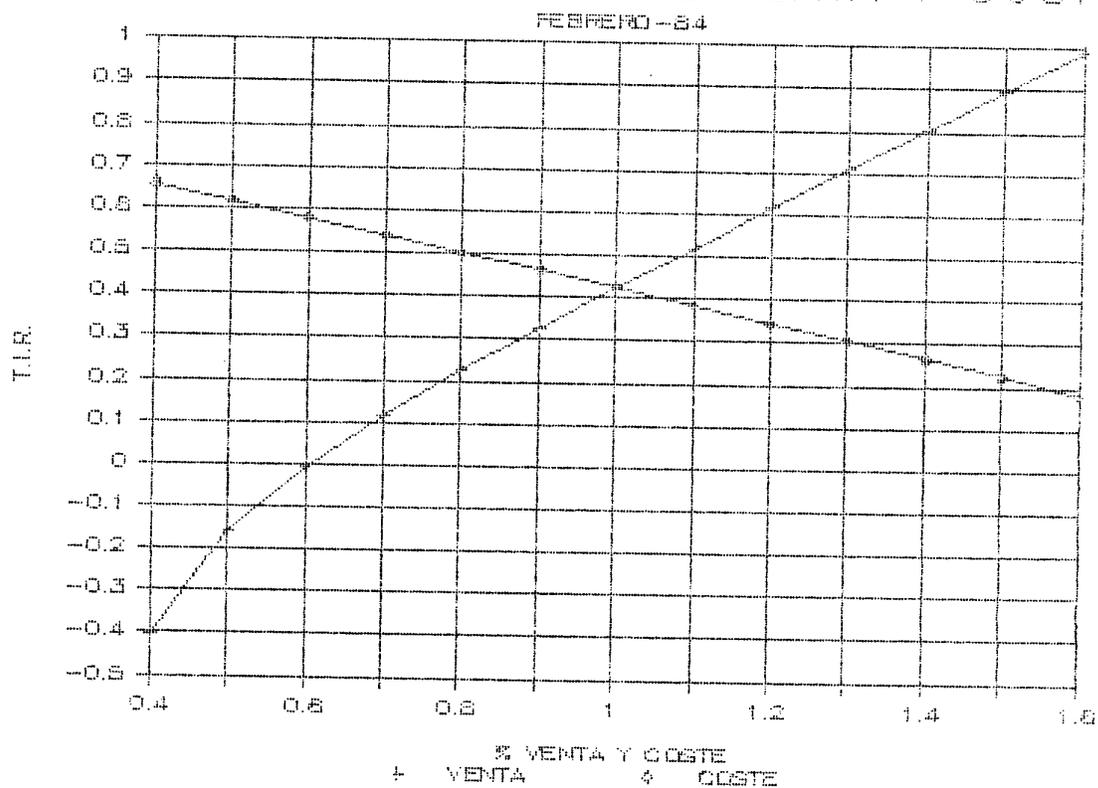
Se considera necesario disponer de 10 MPts para hacer frente a los pagos de la compra de residuos y financiar los stocks de carbón vegetal que se produzcan.

## FLUJO DE CAJA PARA "GRESIBER S.A."

ANO	VENTAS	COSTES	INVR.S.	AMORT.	C.FIN.	RENT.B	IMP.33%	DEV.P	C.FLOW
0	0.00	0.00	44.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-44.05
1	63.90	25.73	10.00	8.80	6.16	23.21	7.66	0.00	14.35
2	63.90	25.73	0.00	8.80	6.16	23.21	7.66	0.00	24.35
3	63.90	25.73	0.00	8.80	6.16	23.21	7.66	5.50	18.85
4	63.90	25.73	0.00	8.80	5.39	23.98	7.91	5.50	19.37
5	63.90	25.73	0.00	8.80	4.62	24.75	8.17	5.50	19.88
6	63.90	25.73	0.00	8.80	3.85	25.52	8.42	5.50	20.40
7	63.90	25.73	0.00	8.80	3.08	26.29	8.68	5.50	20.91
8	63.90	25.73	0.00	8.80	2.31	27.06	8.93	5.50	21.43
9	63.90	25.73	0.00	8.80	1.54	27.83	9.18	5.50	21.95
10	63.90	25.73	-10.00	8.80	0.77	28.60	9.44	5.50	32.46

T. I. R. 42.40%

## SENSIBILIDAD AL % DE VENTA Y COSTE



### 11.5.2.3.- Financiación

Se considera que el PEN financia el 50% de la inversión (39 MPts) y el resto es aportado por CEMENTOS "EL LEON". La financiación devengará un interés del 14% anual y será amortizada en 8 años a partir del 2º año de operación.

### 11.5.2.4.- Costes de operación

#### Personal y pala cargadora

Dado que la planta requiere una ligera vigilancia de - marcha y esporádicamente una alimentación de los residuos con pala cargadora, se considera que un operario, solamente requiere 1/3 de su tiempo en la realización de estos trabajos, dedicando su tiempo restante a otras actividades.

Tendremos, además, un trabajo continuo incluyendo días festivos que supone por pago de horas extra un costo mayor - que el que se considera como normal.

Sobre las 168 horas de trabajo semanales, aplicamos 1/3 del tiempo total, resultando un tiempo de dedicación de 56 horas/semana que supone 1½ jornales, sobre los que se considera un costo de 1,6 MPts/año incluyendo horas festivas y nocturnas.

Resulta así un costo anual por mano de obra de 2,4 MPts /año.

Incluyendo también el costo de la pala cargadora a razón de 1.500 pts/hora sobre las 56 horas/semana y 52 semanas/año, resultan 4,4 MPts/año.

El costo total por mano de obra y pala cargadora resulta por tanto, 6,8 MPts/año.

#### Energía eléctrica

Según la potencia instalada, prevista en el punto 11.4.2 para cada uno de los equipos, son necesarios 29 CV instalados, equivalentes a 22 Kw que con un coeficiente de utilización de 0,7, supone un consumo de 15,5 Kwh por hora de trabajo, resultando sobre las 8.500 horas de trabajo/año 131.750 Kwh que a un precio medio de 7 pts/Kwh resulta un costo anual de 0,92 - MPts/año.

#### Mantenimiento y repuestos

Se considera un costo total anual equivalente al 3% de la inversión total.

Costo anual:  $77,87 \times 0,03 = 2,34$  MPts.

#### Seguros

Se incluye el costo de una póliza de seguros contra incendios para cubrir los riesgos de incendio de la planta y de los materiales combustibles almacenados, cuyo costo de prima anual se estima en 0,15 MPts.

#### Resumen de costos de operación

Personal y pala cargadora .....	6,80	MPts/año
Energía eléctrica .....	0,92	" "
Mantenimiento y repuestos .....	2,34	" "
Seguros .....	0,15	" "
Total costos de operación .....	<u>10,21</u>	MPts/año

#### 11.5.2.5.- Costos de materia prima

Según lo indicado en el punto 11.2 (Datos Técnicos básicos) la capacidad de tratamiento de la planta es de 1000 kgs/hora de residuo forestal con 15% de humedad.

Dado que este residuo, se recibe en planta con una humedad media estimada del orden del 40%, las necesidades de materia prima adquirida por hora de funcionamiento son de - -  

$$1000 \frac{1,40}{1,15} = 1.217 \text{ Kgs.}$$

Las horas de funcionamiento anual se han evaluado en - 8.500 h. Por tanto, el consumo anual de residuos forestales - triturados es de 10.350 toneladas.

Haciendo una previsión de coste de 3.000 pts/t, el costo anual de la materia prima alcanza los 31,05 MPts.

#### 11.5.2.6.- Ingresos por ventas

Los ingresos por ventas proceden de la valoración del gas generado y consumido por la Sociedad Promotora y por la venta para usos industriales del carbón vegetal producido.

La energía del gas generado alcanza a  $2 \cdot 10^6$  Kcal/h que sobre las 8.500 horas de funcionamiento suponen una producción anual de  $17 \cdot 10^6$  termias.

Considerando la sustitución del fuel-oil de 10.000 Kcal/kg y cuyo costo actual es de 27 pts/kg, resulta para este combustible un costo de 2,70 pts/termia.

El gas generado, a este precio, supone una valoración para el gas de 45,9 MPts/año.

El carbón vegetal producido por hora de funcionamiento es de 200 kgs/h resultando una producción total anual de 1.700 toneladas.

Consideramos para el cálculo un precio de venta del carbón vegetal de 16.000 pts/t franco fábrica, lo cual supone un ingreso por ventas de 27,2 MPts/año.

Los ingresos totales anuales, alcanzan por tanto un monto de 73,1 MPts.

11.5.2.7.- Resumen de los datos base para el cálculo de los Flujos de Caja y de la Tasa Interna de Retorno - (T.I.R.)

- INVERSION .....		78,00 MPts
- AMORTIZACION .....		7,80 "
. En 10 años		
- CAPITAL CIRCULANTE .....		10,00 "
- FINANCIACION		
. Del 50% de la Inversión	De 5,46 MR, el 1º año de operación a 0,68 MR, el 10º año de ope ración	
. En 10 años		
. A un interés del 14% anual		
- DEVOLUCION DEL PRESTAMO .....		4,87 MPts
. En 8 años		
. A partir del 2º año de operación		
- COSTES DE OPERACION .....		10,21 MPts
. De personal y pala cargadora .....	6,80 MPts	
. De energía eléctrica .....	0,92 "	
. De Mantenimiento y repuestos .....	2,34 "	
. Seguros .....	0,15 "	
- COSTES DE MATERIA PRIMA .....		31,05 MPts
- INGRESOS .....		73,10 "
. Por venta de gas .....	45,90 MPts	
. Por venta carbón vegetal	27,20 MPts	

#### 11.5.2.8.- Cálculo del flujo de caja y T.I.R

En base a los datos aportados, realizamos el cuadro de flujo de caja que se indica seguidamente, en el cual se han considerado millones de pesetas constantes de 1984.

Los costes, corresponden a la suma de costos de materia prima y costos anuales de operación.

La tasa interna de retorno para el flujo de caja calculado resulta ser del 38,24%.

#### 11.5.2.9.- Cálculos de sensibilidad

Para conocer las variaciones resultantes en la tasa interna de retorno en función de otras hipótesis, se han realizado los cálculos que se indican.

##### a) Sensibilidad a los ingresos por ventas

Se ha supuesto que los ingresos por ventas (resultantes de un descenso del precio considerado para la termia de gas y del precio de venta del carbón) se disminuyen en porcentajes del 10, 20 y 25% sobre el estimado, permaneciendo constantes los costes, amortizaciones, etc.

Se obtiene la siguiente tabla de resultados.

INGRESOS POR VENTAS		
<u>% sobre caso base</u>	<u>IMPORTE (MPts)</u>	<u>T.I.R. (%)</u>
110	80,41	50,53
90	65,79	25,61
80	58,48	12,16
75	54,83	4,81

b) Sensibilidad a los costes

Se supone que los costes reales, sufren modificaciones al alza respecto de los costes calculados (suma de costes de operación y costo de los residuos forestales) del 10%, 20%, etc.

Se obtiene así la siguiente tabla de resultados.

COSTES		
<u>% sobre caso base</u>	<u>IMPORTE (MPts)</u>	<u>T.I.R. (%)</u>
110	45,39	31,17
120	49,51	23,94
130	53,64	16,42
140	57,76	8,45
149	61,48	0,61

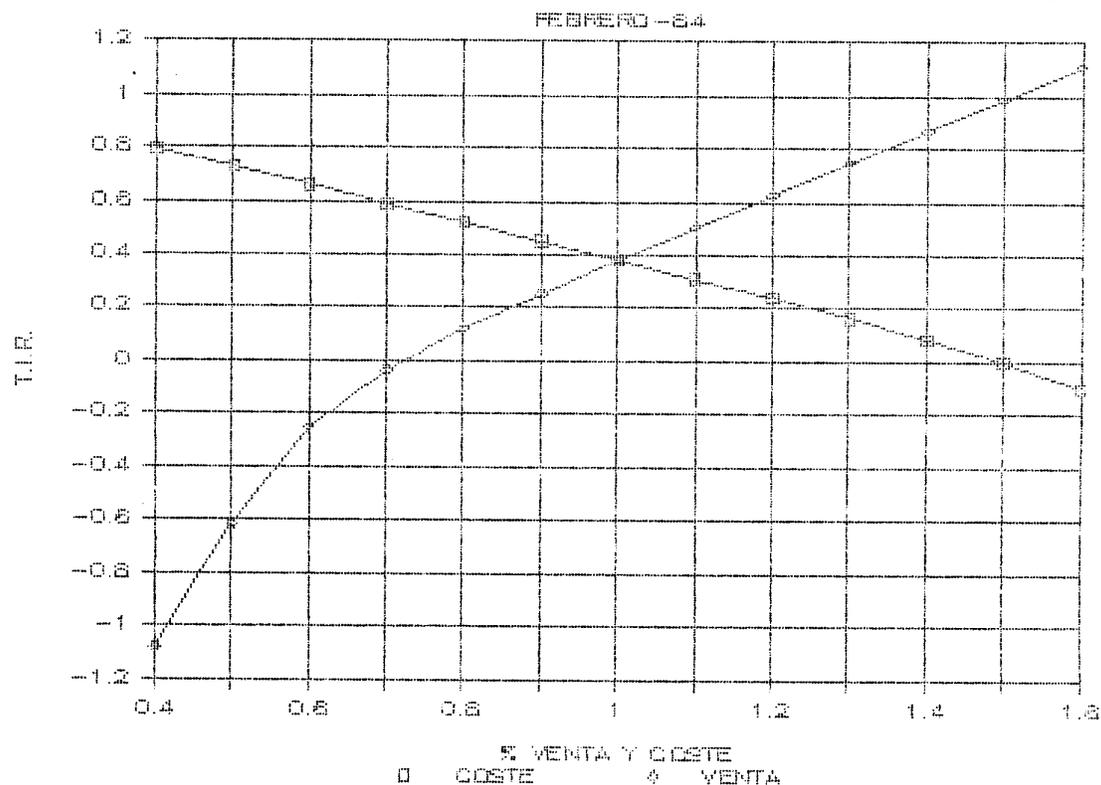
Estos resultados se presentan en el gráfico adjunto.

## FLUJO DE CAJA PARA "CEMENTOS EL LEON S.A."

ANO	VENTAS	COSTOS	INVR.S.	AMORT.	C.FIN.	RENT.B	IMP.33%	DEV.P	C.FLOW
0	0.00	0.00	39.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-39.00
1	73.10	41.26	10.00	7.80	5.46	18.58	6.13	0.00	10.25
2	73.10	41.26	0.00	7.80	5.46	18.58	6.13	0.00	20.25
3	73.10	41.26	0.00	7.80	5.46	18.58	6.13	4.87	15.30
4	73.10	41.26	0.00	7.80	4.78	19.26	6.36	4.88	15.82
5	73.10	41.26	0.00	7.80	4.10	19.94	6.58	4.87	16.29
6	73.10	41.26	0.00	7.80	3.41	20.63	6.81	4.88	16.74
7	73.10	41.26	0.00	7.80	2.73	21.31	7.03	4.87	17.21
8	73.10	41.26	0.00	7.80	2.05	21.99	7.26	4.88	17.65
9	73.10	41.26	0.00	7.80	1.37	22.67	7.48	4.87	18.12
10	73.10	41.26	-10.00	7.80	0.68	23.36	7.71	4.88	28.57

T.I.R. 39.24%

## SENSIBILIDAD AL % DE VENTA Y COSTE



## 12.- RESUMEN Y CONCLUSIONES

### 12.1.- RESUMEN

Cuando se empezó a trabajar en el Proyecto "Aprovechamiento Energético de los Residuos Forestales para Obtención de Carbón Vegetal", en colaboración con el Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, se vió la necesidad de modificar dicho título y por consiguiente ampliar una parte de sus fines, - al ser un disparate energético el aprovechamiento de este tipo de residuos para la obtención exclusiva de carbón vegetal. Resulta imprescindible desde el punto de vista económico, utilizar el gas que se produce en la descomposición térmica de los mismos lo que cambió radicalmente el planteamiento a seguir, al tener que ampliar el trabajo y buscar industrias en las que poder aplicar dicho gas.

#### 12.1.1.- Objetivos

Por consiguiente, tres son los objetivos fundamentales del proyecto. La producción de un combustible sólido de muy bajo contenido en azufre y óptimas propiedades para ciertos procesos de fabricación industrial (el carbón vegetal) y un gas pobre de posible aplicación en diversas fábricas e industrias, como sustituto del fuel-oil o cualquier otro combustible que consuman. Asimismo, se pretende conseguir una mejora del monte, con reducción de los riesgos de incendios, disminución del número e in

tensidad de plagas, e incremento del rendimiento maderero, además de utilizar una cantidad considerable de mano de obra en la realización de los trabajos selvícolas pertinentes.

#### 12.1.2.- Aprovechamiento de la biomasa

La biomasa es una riqueza renovable que podría desempeñar un importante papel a la hora de satisfacer las necesidades energéticas de cada país. Actualmente, se están desarrollando e investigando un cierto número de procesos para la transformación energética de la biomasa, tales como la combustión, gasificación, pirólisis, conservación bioquímica, fermentaciones aerobias y anaerobias, etc.

Su utilización como fuente energética varía de unos países a otros según la disponibilidad de recursos naturales, el grado de desarrollo tecnológico local, y el nivel de industrialización y de vida de cada uno de ellos.

#### 12.1.3.- Selección de procesos termoquímicos

Es evidente que su aprovechamiento más eficaz sería el consumo in situ, pues se evitarían los elevados costes del transporte y su consiguiente incidencia en aumento de costes. Sin embargo, no siempre es posible hacerlo. En tales casos, el proceso más idóneo sería el de la combustión directa. No obstante, existen multitud de industrias en las que por las características intrínsecas de sus sistemas energéticos no se pueden emplear combustibles sólidos (leñas y astillas) sino gaseosos. De aquí el motivo de haber seleccionado en este proyecto, la pirólisis como forma de aprovechamiento integral de los residuos forestales.

Se analiza en primer lugar la utilización energética de la biomasa. Los compuestos a procesar o tratar son bastante numerosos, heterogéneos y variables, por lo que conviene recalcar que no todos los elementos integrantes de la misma son susceptibles para el proceso de pirólisis. La selección de materias primas se debe realizar, sopesando muy detenidamente sus propiedades termoquímicas (análisis inicial y final, poder calorífico, calores de combustión y formación y examen de cenizas), y los aspectos económicos de su recolección, tratamiento previo, transporte y almacenamiento.

#### 12.1.4.- Residuos forestales disponibles

Se comentan y exponen muy brevemente los datos que los técnicos del ICONA proporcionaron sobre los recursos forestales de las provincias de Cáceres, Guadalajara y Huelva, respectivamente. En un principio, y a iniciativa de dicho Organismo, se pretendía desarrollar el proyecto en las provincias de Guadalajara y Huelva. Sin embargo, en plena ejecución del mismo, se sugirió a ENADIMSA por parte de SODIEX y algunos particulares interesados en el tema del carbón vegetal, la posibilidad de que el Proyecto incluyera también a la región de Extremadura. Consultada esta petición al ICONA de Madrid, fué aceptada muy favorablemente, sustituyéndose la provincia de Huelva por una de las dos de la Región de Extremadura, la que fuera más idónea tanto desde el punto de vista de existencia de materia prima (residuos forestales) como desde el técnico (aplicación del gas producido a una determinada industria). - Por otra parte, en la Provincia de Huelva no se causaba ningún perjuicio, al estar en ella muy avanzado el tema del astillado y su aplicación directa como combustible en numerosas industrias.

En el trabajo realizado por el Servicio Provincial del ICONA de Cáceres, se estiman las existencias leñosas de pino en montes a su cargo, en una zona de unos 100 Km alrededor de la ciudad de Plasencia, en unos 478.000 m<sup>3</sup> de leña, para el decenio 1984-1993. En el inventario de repoblaciones de Guadalupe, efectuado por el Servicio Provincial del ICONA de esta provincia, se evalúa una superficie total de cuatro diferentes tipos de pinos, de 15.119 ha., con un volumen maderable de 438.452 m<sup>3</sup>. En el trabajo llevado a cabo por el Servicio Provincial del ICONA de Huelva, se evalúan los restos leñosos procedentes de montes a su cargo, bien en propiedad, consorciados, o de utilidad pública, susceptibles de aprovechamiento comercial, es decir, residuos potencialmente disponibles. El estudio se realiza en montes situados en un radio de 20 Km alrededor del pueblo de Niebla, por considerarse este punto centro de una gran masa forestal, con unas 100.000 ha de eucaliptus, pinos y quercineas, y una generación total de residuos de 185.103.995 Kg de materia seca al año, procedente de selecciones de brotes, cortas, entresacas, podas y desbroces.

#### 12.1.5.- Consideraciones técnicas de los procesos termoquímicos para el diseño de una instalación

A continuación se exponen algunas consideraciones técnicas de los tratamientos termoquímicos, estableciéndose una clara diferencia entre los procesos de pirólisis, gasificación y combustión, respectivamente. Se estudia detenidamente la pirólisis, teniéndose en cuenta los aspectos siguientes:

- Reacciones que producen durante la misma
- Productos que se originan en ella
- Empleo de catalizadores, agentes oxidantes, agentes reductores y altas presiones
- Aplicación al caso concreto de los residuos leñosos

- Influencia de la temperatura
- Necesidades energéticas
- Materias primas (maderas duras y maderas blandas)
- Rendimientos y características de los productos obtenidos

#### 12.1.6.- Sistemas y procesos de carbonización

Los diferentes sistemas de pirólisis se clasifican según los sentidos del flujo gaseoso y de la materia prima a tratar, los mecanismos de transmisión de calor, y las características de los residuos (según formen o no escorias). Teniendo en cuenta los dos primeros factores, y la disposición de los hornos o retortas (vertical, horizontal e inclinada) se pueden desarrollar más de doce tipos de equipos diferentes. Se describen y comentan brevemente, los cinco principales sistemas de flujo continuo que se conocen actualmente: De lecho fijo, agitado, fluido, arrastrado y volteado.

Seguidamente se abordan los procesos de carbonización tradicionales, desde el horno de tierra o "picón" a los más sofisticados de ladrillo, y posteriormente de acero y hormigón, que surgen como consecuencia de la revolución industrial, pero sin cambios esenciales en el modo de operar. En todos ellos se produce fundamentalmente la ignición interna de una parte de la materia prima, para carbonizarse el resto en presencia de una cantidad controlada y reducida de aire. El proceso puede requerir muchos días e incluso más tiempo, en aquellos casos en que el enfriamiento del carbón tiene lugar por simple exposición al aire. Hay que tener sumo cuidado en aquellas circunstancias en que el aire accede al carbón caliente, pues se puede prender y quemar por completo. Se hace especial hincapié en la descripción y operatividad de los cuatro modelos de funcionamiento discontinuo que más se emplean hoy en día, especialmente en los países en vías de desarrollo: El horno MISSOURI,

el BEEHIVE, el MARK V, y la retorta CONSTANTINE.

Posteriormente se describen y examinan los 21 procesos de pirólisis, tanto de funcionamiento continuo como discontinuo, que más se utilizan en los países industrializados. De todos ellos se seleccionó el de la firma portuguesa CARBOTECNICA. Una cámara de gasificación-carbonización continua, por su gran sencillez, relativa baja inversión, y eficacia contrastada en Portugal para algunos tipos de residuos tales como las cáscaras de piña y las cascarillas de arroz. Se trata de una pirólisis a alta temperatura, con lo cual sólo se obtienen dos productos, gas y carbón. El horno continuo es muy sencillo y se reduce a un plano inclinado, energeticamente autoabastecido.

Cada cámara ocupa una superficie en planta de  $12 \text{ m}^2$ , con una capacidad de tratamiento de 1 t/h de residuos leñosos con un 15% de humedad y un poder calorífico de 3.750 Kcal/kg, obteniéndose aproximadamente 1.000 kg/h de gas de 2.000 Kcal/kg - ( $2 \times 10^6$  Kcal/h) y 200 Kg/h de carbón de unas 6.500 Kcal/kg - ( $1,3 \times 10^6$  Kcal/h). Naturalmente, estos valores dependerán del contenido de humedad y de la propia naturaleza de los residuos que se utilicen, como su contenido en sustancias minerales (cenizas) lignina, celulosa, hemicelulosa, ceras, etc.

#### 12.1.7.- Manejo del carbón vegetal: Mercado en España

Se dedica un capítulo especial al carbón vegetal, en el que se contemplan los siguientes puntos:

- Producción
- Almacenamiento
- Mercado
- Aspectos económicos

- Consecuencias de las exportaciones para los países en vías de desarrollo
- Fabricación de briquetas
- La situación actual en España

Por lo que a este último punto se refiere, la escasez y falta de datos oficiales, obligaron a mantener contactos con - diversas entidades relacionadas con el tema, para adquirir una panorámica global conjunta.

La producción total oscila alrededor de las 160.000 t/año. De esta cantidad, un 30-35% aproximadamente se exporta, - mientras que el resto se utiliza en el mercado interior, tanto en la industria como para barbacoas. En una primera aproxima-- ción se puede considerar distribuida la producción nacional de la siguiente forma:

- Para la industria .....	80.000 t/año
- Para barbacoas .....	30.000 "
- Para exportar .....	50.000 "

En cuanto a las exportaciones, se efectúan en su prácti- ca totalidad a los países de Centro Europa, Francia e Italia . El 80% del que se exporta a los países de Centro Europa se uti- liza para barbacoas, mientras que el que se vende a Francia e Italia se destina a usos industriales. En los últimos años, el ritmo de crecimiento anual de la exportación ha oscilado en - torno a un 20%.

El consumo nacional se puede considerar distribuido de la siguiente manera:

- Para barbacoas se emplean unas 30.000 t/año, alrededor de un 20% de lo que se produce.

- Para siderurgia se utiliza como reductor el resto, dentro de los siguientes campos:

- . Fábricas de acero
- . Fábricas de ferroaleaciones
- . Fábricas de metales

- Pequeñas cantidades se consumen también en algunas fundiciones, fábricas de pintura, fábricas de discos abrasivos, cementeras, industrias de filtros, etc.

Un factor muy importante a tener en cuenta a la hora de su posible aplicación es el tamaño. El 80% del que se emplea en la industria es de un tamaño superior a 20 mm, mientras que el 20% restante es inferior a este valor. En la industria de los metales de Silicio y Aluminio se consume todouno exento de finos, eliminándose las partículas de tamaño inferior a 5 mm. En las fábricas de ferroaleaciones se emplean dos tamaños: entre 5 y 15 mm, y entre 30 y 100 mm, respectivamente. En las fábricas de acero se utiliza todouno exento de finos. Para las barbacoas, todo el carbón vegetal que se maneja tiene un tamaño comprendido entre 30 y 80 mm, distribuyéndose por lo general en bolsas de 2, 3, 4 y 5 Kgs. Las partículas de carbón inferiores a 5 mm no se pueden emplear directamente con fines energéticos, por lo que se suelen moler y aplicar para pinturas, filtros y discos abrasivos. También se pueden usar en plantas de fabricación de ovoides que se queman en las cementeras.

Otro factor de gran importancia es el precio, que está en función de la calidad. El 90% del carbón vegetal de las siguientes características:

- Carbono fijo ..... 70% como mínimo

- Volátiles ..... 20% como máximo
- Cenizas ..... 12% como máximo
- Humedad ..... 8% como máximo

una vez clasificado, se paga en origen, es decir sobre almacén de fabricante, a un precio comprendido entre 12 y 15 pts/kg. - Actualmente, el precio mínimo sobre almacén de fabricante es de 8 pts/kg. El valor de 22-25 pts/kg, que se paga en algunas ocasiones para un carbón de excelente calidad, con más de un 90% de carbono fijo y un contenido en cenizas inferior al 1% , es poco frecuente, por lo que nose considera como representativo.

También se dedican sendos capítulos para analizar los - otros dos productos que se originan en la pirólisis de los residuos leñosos: el aceite y el gas.

#### 12.1.8.- Estudio de viabilidad técnico-económica en dos ins talaciones

Finalmente, se realiza un estudio técnico-económico sobre la implantación de una unidad de gasificación-carbonización, de la firma portuguesa CARBOTECNICA, en España. Para ello, se visitaron diferentes empresas de la provincia de Guadalajara y de la Región de Extremadura, que pudiesen estar interesadas en el tema, habiéndose seleccionado las firmas GRESIBER, S.A. de Plasencia (Cáceres) y CEMENTOS EL LEON, S.A. de Matillas (Guadalajara).

Con las cifras de necesidades energéticas y de continuidad de marcha aportadas por ambas firmas, se efectuaron los correspondientes anteproyectos que sirvieron de base para el mencionado estudio técnico-económico.

## 12.1.8.1.- Instalación en GRESIBER en Plasencia (Cáceres)

En la fábrica de cerámica de GRESIBER existe instalado un atomizador-secador que consume gasóleo a razón de 477 Kcal/kg - de producto. Como trata 4.000 Kg/h, su consumo horario es de  $1,9 \times 10^6$  Kcal, lo que justifica plenamente la utilización de una cámara de gasificación-carbonización. Al funcionar durante 24 horas/día, 5 días/semana y 48 semanas/año, la instalación de la susodicha cámara ahorraría anualmente alrededor de unas 1.150 t de gasóleo.

Para determinar la rentabilidad de su aplicación se partieron de los siguientes datos:

- INVERSION .....	88,05 Mpts
- AMORTIZACION .....	8,80 Mpts
. En 10 años	
- CAPITAL CIRCULANTE .....	10,00 Mpts
- FINANCIACION	
. Del 50% de la Inversión	Desde 6,16 Mpts el 1 <sup>er</sup> año de operación a - 0,77 Mpts el 10 <sup>o</sup> año de operación
. En 10 años	
. A un interés del 14% anual	
- DEVOLUCION DEL PRESTAMO .....	5,50 Mpts
. En 8 años	
. A partir del 2 <sup>o</sup> año de operación	
- COSTES DE OPERACION .....	4,73 Mpts
. De personal .....	1,20 Mpts
. De energía eléctrica .....	0,73 "
. De mantenimiento y repuestos	2,65 "
. Seguros .....	0,15 "

- COSTES DE MATERIA PRIMA .....	21,00 MPts
- INGRESOS .....	63,90 MPts
. Por venta de gas .....	45,50 MPts
. Por venta de carbón veget. .....	18,40 MPts

En base a los mismos se hallaron los correspondientes flujos de caja, para los que resulta una tasa interna de retorno - del 42,4%.

Para conocer las variaciones de la tasa interna de retorno en función de otras hipótesis, se efectuaron sendos análisis de sensibilidad a los ingresos y a los costes. En el primero de ellos se supone que los ingresos disminuyen en porcentajes del 10, 20, 30 y 35%, obteniéndose la siguiente tabla de resultados:

INGRESOS		T.I.R. (%)
% sobre caso base	Importe (MPts)	
90	57,51	32,62
80	51,12	22,51
70	44,73	11,73
65	41,54	5,90

En el análisis de sensibilidad a los costes se considera que experimentan crecientes subidas respecto a los calculados del 10, 20, 30, 40 y 50%, obteniéndose la siguiente tabla de resultados:

COSTES		T.I.R. (%)
% sobre caso base	Importe (MPts)	
110	28,30	38,40
120	30,88	34,55
130	33,45	30,55
140	36,02	26,50
150	38,60	22,37

Como se puede apreciar, es mayor la sensibilidad a los ingresos que a los costes.

#### 12.1.8.2.- Instalación en CEMENTOS EL LEON, Matillas (Guadaluajara)

En la fábrica de CEMENTOS EL LEON, existe instalado un secadero de clinker que consume fuel-oil a razón de 200 Kcal/kg de producto. Como trata 10 t/h, su consumo horario es de  $2 \times 10^6$  Kcal, lo que justifica plenamente la utilización de una cámara de gasificación-carbonización. Al funcionar durante 24 horas/día, 7 días/semana y 12 meses/año, con un total de 8.500 horas/año, por considerar un 3% global de parada como consecuencia de trabajos de limpieza e imprevistos, la instalación de la su sodicha cámara ahorraría anualmente alrededor de unas 1.700 t de fuel-oil.

Para determinar la rentabilidad de su aplicación, se partieron de los siguientes datos:

- INVERSION ..... 78,00 MPts

- AMORTIZACION .....	7,80 MPts
. En 10 años	
- CAPITAL CIRCULANTE .....	10,00 MPts
- FINANCIACION	
. Del 50% de la inversión	Desde 5,46 MPts el 1 <sup>er</sup> año de operación a - 0,68 MPts el 10 <sup>o</sup> año de operación
. En 10 años	
. A un interés del 14% anual	
- DEVOLUCION DEL PRESTAMO .....	4,87 MPts
. En 8 años	
. A partir del 2º año de operación	
- COSTES DE OPERACION .....	10,21 MPts
. De personal y pala cargadora ....	6,80 MPts
. De energía eléctrica .....	0,92 "
. De mantenimiento y repuestos ....	2,34 "
. Seguros .....	0,15 "
- COSTES DE MATERIA PRIMA .....	31,05 MPts
- INGRESOS .....	73,10 MPts
. Por venta de gas .....	45,90 MPts
. Por venta de carbón vegetal ....	27,20 "

En base a los mismos se hallaron los correspondientes flujos de caja, para los que resulta una tasa interna de retorno del 38,24%.

Para conocer las variaciones de esta tasa en función de otras hipótesis, se efectuaron sendos análisis de sensibilidad a los ingresos y a los costes. En el primero de ellos se supone que los ingresos disminuyen en porcentajes del 10, 20 y 25%, obteniéndose la siguiente tabla de resultados:

INGRESOS		T.I.R. (%)
% sobre caso base	Importe (MPts)	
90	65,79	25,61
80	58,48	12,16
75	54,83	4,81

En el análisis de sensibilidad a los costes se considera que experimentan crecientes subidas respecto a los calculados del 10, 20, 30, 40 y 49%, obteniéndose la siguiente tabla de resultados:

COSTES		T.I.R. (%)
% sobre caso base	Importe (MPts)	
110	45,39	31,17
120	49,51	23,94
130	53,64	16,42
140	57,76	8,45
149	61,48	0,61

Como se puede apreciar, también en este caso es mayor la sensibilidad a los ingresos que a los costes.

#### 12.2.- CONCLUSIONES

Una vez que ha finalizado la primera fase del proyecto con la redacción del presente informe, se extraen las siguientes conclusiones:

- El aprovechamiento INTEGRAL de los residuos forestales mediante proceso de pirólisis, es muy interesante desde el punto de vista energético, y con buenas expectativas de futuro desde el punto de vista económico, a pesar de la gran complejidad, heterogeneidad y diversidad de este tipo de residuos.
- De todos los procesos estudiados, se ha elegido el de la firma portuguesa CARBOTECNICA por ser el más sencillo, de menor inversión, fácil y bajo coste de manejo y adaptado a los objetivos del proyecto.
- Resulta imprescindible ratificar en la práctica, los valores que se esperan obtener por cada tonelada/hora de residuo con un 15% de humedad que se vaya a tratar en la cámara de gasificación-carbonización seleccionada.

Como a lo largo del presente estudio se ha detectado la existencia de una instalación de reciente construcción con la presencia de la citada cámara de la firma portuguesa, se considera muy ventajoso en cuanto a rapidez y economía, la realización de unos ensayos en la misma. La instalación está ubicada en las afueras de Cáceres, en una empresa extractora de aceites de orujo de aceituna, INOLCA, S.A. No obstante, habría que completarla con otros equipos para poder alcanzar los objetivos del proyecto.

Una vez instalados estos equipos sería de gran interés el seguimiento del proceso durante un periodo de 30-45 días, para fijar los parámetros operativos más reales, tales como:

- . Producción de gas
- . Poder calorífico del gas
- . Composición del gas

- . Producción de carbón vegetal
- . Calidad del carbón producido

Con la ejecución de dichas pruebas se tendrá un mejor conocimiento de la totalidad del proceso, desde la obtención de la materia prima astillada, a su carbonización, producción de gas y comercialización del carbón vegetal.

- Con los resultados del presente estudio teórico de viabilidad técnico-económica y según los que se alcancen en los ensayos propuestos (fase segunda), se acometerían con mayor garantía y seguridad la instalación industrial de una unidad de gasificación- carbonización en cualquiera de las dos empresas seleccionadas.
- El aprovechamiento integral de los residuos forestales cumple los siguientes objetivos:
  - . Incentiva los trabajos de limpieza en montes, con favorable repercusión en un mejor control de incendio y plagas.
  - . Es fuente de energía renovable con utilización de mano de obra local.
  - . La energía obtenida en forma de gas es de fácil aplicación en industrias que no pueden quemar residuos sólidos.
  - . La combustión directa de estos gases, supone el mejor aprovechamiento y evita transformaciones energéticas con las consiguientes pérdidas de rendimiento.

- . El carbón vegetal obtenido es un producto con demanda creciente sobre todo en aplicaciones de recreo para barbacoas.