

E S P O L

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

INSTITUTO DE CIENCIAS QUIMICAS

PLANTA PILOTO

PARA

CARBON ACTIVADO

**UN PROYECTO DE INVESTIGACION REALIZADO EN
EL INSTITUTO DE CIENCIAS QUIMICAS DE LA ESPOL
Y FINANCIADA POR LA GTZ (GESELLSCHAFT FÜR
TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT) DE LA REPUBLICA
FEDERAL DE ALEMANIA.**

SEPTIEMBRE 1989

GUAYAQUIL - ECUADOR

Para Mariano.

Te agradezco mucho
por tu apoyo al
proyecto Carbón Achiado
en todas sus fases

Muchas gracias

Pild

El Autor

Richard Lehner, de profesión ingeniero químico y pedagogo. Experiencias en el área de investigación química en las empresas SIEMENS AG. y HOBCHST AG de la Rep.Federal de Alemania. Se especializó en la enseñanza de Química y en la Química del medio ambiente. Profesor cooperante en la Escuela Superior Politécnica del Litoral en Guayaquil - Ecuador por el lapso de 4 años.

RESUMEN

Mediante un proceso de laboratorio es posible elaborar carbón activado a partir de cascarillas de arroz, utilizando equipos sencillos y sin reactivos. La transformación de este proceso a un nivel semi-industrial fue un objetivo de la Planta Piloto.

La posibilidad de construir por cuenta propia los equipos y el procedimiento simple hace que este tipo de producción de carbón activado esté al alcance de los países no-industrializados.

Como materia prima se puede utilizar residuos de la agricultura como: cascarillas de arroz, cáscaras de coco, desechos de madera. De estos es posible obtener un carbón activado con capacidad de adsorción del 70-80 % del carbón comercial, la misma que es suficiente para muchas aplicaciones.

Los procesos de la Planta Piloto - briquetación, carbonización, trituración, clasificación, activación - están orientados a la obtención de un carbón activado granulado pues esto facilita su aplicación.

Para el análisis del carbón activado elaboramos el método ADAMCA (Adsorción de Anaranjado de Metilo por Carbón Activado), el mismo que permite el control de calidad del carbón en 10 minutos.

Varias medidas extras de la Planta Piloto reducen o evitan la contaminación del medio ambiente y protegen al personal de la misma.

INDICE

| | página |
|--|------------|
| RESUMEN..... | 3 |
| PREFACIO..... | 5 |
| 1. LA SITUACION INICIAL..... | 6 |
| 1.1. Carbón Activado..... | 6 |
| 1.2. Desechos agrícolas..... | 7 |
| 1.2.1 Cascarillas de arroz..... | 8 |
| 1.2.2 Cáscaras de coco..... | 11 |
| 1.2.3 Cáscaras de café..... | 11 |
| 1.2.4 Otros residuos agrícolas..... | 12 |
| 1.3. Fabricación del Carbón Activado..... | 13 |
| 1.4. Carbón Activado por un proceso de laboratorio..... | 19 |
| 2. PROCESOS Y EQUIPOS DE LA PLANTA PILOTO..... | 25 |
| 2.1. Objetivos de la Planta Piloto..... | 25 |
| 2.2. El proceso de producción..... | 26 |
| 2.2.1. La briquetación..... | 29 |
| 2.2.2. La carbonización..... | 32 |
| 2.2.3. La trituración..... | 39 |
| 2.2.4. La clasificación..... | 42 |
| 2.2.5. La activación..... | 47 |
| 2.3. Control de calidad..... | 51 |
| 2.4. Medidas de seguridad y protección del medio ambiente..... | 58 |
| 3. RESULTADOS DE LOS PROCESOS Y DEL ANALISIS DEL CARBON ACTIVADO..... | 60 |
| 3.1. La briquetación..... | 60 |
| 3.2. La carbonización..... | 62 |
| 3.3. La trituración..... | 70 |
| 3.4. La clasificación..... | 71 |
| 3.5. La activación..... | 72 |
| 3.6. Calidad del Carbón Activado..... | 76 |
| 4. INFORMACION TECNICA DE LOS EQUIPOS..... | 81 |
| 4.1. La briquetadora..... | 81 |
| 4.2. El horno de carbonización..... | 82 |
| 4.3. El molino..... | 83 |
| 4.4. Los tamices..... | 85 |
| 4.5. El horno de activación a gas..... | 86 |
| 4.6. El horno de activación eléctrico..... | 87 |
| 4.7. El extractor de aire..... | 88 |
| 5. CLASIFICACION DE LOS COSTOS..... | 89 |
| 5.1. Gastos en la construcción..... | 89 |
| 5.2. Costos de la producción..... | 90 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 91 |
| 7. DETALLES DE LA CONSTRUCCION DE LOS EQUIPOS..... | 92 |
| 8. BIBLIOGRAFIA | 108 |
| INDICE DE FIGURAS Y TABLAS | 110 |
| FOTO DOCUMENTACION..... | 113 |

PREFACIO

El objetivo de este informe es divulgar la experiencia y los resultados de un proyecto de investigación del Instituto de Ciencias Químicas de la ESPOL en Guayaquil/Ecuador sobre la producción de carbón activado a partir de desechos orgánicos de la agricultura mediante procesos sencillos y una tecnología apropiada.

El presente informe se entiende como manual para exponer la ejecución del proyecto PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO con el diseño y la construcción de la maquinaria, la realización de los diferentes procesos de producción y los resultados obtenidos con el fin de posibilitar la transferencia y el uso del conocimiento en otros sitios.

El proyecto PLANTA PILOTO es la segunda parte de la investigación CARBON ACTIVADO A PARTIR DE CASCARILLAS DE ARROZ, que se realizó en el Instituto de Ciencias Químicas, y está financiado por la GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit) de Alemania Federal.

Los principales objetivos del proyecto - elaborar un proceso sencillo, utilizar una tecnología apropiada, reducir la contaminación en el campo y de la producción - han dirigido el desarrollo de la construcción de la Planta Piloto.

Quisiera agradecer a los colaboradores del proyecto, a los señores José Delgado y John Guadalupe como ayudantes científicos, al señor Arsenio Aguirre como responsable del diseño y de la construcción, a los señores Rolando Santillán y Francisco Villegas por la realización de todos los trabajos y a la señorita Rosa Salazar por el trabajo administrativo y el mecanografiado, quienes han hecho posible la ejecución y el cumplimiento del proyecto PLANTA PILOTO.

Septiembre 1989

RICHARD LEHNER
Instituto de Ciencias Químicas
E S P O L
Guayaquil - Ecuador

1. LA SITUACION INICIAL.

1.1. Carbón Activado

El Carbón Activado, ya conocido desde hace mucho tiempo como agente purificador, tiene importancia y muchas aplicaciones en los países en desarrollo.

Generalmente, el carbón activado es usado para purificar gases y líquidos. Las siguientes son sus aplicaciones más comunes:

- tratamiento de agua potable y aguas industriales
- refinación de aceites comestibles
- mejoramiento de sabor de bebidas alcohólicas
- purificación del agua para bebidas gaseosas (colas)
- refinación de azúcar
- purificación de reactivos químicos
- recuperación de disolventes
- adsorción de olores e impurezas del aire
- purificación de gases industriales
- purificación de medicamentos como penicilina, glicerina, etc..
- filtración del humo de cigarrillos
- desodorización en las casas (cocinas, refrigeradoras)
- filtración de aire en mascarillas protectoras

Otra aplicación del carbón activado es para la recuperación de oro luego del tratamiento con cianuro.

| SECTOR | CONSUMO 1986 | |
|---------------------|--------------|--------------|
| | TM | % |
| cigarrillos | 250 | 43.9 |
| aceites comestibles | 150 | 26.3 |
| bebidas gaseosas | 125 | 21.9 |
| otros | 45 | 7.9 |
| TOTAL | 570 | 100.0 |

TABLA # 1: CONSUMO DE CARBON ACTIVADO EN EL ECUADOR
EN EL AÑO 1986

FUENTE: Cámara de Comercio, Guayaquil

| AÑO | TONELADAS |
|------|-----------|
| 1978 | 155 |
| 1979 | 175 |
| 1980 | 474 |
| 1981 | 413 |
| 1982 | 506 |
| 1983 | 411 |
| 1984 | 472 |
| 1985 | 599 |
| 1986 | 570 |
| 1987 | 690* |
| 1988 | 647* |

* estimativo

TABLA # 2: IMPORTACIONES DE CARBON ACTIVADO AL ECUADOR

FUENTE: Cámara de Comercio, Guayaquil

La tabla # 2 muestra las importaciones de carbón activado del Ecuador en los últimos 10 años. Las importaciones corresponden a la cantidad de carbón activado consumido, pues no existe una producción nacional.

El precio del carbón activado en el mercado internacional es de aproximadamente 2500 US\$ por tonelada y esto significa que en el año 1988 se gastó 1.6 millones US-\$ por la compra de carbón activado. Debido al déficit de divisas en el país, esto constituye un problema bastante grave.

1.2 Desechos agrícolas

Los residuos de la producción agrícola normalmente son usados después de su biodegradación como abono o humus.

Pero existen materiales orgánicos con mucha resistencia a la descomposición natural: cascarillas de arroz, cáscaras de café, cáscaras de coco, etc.

Por su composición y estructura molecular, se descomponen lentamente y no sirven para una reutilización en la agricultura.

El proyecto CARBON ACTIVADO y la PLANTA PILOTO tratan de desarrollar un proceso para obtener un carbón activado mediante estos residuos no usables..

1.2.1. Cascarillas de arroz.

En el Ecuador, especialmente en la región de la Costa, entre los Andes y el Pacífico, existen muchos cultivos de arroz. Esto ~~tráe~~ como consecuencia que la producción de cascarillas sea abundante.

La cascarilla de arroz es un subproducto que se obtiene después de que el arroz es pilado. El pilado es un proceso mecánico que separa el arroz blanco de su revestimiento exterior.

La cantidad de cascarilla que se obtiene de 50 kg. de arroz cosechado es de 12.2 kg (= 24.4 %).

El resto de subproductos serán:

| | |
|--------------|------------------|
| arroz pilado | 31,8 kg = 63.6 % |
| polvillo | 5,5 kg = 11.0 % |
| arrocillo | 0,5 kg = 1.0 % |

Los datos de producción de arroz (TABLA # 3) muestran la gran cantidad de cascarillas que se produce, desgraciadamente su composición química no facilita su utilización.

| año | PRODUCCION | |
|------|------------------|---------------------------------|
| | arroz *1 (TM) | cascarillas de arroz *2 (TM) |
| 1982 | 378.082 | 94.521 |
| 1983 | 270.210 | 67.552 |
| 1984 | 430.811 | 107.702 |
| 1985 | 371.586 | 92.896 |
| 1986 | 567.069 | 141.762 |
| 1987 | 780.776 | 195.194 |
| 1988 | 954.000 | 238.500 |

TABLA # 3: PRODUCCION DE ARROZ Y CASCARILLAS DE ARROZ EN EL ECUADOR

FUENTE: *1) INEC *2) Elaboración propia

La tabla # 4 presenta resultados de análisis químicos de la cascarilla de arroz y se puede concluir, que por su alto contenido de sustancias inorgánicas (18-30% de cenizas), celulosa y lignina (36-48%) y por el bajo nivel de proteínas (1,5%) y grasa (0,5%), las cascarillas no son aptas para la alimentación de animales ni como abono, porque su biodegradación es muy lenta y la composición de las cenizas muestra un alto porcentaje de sílice (~85%) y poca cantidad de otros componentes como calcio, magnesio, hierro, potasio, fósforo. (Ver tabla # 5)

| Componentes de las cascarillas de arroz | VARIEDADES | |
|---|-----------------|-----------------|
| | MALASIA *1 % | ECUADOR *2 % |
| proteína | 1.5 - 7.0 | 1.9 |
| grasa | 0.5 - 3.0 | 0.5 |
| celulosa + lignina | 36.0 - 48.5 | 39.3 |
| extracto no nitrogenado | 24.5 - 38.8 | 29.2 |
| cenizas | 15.0 - 30.0 | 18.3 |
| humedad | 10.0 - 15.0 | 10.2 |

TABLA # 4: COMPOSICION QUIMICA DE LAS CASCARILLAS DE ARROZ
FUENTE : *1) LAURICIO 1987, pág.6 *2) Ministerio de Agricultura

| Componentes de las cenizas de las cascarillas de arroz | VARIEDADES | |
|--|-----------------|-----------------|
| | MALASIA *1 % | ECUADOR *2 % |
| SiO ₂ | 82.0 - 87.6 | 88.0 |
| CaO | 0.8 - 2.0 | 0.25 |
| MgO | 0.8 - 2.0 | 0.24 |
| K ₂ O | 0.9 - 2.8 | 0.8 - 1.7 |
| Na ₂ O | 2.0 - 2.3 | J. |
| Fe ₂ O ₃ | trazas | trazas |
| P ₂ O ₅ | 0.2 - 3.0 | 0.4 - 0.7 |

TABLA # 5: COMPOSICION QUIMICA DE LAS CENIZAS DE CASCARILLA DE ARROZ
FUENTE: *1) LAURICIO 1987, pág. 7 *2) Ministerio de Agricultura

Bajo las condiciones mencionadas, la utilización de las cascarillas de arroz es muy restringida y en muchas ocasiones, los gastos de transporte no justifican su aprovechamiento.

El uso de las cascarillas de arroz está limitado a los siguientes casos:

a) en la agricultura

- como material de relleno
- para cubrir el piso en los criaderos de aves, ganado, etc..
- para un tratamiento del suelo (revolverlo, incrementar la cantidad de fósforo)
- como ayuda para sembrar (p.ej. césped)
- como soporte en la técnica de las hidroplantas (todos los nutrientes se agregan como solución acuosa)

b) en la industria

- como combustible: su poder calorífico se establece en unas 3.300 Kcal/kg, pero la gran desventaja es el alto porcentaje de cenizas (hasta 30%)
- para la carbonización: una pirólisis produce gas combustible (poder calorífico aproximado: 1500 Kcal/m³) y un destilado (agua y alquitrán).
- para la obtención de furfural (C₄H₃OCHO)
- como ayuda para procesos de filtración.
- las cenizas se usan para pulir o lavar (en agua pH = 8,5)

c) en las construcciones

- mezclando con cemento permite obtener paneles y placas para construir tabiques en infraestructuras de suelos.
- para fabricar bloques de cemento livianos.
- para producir cemento por las cenizas (LAURICIO 1987)

Pero a pesar de estas posibles aplicaciones, en el Ecuador hay poco uso de las cascarillas de arroz, y como consecuencia este desecho del arroz constituye un enorme problema, especialmente para el sector de la agricultura.

El volumen de este subproducto del arroz ocupa un espacio físico demasiado grande, convirtiendo los lugares aledaños a estas zonas agrícolas, como por ejemplo las orillas de los ríos, esteros o las mismas carreteras, en depósitos de estos desechos, afectando el paisaje natural de la región. Es muy común que los agricultores arrojen estas cascarillas a los ríos, sin pensar en el problema de la contaminación. En otros casos este residuo es quemado, y por la combustión se produce monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, gases

orgánicos tóxicos, que forman un humo desagradable y contaminante. La combustión de estos cerros de cascarillas es muy lenta y tarda días y hasta semanas en su incineración total.

1.2.2. Cáscaras de coco

En el Ecuador, la producción de coco se concentra en la de la Palma Africana. Existen grandes monocultivos en la Costa y en la Amazonía, la cosecha de 674.000 t/año (SEAN 1989) sirve para abastecer al país de aceite, que se obtiene procesando los frutos de la palma.

Las grandes procesadoras extraen de los frutos hasta un 20% de aceite, en cambio las pequeñas plantas extraen solamente un 10%. Una parte de los residuos de este proceso de extracción es utilizada como combustible para las calderas de las procesadoras, el resto es eliminado ya sea botándolo o quemándolo. Considerando la cosecha anual, se obtiene solamente de la palma africana aprox. 500.000 t cáscaras de coco como residuo.

La palma africana (nombre latín: *Elaeis guineensis*) constituye por esa razón un problema ambiental en las zonas de su cultivo, adicionalmente a los impactos en general por sus grandes monocultivos.

La producción del otro tipo de coco, el de la Palma de coco verde o café (nombre científico: *cocus nucifera*) no es significativa, tanto así que no aparece p. ej. en las estadísticas de la producción agrícola. El coco verde tiene una pulpa exterior suave y una cáscara interior muy dura. La cáscara de este coco seco también la utilizamos como materia prima a pesar de que no tiene mucha importancia en el Ecuador por su poca cantidad.

1.2.3. Cáscaras de café

La producción de café en el Ecuador es la siguiente: En 1987 se produjo 372.615 toneladas y en 1988: 342.000 toneladas (SEAN 1989).

Mediante un proceso mecánico se separa la cáscara de la pepa interior. Las cáscaras obtenidas no tienen casi ninguna aplicación y por eso las piladoras las arrojan, como las cascarillas de arroz, a los ríos, a tierras no cultivadas o las queman.

La contaminación por las cáscaras de café es tan grave como la producida por las de arroz, aunque no se puede ver mucho este impacto, porque la producción de café y de las cáscaras se encuentra en la costa y también en la región amazónica en fincas o piladoras pequeñas y no tan concentrada como la del arroz.

1.2.4. Otros residuos agrícolas

Los demás productos que se obtiene como desechos de la producción agrícola significan por su aplicación restringida un problema ambiental en distintas regiones.

El BAGAZO, por ejemplo, residuo de la producción de azúcar y alcohol, se descompone relativamente rápido. Por la producción anual de 2'590.000 t de caña de azúcar se obtiene aprox. 780.000 t/año de bagazo (SEAN 1989). Los grandes ingenios utilizan este residuo como combustible o como pulpa de bagazo para la producción de papel, mientras que los pequeños cañicultores no lo utilizan y lo arrojan.

En ciertas zonas de la Costa, este bagazo también produce un impacto ambiental, pues debido a su poco valor como abono, los cañicultores lo queman y de esta forma contaminan la atmósfera.

El ASERRIN, como desecho de la industria maderera se usa en el campo como combustible y para un tratamiento de suelo, pero en las ciudades el aserrín de las fábricas de muebles p. ej. no tiene gran aplicación.

1.3. Fabricación del Carbón Activado

En la discusión sobre la manufactura de Carbón Activado es importante considerar, que el término Carbón Activado designa a una gran familia de sustancias. Ningún miembro de esta familia está caracterizado por una fórmula estructural definida ni puede ser identificado por un análisis químico. La única base para diferenciarlos es por sus propiedades catalíticas y de adsorción. HASSLER (1974, pág 169 ff) clasifica la gran variedad de carbón activado según la materia prima y los procesos de activación que se utilicen, y subraya, que por los distintos datos de adsorción se puede suponer la existencia de muchas variedades.

El amplio campo de aplicación del carbón activado ha creado una gran variedad del mismo:

- D-carbón para decolorar líquidos,
- M-carbón para aplicaciones medicinales,
- R-carbón para purificar aire de respiración
- A-carbón para adsorber gases y humos.

Un gran espectro de materias primas, sustancias para la activación y procesos de producción permite la obtención de los diferentes tipos de carbón activado y la variación de sus propiedades.

La fabricación de carbón activado generalmente se realiza en 2 etapas: Carbonización y Activación.

En la literatura existen muchas publicaciones y patentes (más de 1000) sobre la elaboración de carbón activado (HASSLER 1974, pág. 172), pero en general se puede describir los procesos de la siguiente manera:

MATERIA PRIMA

Muchas sustancias orgánicas sirven como materia prima para la obtención de carbón activado. Según los recursos de la región, los procesos aplicados y el carbón deseado, se puede utilizar como materia prima sustancias orgánicas tales como: madera, carbón de piedra, grafito, hollín, melaza, cáscaras de coco, huesos, sangre, bagazo, aserrín, entre otros.

El uso de determinado tipo de materia orgánica depende de los costos de la misma y de la calidad o aplicación que se desee para el carbón activado.

LA CARBONIZACIÓN

La primera etapa en la fabricación de carbón activado consiste en la carbonización de la materia cruda, un proceso térmico con ausencia de aire.

Según un estudio de CHANEY de 1919, la temperatura de la carbonización debería ser menor a los 600°C para permitir el cambio del carbón a un estado activo.

Este resultado, elaborado hace 70 años, fue comprobado por muchos otros trabajos científicos y juega un papel importante como parámetro en el proceso de carbonización. Aunque no es una ley, y se conoce también de procesos con buenos resultados usando temperaturas más altas. (HASSLER 1974, pág. 1720)

Algunos efectos del tratamiento térmico (pirólisis) de un material orgánico son visibles por el cambio del color y de la estructura del material, otros pueden ser determinados por análisis químicos o aplicando métodos físicos como difracción por rayos X.

Una pirólisis de materiales orgánicos causa la descomposición de las moléculas, y así un desprendimiento de un líquido y un gas que contiene agua, hidrocarburos, hidrógeno, monóxido de carbono y muchas sustancias orgánicas más, que son volátiles y muy tóxicas.

| COMPONENTES | % del peso seco | |
|-------------|-----------------|---------------------|
| | madera | cascarilla de arroz |
| Carbono C | 52.3 | 39.0 |
| Hidrógeno H | 5.8 | 4.9 |
| Oxígeno O | 38.8 | 33.9 |
| Nitrógeno N | 0.2 | 0.5 |
| Azufre S | trazas | 0.01 |
| Ceniza | 1.4 | 21.6 |

TABLA # 6: ANALISIS QUIMICO DE MATERIA ORGANICA
FUENTE: KAUPP 1985, pág. 3

Durante la carbonización, la mayoría de los elementos no-carbónicos se desprende y forma un gas combustible. Pero debido al alto calor también se producen y evaporan fragmentos de moléculas orgánicas, las que se condensan como líquido destilado (alquitrán). Por su composición química, tanto el gas como el líquido, tienen cierta toxicidad y exigen un tratamiento especial.

La química de la carbonización de materiales orgánicos, es decir la descomposición térmica de moléculas orgánicas, es muy complicada y depende de

la composición de la materia prima. Un ejemplo típico lo observamos en la tabla # 6 que muestra 2 diferentes materiales usados para la fabricación de carbón activado: madera y cascarillas de arroz.

Cada elemento dentro de la sustancia orgánica juega un papel importante en el proceso de la carbonización.

Durante el calentamiento de la biomasa a temperaturas entre 200°C y 400°C, el hidrógeno, oxígeno y parte del carbón forman una mezcla muy complicada de cientos de compuestos. Esta mezcla se puede ver como humo y por temperaturas bajo 150°C (por enfriamiento) se condensa como líquido negro o pardo y, dependiendo de la humedad de la biomasa, este líquido puede ser viscoso como aceite o asfalto o muy líquido como agua. El líquido, conocido como alquitrán, tiene un olor desagradable y contiene tantas sustancias nocivas (como benceno, furfural, benzpirenos, etc.), que su eliminación causa muchos problemas.

La tabla # 7 indica la cantidad de gases y líquidos formados durante un tratamiento térmico de cascarillas de arroz.

Las observaciones y mediciones durante el proceso de carbonización en el horno especial de la Planta Piloto muestran resultados similares. (Ver capítulo 3)

La composición del gas o líquido desprendido durante la pirólisis se puede dividir en 3 partes:

a) AGUA o vapor, que estaba físicamente como humedad en la biomasa o que se formaba de los elementos hidrógeno y oxígeno por una reacción química.

b) GAS COMBUSTIBLE o gas pobre con una composición aproximada de:

| | | |
|---------------------|-----------------|----------|
| monóxido de carbono | CO | 15 - 30% |
| hidrógeno | H ₂ | 12 - 20% |
| metano | CH ₄ | 0.5 - 7% |
| dióxido de carbono | CO ₂ | 3 - 15% |
| nitrógeno | N ₂ | 50 - 58% |

c) HIDROCARBUROS pesados de la fórmula C_nH_m, los cuales forman el líquido negro o alquitrán. Su naturaleza puede variar entre gasolina (octano C₈H₁₈), un líquido de baja viscosidad, hasta betún (C₃₆H₇₄), una masa negra muy viscosa.

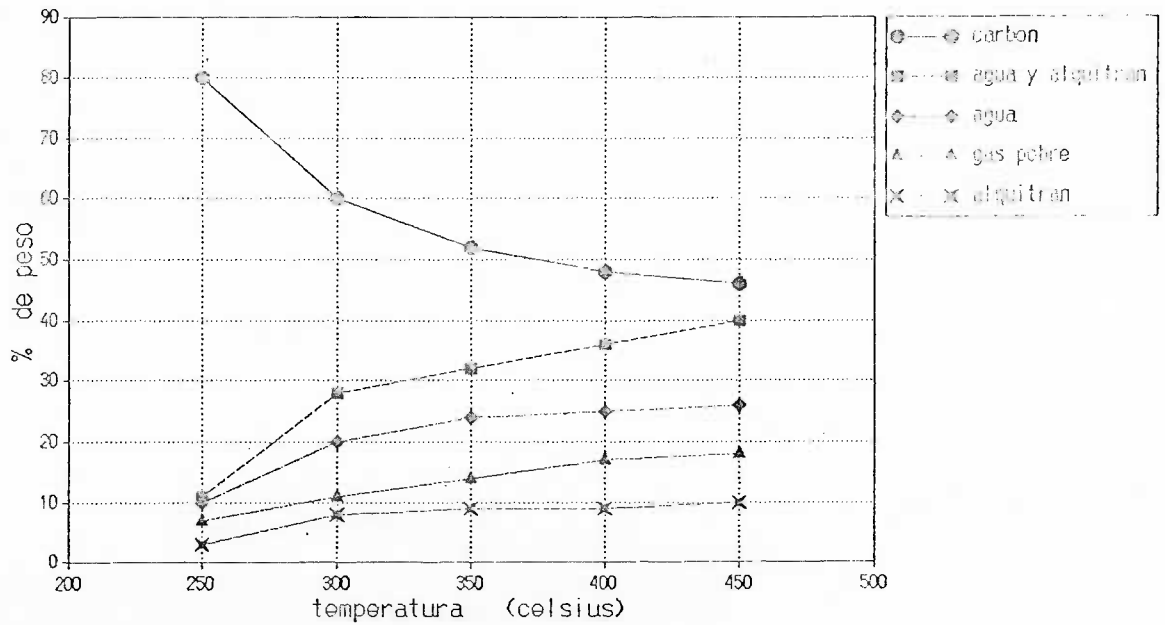
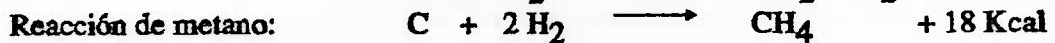
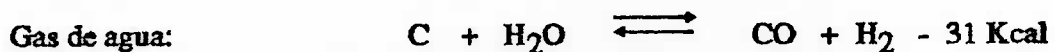
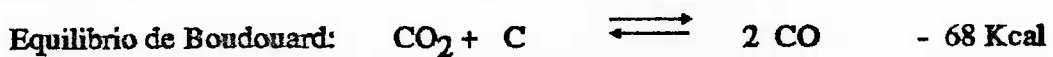
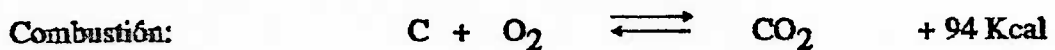


TABLA # 7: PRODUCTOS FORMADOS DURANTE LA PIROLISIS DE CASCARILLAS DE ARROZ

FUENTE: KAUPP 1985, pág. 9

Para la formación del gas pobre se puede considerar las reacciones siguientes



Las reacciones y sus equilibrios dependen de la temperatura de la carbonización y por eso la composición del gas pobre varía entre los porcentajes indicados.

El poder calorífico de este gas pobre, de aproximadamente 1200 - 1500 kcal/m³, permite su aplicación como combustible p.ej. en motores de combustión interna. Y por eso comúnmente se utilizan los materiales orgánicos como materia prima para la gasificación, es decir, para la producción de un gas combustible.

El tratamiento térmico de la biomasa durante la carbonización desintegra casi totalmente la sustancia orgánica. Por la destrucción de las moléculas orgánicas quedan átomos liberados de carbón elemental, los cuales se agrupan en formaciones cristalográficas, conocidas como grafito cristalita elemental. (HASSLER 1974, pág. 184ff, SMISEK/CERNY 1970, pág. 11, 49ff)

La estructura de estas cristalitas es irregular y así permanecen espacios entre ellas, formando cierta porosidad, y por esto el carbón ya tiene una pequeña capacidad de adsorción.

LA ACTIVACION

Se conoce 2 diferentes métodos de activación:

La *Activación química* aplica reactivos especiales para influir en el proceso de pirólisis.

En la *Activación física* se permite la reacción del carbón inactivo con sustancias adecuadas, normalmente gases.

Ambos términos, activación química y física, son inadecuados y no indican la verdadera naturaleza de los procesos respectivos. Pero desde hace mucho tiempo, estos términos son utilizados en la práctica y en la literatura.

En realidad, el proceso de activación es una combinación de reacciones químicas (reacción del carbón o restos de las moléculas orgánicas con los reactivos agregados o con el oxígeno del aire) y reacciones físicas (reestructuración o conversión de las cristalitas de carbono).

La activación química

Los reactivos para este tipo de activación influyen en el proceso de carbonización, de manera que la producción de alquitrán y de la fase acuosa en el destilado es menor que por una carbonización normal.

Por eso se aumenta la formación de carbón en el producto carbonizado y la temperatura para la pirólisis es menor.

Una carbonización bajo estas condiciones produce un carbón que tiene las propiedades de un buen carbón activado, después de eliminar el agente activante.

La carbonización con cloruro de metales p.ej. CaCl_2 , MgCl_2 , ZnCl_2 se aplica con resultados considerables. El efecto de la carbonización se aumenta utilizando estas sales deshidratantes de la manera siguiente:

- Impregnar el material orgánico con una solución acuosa de la sal.
- Secarlo y carbonizar a temperaturas entre 400°C y 900°C .
- Después lavar con ácido y agua.

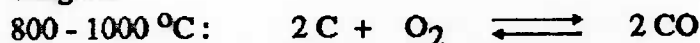
(HASSLER 1974, pág. 173; SMISEK/CERNY 1970 pág. 13ff)

Otros agentes de la activación química son sales de potasio y sodio, p.ej. K_2CO_3 , pero no se puede excluir, que los átomos de los metales penetren temporalmente a la estructura de carbón, influyendo así la formación de las cristalitas elementales.

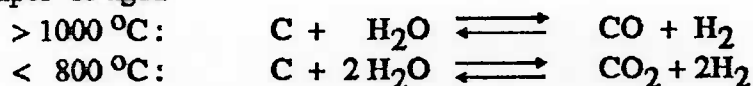
La activación física

Por medio de ciertos agentes como vapor de agua, dióxido de carbono, oxígeno de aire se inicia una reacción química por altas temperaturas, la combustión del carbón no organizado y la formación de cristalitas de carbón. Las ecuaciones correspondientes a los diferentes agentes oxidantes son las siguientes:

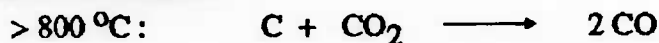
Oxígeno



Vapor de agua



Dióxido de carbono



El problema en general de estos tipos de activación es el control de temperatura. Especialmente en la producción industrial hay muchas dificultades en la aplicación de la activación física. Numerosas patentes cubren las soluciones en el manejo de la activación física. Por ejemplo, se aplica gases inertes para diluir el gas oxidante y controlar así la temperatura o se varía la construcción de los reactores o de los calentadores. Por la tecnología del lecho fluidizado se logró desarrollar un buen método para manejar los procesos y la temperatura de la activación física, pero esta tecnología necesita un alto nivel técnico y mecánico para su realización.

HASSLER (1974, pág. 179-182) menciona también otros agentes para la activación física:

Dolomita ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$) y *sulfatos* (Na_2SO_4) reaccionan por las temperaturas altas de la activación como oxidantes. La dolomita desprende CO_2 y se reduce a los óxidos de calcio y magnesio, los sulfatos oxidan el carbón reduciéndose a sulfuros.

Acido fosfórico o fosfatos de sodio, potasio o calcio reaccionan por temperaturas de 800 - 1000°C con el carbón, oxidándole y reduciéndose a fosfuros.

Hidróxido, tiocianuro y sulfuro de sodio se aplica también en los procesos de activación. Por temperaturas entre 500 y 900°C se puede obtener un carbón activado, por ejemplo con aserrín como materia prima, pero los costos elevados de estos agentes limitan su uso.

Hassler informa también sobre otros agentes potenciales para activaciones, pero sin indicar sus posibles aplicaciones:

| | |
|----------------------|----------------------|
| sales de amonio | ácido clorhídrico |
| boratos | dióxido de manganeso |
| ácido bórico | sales de níquel |
| óxido de calcio | ácido nítrico |
| cianuros | azufre |
| compuestos de hierro | |

1.4. Carbón Activado por un proceso de laboratorio

Como base para la construcción de la Planta Piloto sirvieron los resultados del proyecto de investigación "Carbón Activado a partir de las cascarillas de arroz", realizado en el Instituto de Química de la ESPOL en Guayaquil/Ecuador. (LEHNER 1987)

Esta investigación tuvo como objetivos:

- la elaboración de carbón activado mediante un proceso sencillo, utilizando una tecnología propia y apropiada a los recursos del país.
- el uso de las cascarillas de arroz como materia prima para reducir la contaminación producida por éstas en el campo.
- el ahorro de divisas al sustituir una parte del carbón activado importado por un producto de elaboración nacional.

La meta principal fue desarrollar un proceso para obtener carbón activado sin la utilización de agentes químicos y con equipos simples. La investigación se concentró a las dos etapas, carbonización y activación, y también al control de calidad del carbón. La figura # 1 muestra el esquema de los procesos del laboratorio para obtener carbón activado a partir de las cascarrillas de arroz.

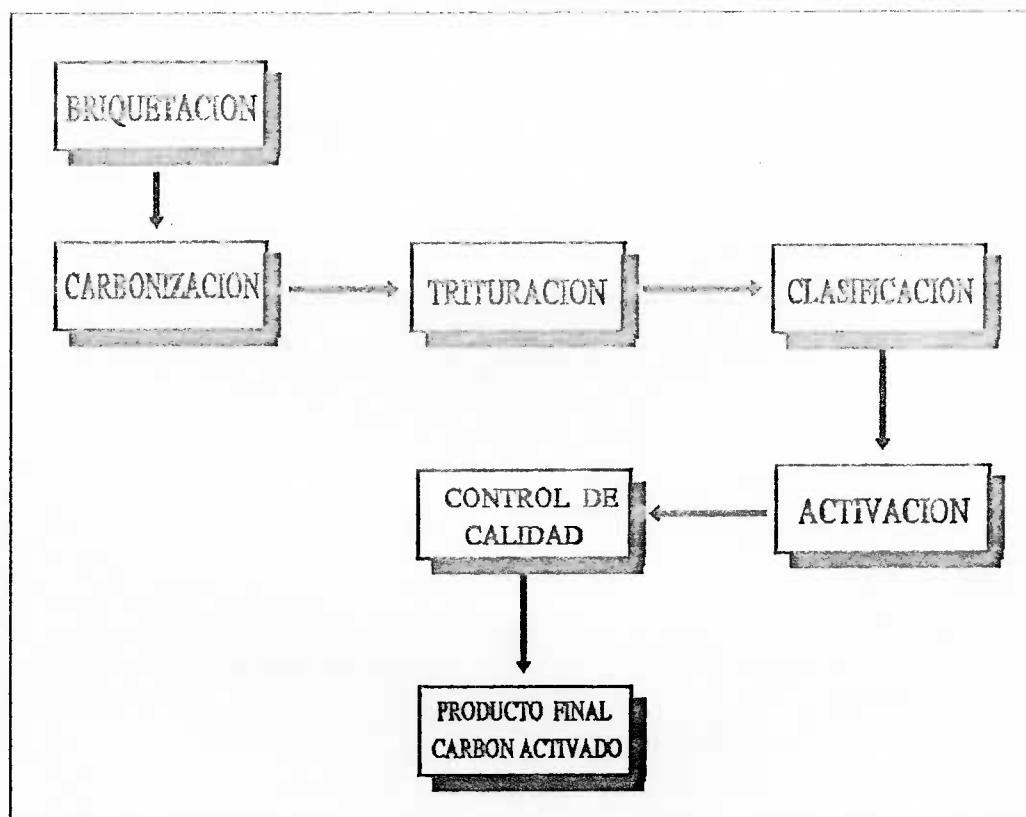


FIGURA # 1: PROCESO DE LABORATORIO PARA OBTENER CARBON ACTIVADO A PARTIR DE LAS CASCARILLAS DE ARROZ.

Para el primer paso, la *briquetación* de las cascarrillas de arroz, utilizamos una máquina COMPRESOR MI-15 en la piladora "Guadalupe" y obtuvimos briquetas compactas de cascarrillas de arroz.

La compactación de las cascarrillas tiene dos ventajas importantes:

- Se recibe un material duro, lo que permite tritarlo después de la carbonización y así obtener partículas de diferentes tamaños.
- La carbonización, es decir, la descomposición con la ausencia de oxígeno, es posible porque las briquetas no contienen aire.

La carbonización de las briquetas se realizó en un horno sencillo, construido por la Facultad de Mecánica de la ESPOL, que nos permitió carbonizarlas en su cámara central de forma cilíndrica. Con una temperatura entre 300 y 400°C, por un lapso de 10 horas, utilizando como combustible desechos de madera, se calentó las briquetas, se enfrió el gas desprendido para separar el agua y el alquitán y se descargó el gas por una chimenea al ambiente.

Después de una trituración por medio de un molino a mano, siguió la activación del carbón mediante otro tratamiento térmico. Ensayos con diferentes temperaturas, variaciones de las condiciones, aplicaciones de diferentes reactivos químicos fueron hechos teniendo siempre como meta el encontrar un método simple para conseguir un carbón activado de una calidad aceptable.

El extracto de los resultados más importantes de esta investigación en la tabla # 8a y 8b, nos permite comparar la calidad de un carbón activado por un simple tratamiento térmico (p.ej. No. 12D,72Q) con la de un carbón activado del mercado nacional.

El control de calidad de las diferentes muestras de carbón activado constituyó un problema, porque la literatura no indica un método adecuado a las necesidades de la investigación. La determinación de la adsorción por un carbón activado, ya sea en la industria química (MERCK 1986, CALGON 1987) o las que se detallan en las publicaciones científicas (ASTM D 2414, ASTM D 1510, ASTM D 1618, GUERASIMOV 1971, HASSLER 1974), por un lado no es exacta (método con yodo) y por otro lado es muy complicada (adsorción de gases) o utiliza sustancias nocivas (benceno, diclorobenceno). Por eso elaboramos un método propio, el cual cumple las exigencias de nuestro trabajo de investigación: exactitud, rapidez, simplicidad, comparabilidad.

El método desarrollado determina la adsorción de un colorante (anaranjado de metilo) en una solución acuosa por el contacto con el carbón activado. El examen de la concentración del colorante por un fotómetro antes y después del contacto con el carbón activado permite obtener en menos de 10 minutos datos exactos, los cuales pueden servir para indicar la calidad del carbón comparándolo con otros tipos de carbón activado.

| ENSAYO # | CARBON ACTIVADO DE LA MATERIA PRIMA | TRATAMIENTO | de muestra y de muestro 2.0E-7 mol/g | ADSORCION | | |
|----------|-------------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | | con respecto a la solución standard % | con respecto al filtro LARK % | con respecto al filtro papa % |
| 3 A | Filtro LARK | estado normal, sin tratamiento | 4.45 | 73.5 | 100.0 | 109.8 |
| 4 A | Filtro LIDER | estado normal, sin tratamiento | 3.50 | 57.8 | 78.6 | 86.4 |
| 5 B | Cascarillas de arroz | lavar con H ₂ O hirviendo, filtrar, calentar a 300 °C en 60 min. | 0.95 | 15.3 | 21.3 | 23.4 |
| 8 C | Cascarillas de arroz | lavar con HCl y se enjuaga con H ₂ O potab. | 1.30 | 22.0 | 29.2 | 32.0 |
| 9 C | Cascarillas de arroz | calentar a 400 °C por 30 minutos | 3.15 | 53.4 | 70.7 | 70.7 |
| 10 C | Cascarillas de arroz | hervir con HCl por 5 min., lavar con H ₂ O | 1.55 | 26.2 | 34.8 | 38.2 |
| 11 D | Cascarillas de arroz | lavar con H ₂ O y calentar a 350 °C en 1 h | 3.10 | 52.5 | 69.6 | 76.5 |
| 12 D | Cascarillas de arroz | lavar con H ₂ O, calentar a 300 °C en 30 min | 3.50 | 60.1 | 79.7 | 87.6 |
| 15 E | Cascarillas de arroz | hervir con ZnCl ₂ y enjuagar con H ₂ O pot. | 3.30 | 54.0 | 75.2 | 82.7 |

TABLA # 8a: COMPARACION DE LA ADSORCION DE CARBON ACTIVADO A PARTIR DE CASCARILLAS DE ARROZ (1ª PARTE)

FUENTE: LEHNER 1987, pág. 30-37

| ENSAYO # | CARBON ACTIVADO de la MATERIA PRIMA | TRATAMIENTO | ADSORCION | | | |
|----------|-------------------------------------|--|---|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | de anaranjado de metilo $\times 10E^{-7}$ mol/g | con respecto a la solución estándar % | con respecto al filtro LARK % | con respecto al filtro pipa % |
| 16 E | Cascarillas de arroz | lavar con NaOH y enjuagar con H ₂ O pot. | 3.50 | 56.4 | 78.6 | 86.4 |
| 17 F | Cascarillas de arroz | agregar HCl, lavar con H ₂ O y calentar a 350 °C en 30 min. | 3.20 | 54.6 | 73.0 | 80.2 |
| 18 F | Cascarillas de arroz | agregar NaOH, lavar con H ₂ O y calentar a 350 °C en 30 min. | 0.90 | 15.9 | 21.3 | 23.4 |
| 19 F | Cascarillas de arroz | agregar ZnCl ₂ al 10% hervir, lavar con H ₂ O y calentar a 350 °C en 30 min. | 3.40 | 57.1 | 76.4 | 84.0 |
| 26 H | Cascarillas de arroz | calentar a 350 °C en 30 min. | 2.50 | 42.0 | 56.1 | 61.7 |
| 46 M | Filtro de pipa | estado normal, sin tratamiento | 4.05 | 64.8 | 91.0 | 100.0 |
| 47 M | Cascarillas de arroz | lavar con H ₂ O desionizada, calentar 350 °C en 30 min. | 3.85 | 61.6 | 86.5 | 95.0 |
| 62 | Cascarillas de arroz | lavar, secar al ambiente, calentar a 700 °C tapado | 3.15 | 53.3 | 70.7 | 77.7 |
| 63 | Muestra vieja de 47M | calentar a 350 °C en 30 min. | 3.20 | 54.2 | 72.0 | 79.0 |
| 72 Q | Cascarillas de arroz | lavado, secado al ambiente, calentado de 0 °C a 350 °C | 3.90 | 66.1 | 87.6 | 96.2 |
| 73 Q | Cascarillas de arroz | lavado y secado al sol, calentado de 0 °C a 350 °C | 2.75 | 46.6 | 61.8 | 67.9 |

TABLA # 8b: COMPARACION DE LA ADSORCION DE CARBON ACTIVADO A PARTIR DE CASCARILLAS DE ARROZ (2^{da} PARTE)

FUENTE: LEHNER 1987, pág. 30-37

Nuestro método *ADAMCA* (*Adsorción de Anaranjado de Metilo por Carbón Activado*) para determinar la calidad de carbón activado consta de los siguientes pasos:

- 1) Pesar 0,200 g de carbón activado seco.
- 2) Agregar 10,0 ml de la solución de anaranjado de metilo de la concentración 3.0×10^{-5} mol/l
- 3) Agitar en un tubo de ensayo por 2 minutos.
- 4) Filtrar inmediatamente la solución con un papel filtro para precipitado fino.
- 5) Utilizar un fotómetro para determinar la absorbancia del filtrado con una longitud de onda de 465 nm.
- 6) Determinar con la curva standard la concentración del colorante en el filtrado.

La descripción detallada de este método ADAMCA se encuentra en el apartado 2.3. de este informe.

Como resultado final de este proyecto de investigación "Carbón Activado a partir de las cascarillas de arroz" se puede consignar lo siguiente:

Las cascarillas de arroz sirven para elaborar carbón activado de una calidad aceptable y comparable con la del carbón comercial. El proceso de su carbonización y activación puede ser realizado sin agentes químicos y con equipos sencillos. Mediante la briquetación de las cascarillas de arroz se puede obtener carbón en partículas de diferentes tamaños, lo que facilita su aplicación.

2. PROCESOS Y EQUIPOS DE LA PLANTA PILOTO

2.1. Objetivos de la planta piloto

Partiendo de los resultados de la investigación "Carbón activado a partir de las cascarrillas de arroz", y como segunda etapa de la misma, nació la intención de aprovechar el éxito de la investigación y utilizar el proceso elaborado en el laboratorio para una producción a nivel industrial. Como es común para los procesos químicos, y muy necesario y obligatorio en la industria química, hay que realizar la producción primero a un nivel semi-industrial, es decir por una planta piloto.

Los objetivos para la construcción de la "Planta Piloto para la Producción de Carbón Activado" fueron los siguientes:

- transformar las condiciones del proceso de laboratorio a una producción semi-industrial
- diseñar y construir los equipos con los propios recursos de la ESPOL y del país
- obtener una experiencia para una producción industrial
- formar el personal en el manejo de los equipos y procesos
- mejorar el procedimiento y los equipos
- buscar aplicaciones y un mercado para el carbón producido
- tener la Planta Piloto como ejemplo para divulgar el proceso a nivel nacional e internacional.

El diseño y la construcción de los equipos estaban dirigidos a buscar una tecnología apropiada. Con materiales comunes obtenidos en el mercado nacional, con obras y herramientas convencionales, se trataba de construir equipos simples, para cuyo manejo y mantenimiento serían necesarios pocos conocimientos y experiencia por lo cual podrían ser realizados también por personal no calificado.

A parte de esta meta principal de cierta simplicidad, fue un principio más importante la seguridad de los equipos al respecto de la protección del medio ambiente y de los empleados de la planta. Más detalles sobre este aspecto se encuentran en el capítulo 2.4.: Medidas de seguridad y protección del medio ambiente.

Las intenciones de la producción de Carbón activado en la Planta Piloto fueron similares a las del proyecto de investigación preliminar: Obtención de carbón activado mediante un proceso sencillo y con desechos agrícolas como materia prima, reducción de la contaminación causada por los desechos orgánicos y por el proceso de producción, ahorro de divisas gracias a la sustitución de una parte del carbón importado.

Adicionalmente, el propósito de divulgar el proceso de la obtención de carbón activado era también importante y la perspectiva de tener por la planta piloto una fuente de carbón activado barata y segura para poder utilizar el carbón producido en otros proyectos de investigación: Purificación de agua potable, tratamiento de las aguas de los laboratorios de camarones, obtención de oro, etc..

2.2. El proceso de producción

Orientándose a la demanda de los consumidores del carbón activado se decidió producir 4 diferentes tipos de carbón activado:

- Tipo IV partículas con un tamaño superior a los 3 mm.
- Tipo III gránulos con un diámetro de 1-3mm.
- Tipo II gránulos con un diámetro de 0,6-1 mm.
- Tipo I polvo con partículas de un tamaño inferior a los 0,6 mm.

Estos diferentes tipos de partículas pueden ser usados para varias aplicaciones como:

- filtros para gases (tipo II y III)
- filtros para cigarrillos (tipo II)
- filtros para líquidos (tipo III y IV)
- adsorbente en general (tipo I)

Para elaborar estos diferentes tipos de carbón activado es imprescindible tener como materia prima partículas gruesas para triturarlas y luego clasificarlas. Por esta razón, materiales como el aserrín, las cascarillas de arroz o café exigen una compactación antes de los procesos de carbonización y activación. La figura # 2 muestra el esquema en general y las diferentes etapas de la planta piloto, la figura # 3 muestra la planta piloto con la ubicación de los equipos

Procesos de la planta piloto para la producción de carbón activado :

- 1 **Materia prima**
cascarillas de arroz, cáscaras de café, aserrín, madera, cáscaras de coco.
- 2 **Briquetación**
formar briquetas duras y compactas de la materia prima fina.
- 3 **Carbonización**
Calentamiento a 500 °C y pirólisis de la materia orgánica.
- 4 **Trituración**
Moler el producto de la carbonización.
- 5 **Clasificación**
Tamizar y separar el polvo y las partículas.
- 6 **Activación**
Tratamiento térmico del carbón con 350 °C/1 hora
- 7 **Control de calidad**
Determinar la capacidad de adsorción del carbón activado.

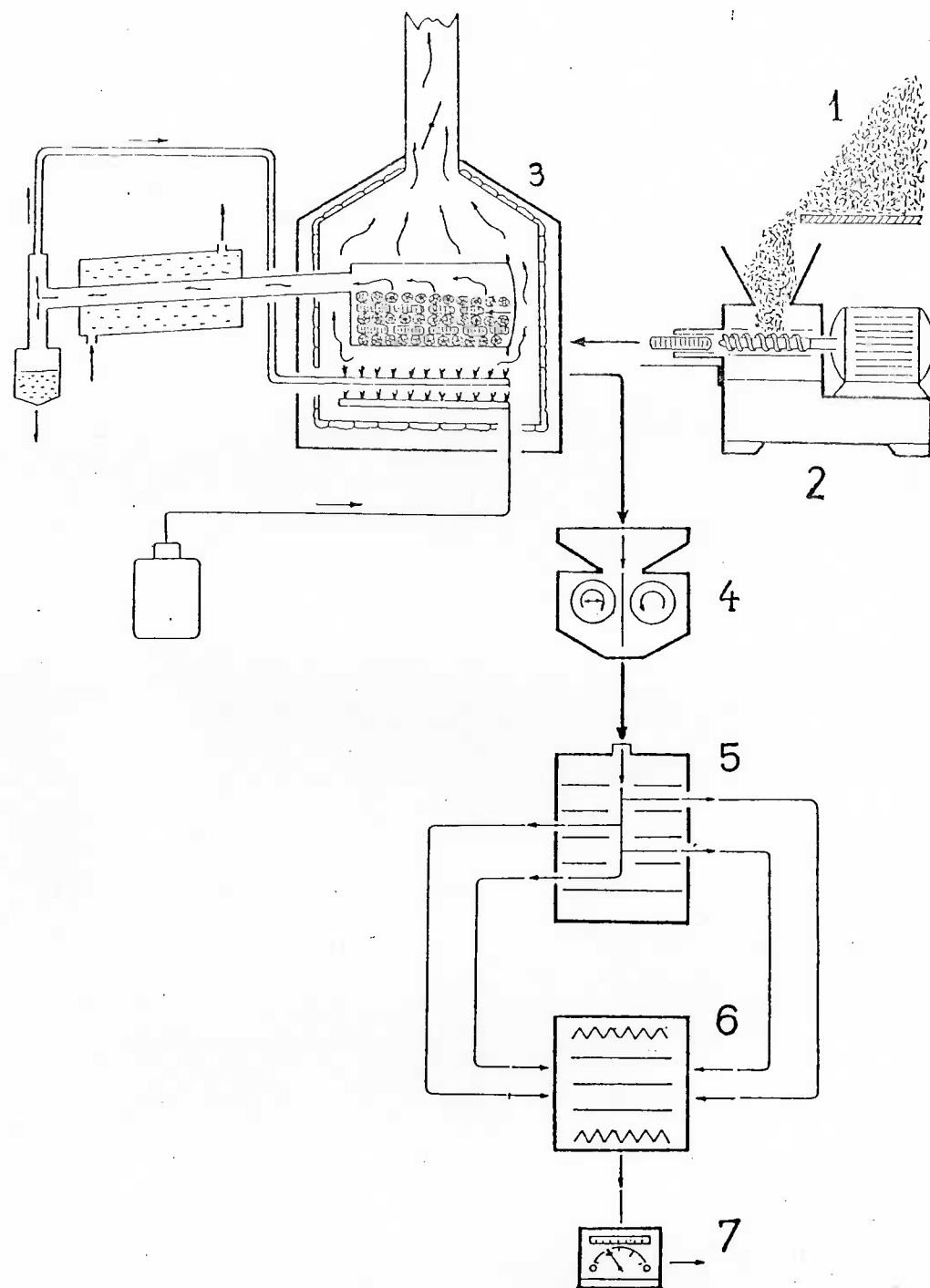
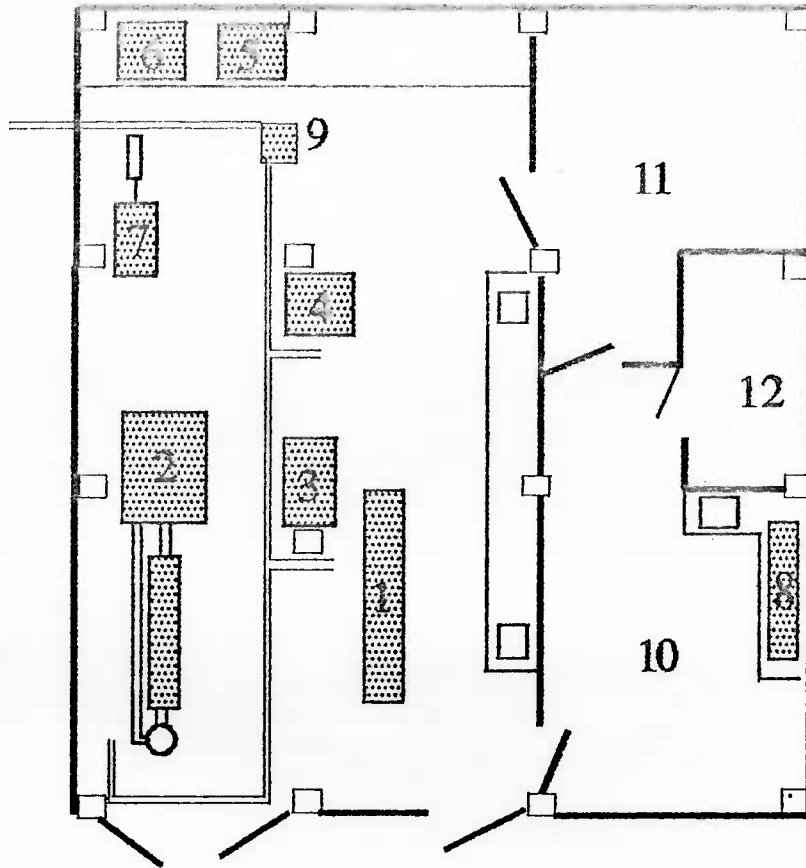


FIGURA #2: ESQUEMA DE LA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO



- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1 Máquina Briquetadora | 7 Homo experimental |
| 2 Horno de Carbonización | 8 Control de Calidad |
| 3 Molino | 9 Sistema de succión |
| 4 Tamices | 10 Administración |
| 5 Homo eléctrico | 11 Bodega |
| 6 Homo a gas | 12 Baño |

FIGURA #3 : LA PLANTA PILOTO Y LA UBICACION DE LOS EQUIPOS

El proceso de producción es discontinuo, pero si se maneja paralelamente los diferentes equipos se puede lograr una producción continua de 30 a 40 Kg. diarios. El proceso limitante de la producción es la activación, pues los hornos de activación tienen una capacidad limitada. Para incrementar la producción solamente sería necesario construir varios hornos, aprovechando así la capacidad de los demás equipos.

Capacidad de producción con cascarillas de arroz como materia prima.

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| briquetadora | 35 kg/h o 280 kg/día |
| horno de carbonización | 100 kg/tanque o 200 kg/día |
| molino | 470 kg/día |
| tamices | 240 kg/día |
| horno de activación eléctrico | 1,5 kg/bandeja o 16 kg/día |
| horno de activación a gas | 1,5 kg/bandeja o 16 kg/día |

Los detalles de los diferentes equipos con sus datos técnicos respectivos se encuentran en los capítulos siguientes.

2.2.1. La briquetación

La materia prima, como cascarillas de arroz, cáscaras de café o aserrín, no puede ser usada directamente para la carbonización debido a su naturaleza fina. Calentando estos materiales en un horno cerrado, fuera de contacto con aire, hay cierta combustión de los mismos por el volumen de aire que se encuentra entre las cascarillas finas.

De una pirólisis de estos materiales también sale el carbón solamente como polvo o partículas finas y suaves, las cuales dificultan su aplicación. Mediante el proceso de la briquetación es posible compactar estos materiales a briquetas duras y obtener así un material de partida ideal para la producción de carbón activado:

- las briquetas por su densidad de 1.35 g/cm³ contienen mucho material y llenando el horno de carbonización con ellas se puede realizar la pirólisis bajo la ausencia del aire.
- después de la pirólisis, las briquetas carbonizadas todavía son tan compactas, que por una trituración adecuada se puede obtener desde partículas finas (<1mm) hasta gránulos gruesos (>3mm), los cuales facilitan su aplicación p.ej. para filtros de diferentes tipos.

La máquina para fabricar las briquetas es la única de este tipo en el país, proviene de Taiwan y tiene la denominación: MARCA WONG BRIQUETTOR Model: SB-15 de la KYOWA INDUSTRIAL CORPORATION TAIPEI/TAIWAN (*1)

(*1) Una briquetadora similar ofrece también la compañía SUN CHAIN TRADING CA.LTD. TAIPEI/TAIWAN bajo el nombre GHAIN-HUSK BRIQUETTE MACHINE.

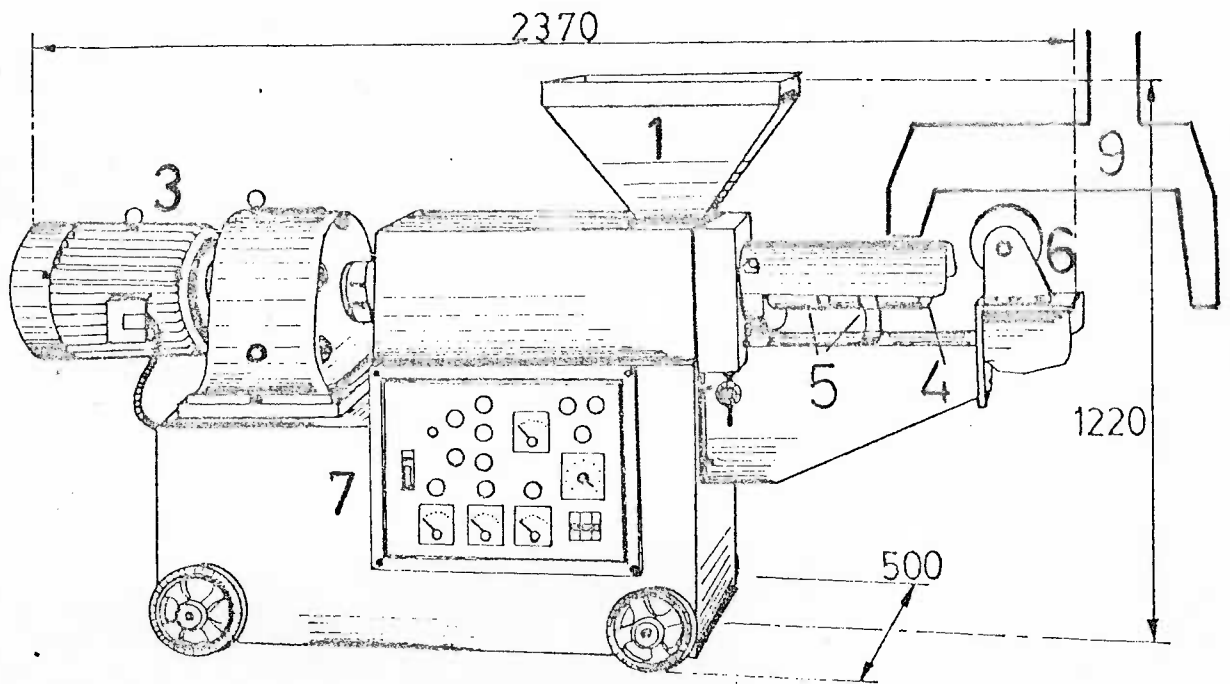


FIGURA #4: LA MAQUINA BRIQUETADORA

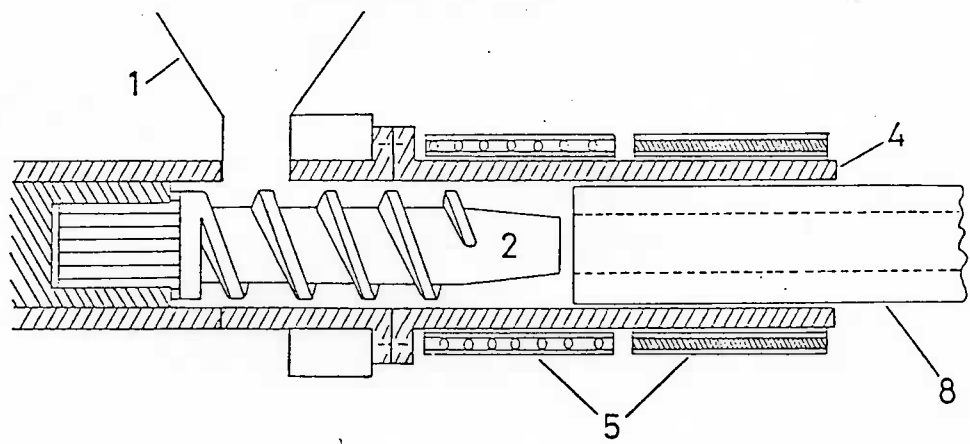


FIGURA #5: ARRASTRE Y EXTRUSION EN LA BRIQUETADORA

Las figuras # 4 y 5 muestran la briquetadora SB-15 cuyo funcionamiento es el siguiente:

Por la tolva (1) se carga la máquina con el material. El tornillo sin fin (2), girado por el motor (3), transporta el material hacia el dado caliente (4) causando una alta presión en el mismo. Por las resistencias (5) se calienta el dado a 400°C. Las briquetas (8), saliendo del dado (4), son cortadas por el rodillo (6). El panel de control (7) permite el manejo de la briquetadora, el control del motor y de la temperatura.

Por medio de la campana de ventilación (9), conectada con el extractor central de la Planta Piloto (véase también apartado 2.4.), es posible aspirar los gases y humos formados por el calentamiento del material.

Según el manual de esta máquina se puede briquetar no solamente cascarillas de arroz, sino también aserrín, cáscaras de maní, de trigo, de coco, de café.

Muy importante para el proceso de la briquetación es:

- la humedad del material: Según nuestra experiencia la materia prima debe tener no más de 10 % de humedad, aunque el manual indique 13 %. Con más del 10 %, el agua evaporada por la alta temperatura causa una presión brusca dentro del dado (4) y por las explosiones siguientes se desprenden partículas de las briquetas hasta una distancia de aproximadamente 20 m alrededor de la máquina
- el tornillo sin fin: En la parte final se gasta el tornillo por la alta presión y fricción, por eso es preferible tener un tornillo sin fin adicional como repuesto, y si es necesario repararlo, hacerlo con una soldadura especial según la descripción del manual.

La briquetación por esta máquina funciona por la técnica de extrusión conocida, la cual aplica solamente presión y temperatura para transformar la materia prima en un material compacto.

Para la elaboración de carbón activado este hecho tiene mucha importancia porque no hay ninguna alteración química de la materia prima y tampoco se utiliza aditivos químicos: Las briquetas obtenidas por esta máquina briquetadora, a parte de su utilización como material de partida para el proceso de la carbonización, pueden ser usadas como combustible. Con un poder calorífico de 5140 kcal/kg, las briquetas de cascarilla de arroz sirven excelentemente como combustible sólido, pueden sustituir p.ej. a la leña y son aplicables para calentar el horno de carbonización. Por los bajos costos de la fabricación de las briquetas (la materia prima no cuesta nada, 1 kg briqueta exige 0,197 kWh de energía con un costo de 0,0085 US\$ (véase también capítulo 5)), se podría buscar más aplicaciones de éstas como combustible sólido. Pero este asunto no era la tarea del proyecto y por eso nos limitamos a la utilización de las briquetas como materia prima y como combustible para la carbonización.

DATOS TECNICOS DE LA BRIQUETACIÓN:

Pre calentamiento de la máquina a 400°C: 25 min.
Recalentamiento después 20-30 min. de trabajo: 10 min.
Tamaño de las briquetas: diámetro: 55 mm, longitud: variable hasta 1 m
Humedad de la materia prima: 7 - 10%
Densidad de las briquetas: 1,1 - 1,4 g/cm³
Consumo de energía: 0,19 - 0,40 kWh/kg
Capacidad de la máquina: 300 kg/día

2.2.2. La carbonización

El proceso de la carbonización o pirólisis consiste nada más que en un calentamiento de la materia prima fuera de contacto con el aire. Para esto se necesita un recipiente cerrado, pero con una salida para los gases formados durante el proceso. La temperatura deseada de 400-500°C, que permite la descomposición de la materia orgánica, puede ser obtenida en un recipiente grande solamente por un buen aislamiento del mismo o por un calentamiento total.

El diseño del HORNO DE CARBONIZACION (figura # 6) estaba orientado a un calentamiento uniforme de todo el material dentro del recipiente y por eso el tanque con el material (1) está ubicado completamente dentro del horno, de esta manera es calentado por todos los lados.

La descripción del HORNO DE CARBONIZACION en detalle (véase las figuras # 6, 7, 8):

Como recipiente para la materia orgánica sirve un tanque metálico usado de un volumen de 200 l del mismo tipo que se usa para aceite o gasolina. Como salida de los gases hay un tubo en el fondo (2) de 50 mm de diámetro en la parte superior.

Para poder cargar y descargar el tanque fácilmente, se cortó la tapa, obteniendo así un acceso total al interior. Problemático fue cerrar bien el tanque, pues los gases formados causan cierta presión dentro del tanque (hasta 0,3 atm.) aunque pueden estos salir por el tubo, además por la alta temperatura alrededor del tanque (600°C y más) y la dilatación del tanque y de la tapa es difícil cerrarlo herméticamente. Por las fugas de gas y por la inflamación de este gas pobre, el tanque mismo y todo el horno puede sobrecalentarse y causar así daños en la construcción metálica, además de una carbonización incontrolada. Gracias a la construcción especial de la tapa (3) y por la utilización de una fibra de cerámica (4) como material aislante es posible evitar fugas de gas.

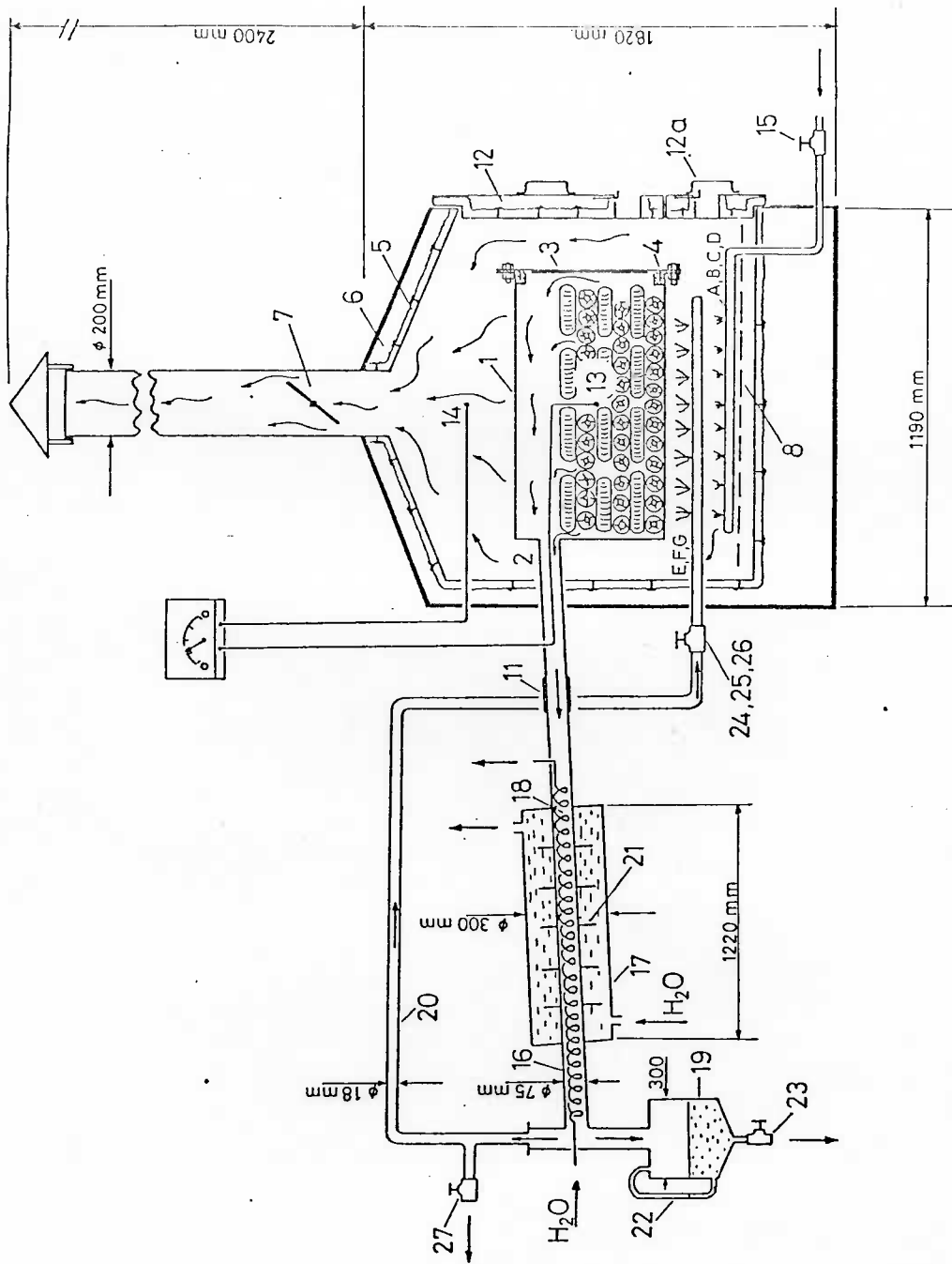


FIGURA # 6: HORNO DE CARBONIZACION

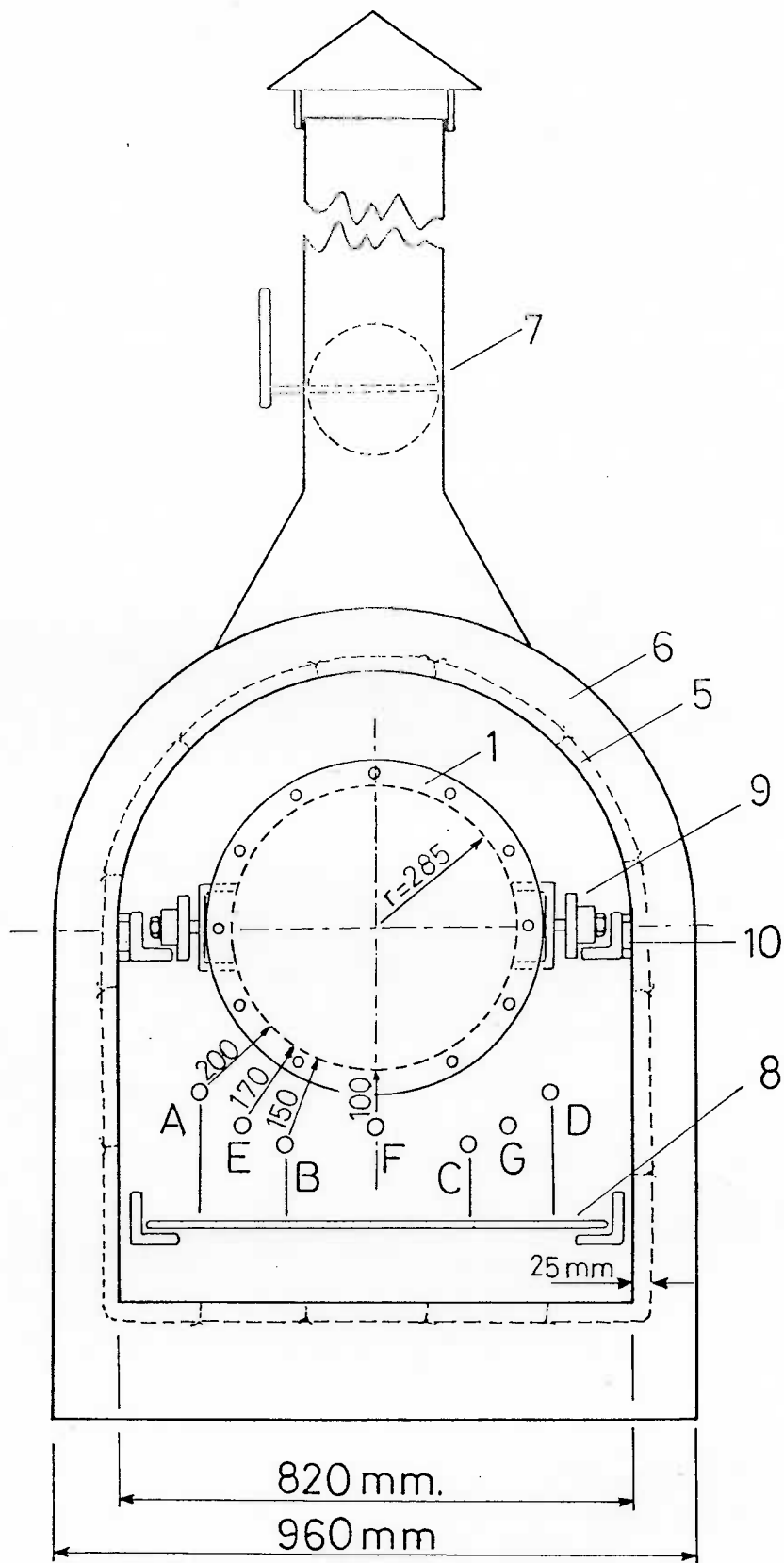


FIGURA # 7: INTERIOR DEL HORNO DE CARBONIZACION

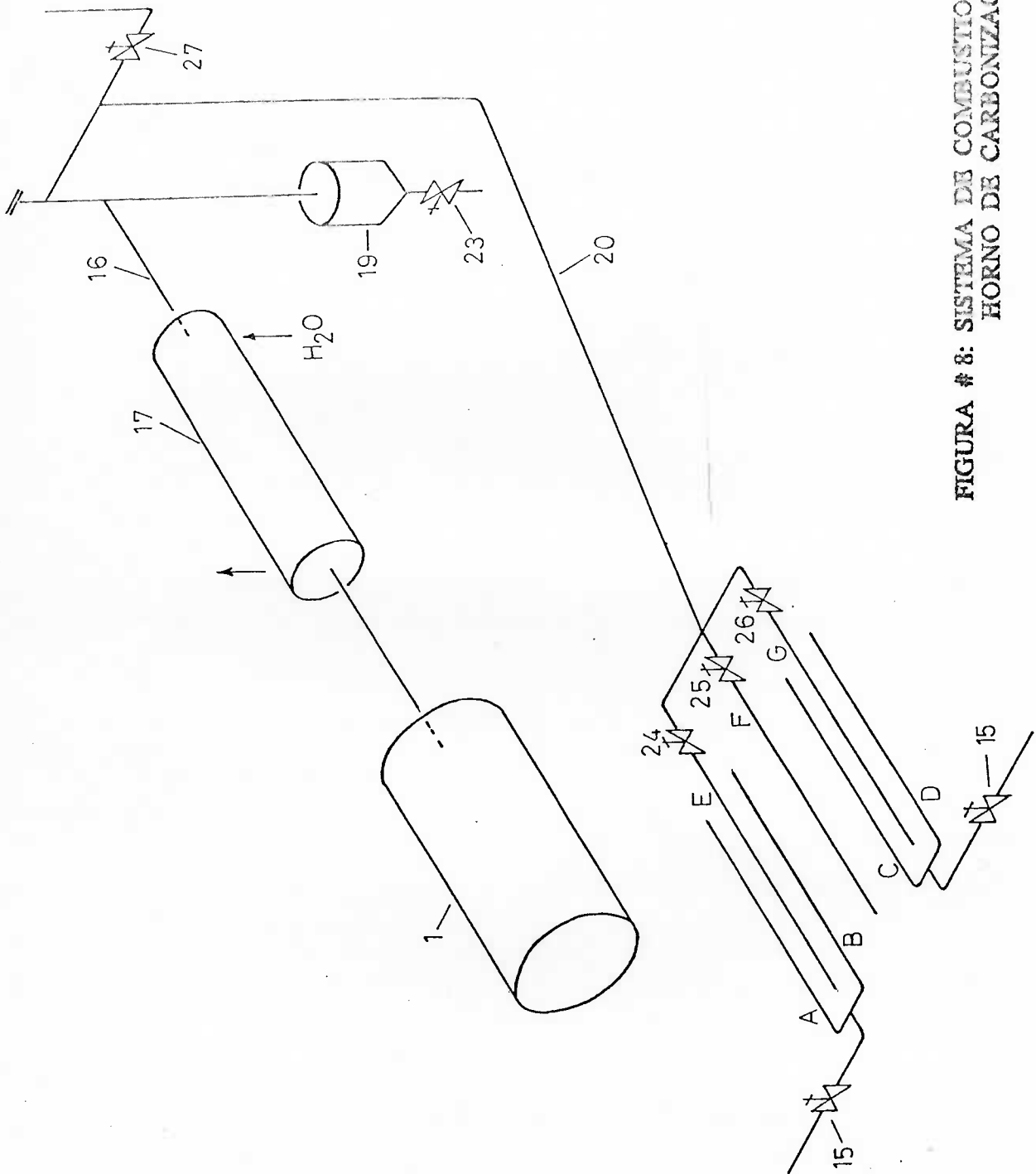


FIGURA # 8: SISTEMA DE COMBUSTION DEL HORNO DE CARBONIZACION

Para obtener las temperaturas altas de 600°C y más y para reducir la radiación térmica del horno se construyó las paredes del mismo con una capa de una fibra cerámica (25 mm de grosor) (5) más una capa de aire (50 mm) (6), logrando así un buen aislamiento del ambiente: Con una temperatura de 500°C dentro del horno, la lata metálica exterior tiene solamente 120°C. Una chapaleta en la chimenea (7) permite la regulación de los gases de combustión y una circulación de los mismos dentro del horno, aprovechando así su energía térmica.

El sistema de combustión es variable. Con gas natural como combustible se utiliza los 4 quemadores A, B, C, D, de los cuales 2 son alimentados al mismo tiempo de un tanque de gas respectivamente por la válvula (15). Los demás quemadores E, F y G sirven para quemar el gas de la pirólisis, su funcionamiento se describe más tarde.

La parrilla (8) funciona como soporte para los quemadores A, B, C, D, y quitando los mismos se puede quemar leña o las briquetas de la materia prima. Durante la combustión de sólidos, los quemadores E, F, G permanecen en su posición indicada.

Se puede realizar la carbonización con cualquier combustible (gas, leña, briquetas, etc.) sin alteración del producto de la carbonización.

La diferencia en los combustibles existe solamente en su manejo: leña y briquetas exigen una atención casi permanente durante su combustión. Al usar gas como combustible se puede controlar más fácilmente la temperatura del horno, regulando la intensidad de las llamas por la válvula (15), pero con cierta experiencia también es posible cumplir las condiciones para una carbonización deseada (véase también apartado 2.2.) utilizando leña o briquetas.

La puerta del horno está dividida en 2 partes: La parte superior (12) es la puerta principal para introducir y sacar el tanque (1), la parte inferior (12a) sirve para la utilización de la parrilla. Por esta puerta pequeña se puede alimentar la parrilla con leña, dejando cerrada la puerta principal y evitando así pérdidas de calor.

Por medio de 2 visores en ambas puertas es posible observar la combustión del combustible y del gas de la pirólisis y permitir la entrada de aire para la misma.

El tanque de carbonización es deslizado por 4 rodillos metálicos (9) apoyados en un ángulo de hierro (7). El tubo de salida (2) tiene un acoplamiento (11) para conectarlo con el condensador. Con este sistema y con un carrito especial es posible sacar el tanque por la puerta principal del horno (12), cargar, descargar, y enfriarlo afuera del horno y realizar así en un día 2 carbonizaciones. Por esto se construyó 2 tanques similares con sus soportes respectivos.

Por las 2 termocuplas (13 y 14) del tipo K (NiCr/NiAl) se controla las temperaturas siguientes:

- Dentro del tanque de carbonización (1), la termocupla (13) indica la temperatura de la materia orgánica.
- La temperatura alrededor del tanque es controlada por la termocupla (14) (temperatura del horno).

El sistema de enfriamiento de los gases formados por la carbonización consiste en un condensador especial (16,17,18), un recipiente para los condensados (19) y la recirculación de los gases (20).

El condensador realiza en el intercambiador (17) un enfriamiento de los gases calientes que salen del tanque por el tubo de salida (2) al tubo (16). El intercambio térmico se lo realiza con agua en contracorriente.

Los gases de pirólisis contienen a parte de metano, hidrógeno, monóxido de carbono también mucho vapor de agua y alquitrán. Por eso el condensado contiene también un líquido viscoso lo cual exige una construcción adecuada del condensador:

El tubo de condensación (16) tiene que ser recto e inclinado. No es posible utilizar otro tipo de condensador (p.ej. condensador de contacto, intercambiador con serpentín) por la alta viscosidad del condensado y para lograr el efecto deseado: Eliminar agua y alquitrán y obtener un gas, apto para la combustión.

Sin embargo, los primeros ensayos mostraron un enfriamiento insuficiente por un condensador normal de LIEDIG. Para incrementar el intercambio de calor entre el tubo (16) y el agua fría del intercambiador aumentamos la superficie del tubo, soldando aletas de hierro (21) a su parte exterior. Adicionalmente introducimos al tubo de condensación un serpentín de cobre (18), cuyo flujo de agua fría en contracorriente nos permite enfriar suficientemente la gran cantidad de gases desprendidos por una carga completa del tanque de carbonización.

El líquido condensado se acumula en el recipiente (19) de un volumen de 20 l, el tubo de vidrio (22) hace posible el control del nivel de líquido y por la llave (23) se puede purgar la mezcla de agua y alquitrán. Su tratamiento y eliminación se describe en el capítulo 2.4. "Medidas de seguridad y protección del medio ambiente."

Los gases restantes de esta condensación contienen H_2 , CO , CH_4 entre otros y además sustancias orgánicas desagradables y tóxicas.

Para no contaminar el ambiente y aprovechar su poder calorífico hay un sistema de recirculación de estos gases al horno.

Por el tubo (20) retoman los gases al horno, pasando por las válvulas 24, 25, 26. Según la cantidad del gas formado se puede abrir 1, 2 o 3 válvulas y obtener así una buena combustión del gas de pirólisis por los quemadores extras E, F, G. La válvula (27) en el tubo de recirculación cierra una salida adicional del sistema de condensación-recirculación.

Por esta salida es posible:

- controlar la presión dentro del sistema conectando la válvula con un manómetro
- sacar muestras del gas pobre durante el desarrollo de la carbonización
- bajar la presión del gas pobre en los quemadores E, F, G.

Por una carga completa del tanque de carbonización se forma mucho gas pobre por aproximadamente 1/2 hora durante la carbonización y las llamas de los quemadores E, F, G sobrecalientan el horno y el tanque. Quemando una parte del gas pobre por un quemador adicional conectado con la válvula (27) se puede controlar la temperatura dentro del horno.

Según la cantidad del gas pobre, se puede bajar o subir el consumo del combustible (gas natural o leña) hasta apagarlo totalmente. El control de la temperatura del horno (termocupla 14) permite regular la combustión adecuadamente el volumen del gas pobre y sostener así una temperatura entre 500 y 600°C alrededor del tanque de carbonización. La cantidad de gas pobre también es una buena medida para observar el desarrollo de la carbonización, especialmente al final de la misma. Importante para el éxito del siguiente proceso, la activación, es tener todavía cierta cantidad de sustancia orgánica no desintegrada. Por eso es necesario parar la carbonización antes de la descomposición total del material orgánico. El control del momento adecuado se puede determinar por la temperatura dentro del tanque (termocupla 13) y por el volumen del gas pobre. Más detalles se encuentran en la parte 3: "Descripción de los procesos y del análisis del carbón activado".

DATOS TÉCNICOS DE LA CARBONIZACIÓN

Carga máx. del tanque de carbonización: 100 kg briquetas

Combustible: a elección: gas, leña, briquetas, cascarillas de arroz, alquitrán

Temperatura máx. del horno: 705°C

Temperatura dentro del tanque: 600-605°C

Tiempo de carbonización: 3-4 horas

Consumo del combustible: gas 3,6 kg/carbonización

Consumo de agua para el condensador: 360 l/h

Capacidad del horno: 200 kg briquetas/día

Determinación de las temperaturas: Termocuplas tipo K (NiCr/NiAl) en combinación con el instrumento THERMOLYNE Portable Pyrometer (SYBRON EE.UU)

Determinación del gas CO: Bomba detectora de gases con tubo de control para CO (DRAEGER RFA).

2.2.3. La Trituración

Los productos de la carbonización, las briquetas carbonizadas de las materias primas como cascarillas de arroz, cáscaras de café, aserrín y las cáscaras de los diferentes tipos de coco, necesitan una desintegración mecánica para obtener partículas de diferentes tamaños de los mismos.

Entre la gran variedad de los trituradores industriales para la desintegración mecánica de sólidos escogimos un triturador de dos rodillos, pues sabíamos que se obtenían resultados satisfactorios con este tipo de molino gracias a diversas pruebas realizadas con diferentes trituradores de la Facultad de Geología.

El carbón, al salir del horno de carbonización, es relativamente suave y quebradizo. Los dos rodillos del molino ejercen una fuerza de compresión y de rozamiento sobre el material y el carbón por su fragilidad es triturado. La separación entre los rodillos, es decir su abertura, puede ser variada entre 3 y 32 mm para adaptar el proceso de trituración a las piezas de carbón inicial y al tamaño del producto deseado.

Una ventaja especial del triturador construido (figura # 9) es su sellado hermético para evitar la fuga del polvo. El carbón después de la carbonización está totalmente seco y por la trituración se forma bastante polvo de carbón el cual podría ensuciar el ambiente además de molestar y poner en peligro al personal. El diseño considera este problema y por eso sella totalmente la parte principal del molino, que comprende los rodillos con el recipiente para el producto final.

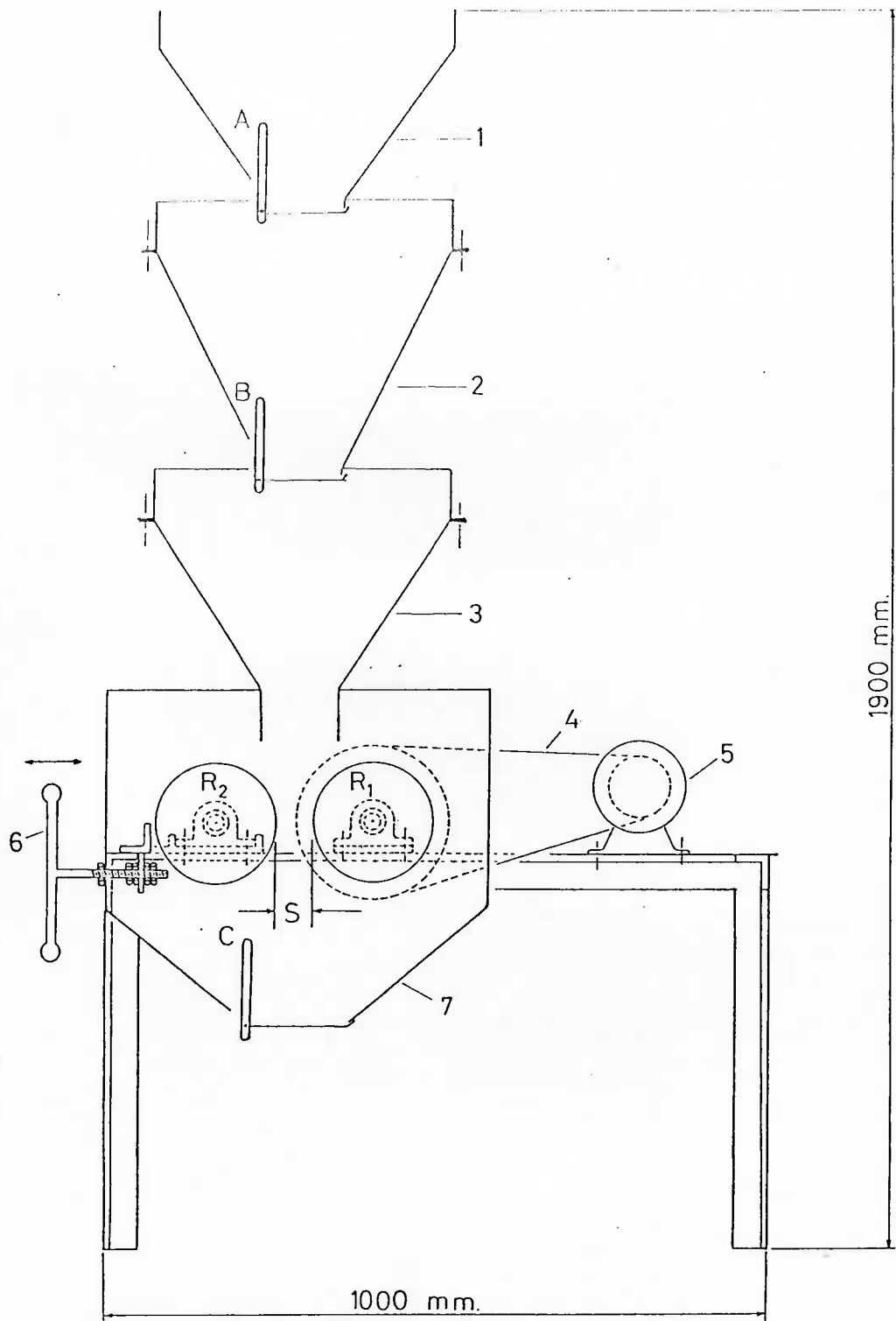


FIGURA #9: TRITURADOR DE 2 RODILLOS

Para no tener un desprendimiento del polvo por la parte de la alimentación, se utiliza un sistema de 3 tolvas con chapaletas que funcionan como trampas de polvo, evitando así la salida de polvo durante la alimentación del molino.

El proceso de la trituración en detalle:

Llenar la tolva 1 con las piezas de carbón, la chapaleta A cerrada causa normalmente un pequeño desprendimiento de polvo de carbón, pero con el extractor instalado en la planta se puede evitar una contaminación de la misma. Abriendo la chapaleta A, el material cae y con la chapaleta B cerrada se puede almacenar en la tolva 2 el carbón.

La chapaleta B sirve para alimentar los rodillos con el material por la tolva 3 adecuadamente a su capacidad. Con la chapaleta A cerrada, ningún polvo puede salir por arriba.

El rodillo R1 es movido y conectado por una banda (4) con el motor eléctrico (5), el rodillo R2 puede girarse libremente. Un sistema con una palanca y tornillo sin fin, conectada con el eje del rodillo R2 permite la variación de la separación (S) entre los rodillos (3-32mm) para poder triturar pedazos grandes y partículas pequeñas.

El material molido cae al recipiente 7 y por la chapaleta C se lo puede sacar.

La trituración de las briquetas de cascarillas de arroz necesita de 2 a 4 pasadas por el molino, iniciándola con la separación máxima de 32 mm entre los rodillos para las briquetas gruesas y hasta 3 mm de apertura para los pedazos pequeños y pretriturados.

Según el tipo de carbón deseado se puede triturar las piezas de carbón con una abertura ancha o estrecha, obteniendo así mezclas de carbón con una composición diferente del tamaño de las partículas.

DATOS TECNICOS DE LA TRITURACION

Capacidad total del molino: 400 kg/día

Separación entre los rodillos: 3-32 mm

Pasos para moler briquetas de arroz: 1 paso con 32 mm separación
 1 paso con 15 mm separación
 1 paso con 3 mm separación

Tiempo para la realización de los 3 pasos: 60 min para 50 kg de briquetas

Consumo de energía para una trituración total: de 50 kg: 0,77 kWh

2.2.4. La Clasificación.

El carbón al salir de la trituración es una mezcla que contiene desde partículas pulverulentas hasta pedacitos con un diámetro de 3mm y más (esto depende de las condiciones del triturador y de la abertura entre los rodillos). Las diferentes aplicaciones del carbón activado exigen diferentes tamaños de las partículas y los consumidores piden especialmente un carbón de tamaño relativamente uniforme. La clasificación, realizada por medio de tamices con diferentes mallas, separa las partículas de diferentes tamaños para obtener un producto final con partículas uniformes y de un tamaño definido.

Según la demanda del mercado se puede elegir las mallas adecuadas y definir así la granulación del producto final. El proceso de la clasificación de la Planta Piloto elabora 4 distintos tipos de carbón:

- Tipo I: polvo con partículas de un diámetro menor de 0,6 mm
- Tipo II: gránulos de un diámetro entre 0,6 - 1 mm
- Tipo III: gránulos de un diámetro entre 1,0 - 3 mm
- Tipo IV: partículas con un diámetro mayor que 3 mm

Las mallas metálicas utilizadas para la construcción de los tamices son ofrecidas por el mercado nacional como mallas mosquiteras y no tienen huecos de un tamaño totalmente uniforme y exacto. Pero, por ejemplo, la aplicación del carbón como material para filtros, no exige un diámetro exacto de los gránulos y por esto y por su bajo precio utilizamos mallas metálicas normales. Las mallas de acero inoxidable, las que poseen huecos exactos y definidos, podrían servir para aplicaciones especiales del carbón activado, pero no fueron interesantes para la Planta Piloto por sus altos costos. (*1)

El principio para el diseño de los tamices se basa en 2 puntos importantes:

1. El proceso de clasificación debe ser continuo y;
2. hay que reducir o evitar la salida de polvo de los tamices.

Entre la gran variedad de tamices industriales encontramos un sistema de tamices con una agrupación de las mallas en cascada, el cual trabaja con mucho éxito en la tamización de harina. Variando el sistema y transformándolo según las necesidades de la Planta Piloto, construimos los tamices de la manera siguiente: (figura # 10)

(*1) 1 m² de la malla de acero inoxidable MESH 16 cuesta US\$ 82, la malla mosquitera con huecos del mismo tamaño (1 mm.) solamente US\$ 3/m².

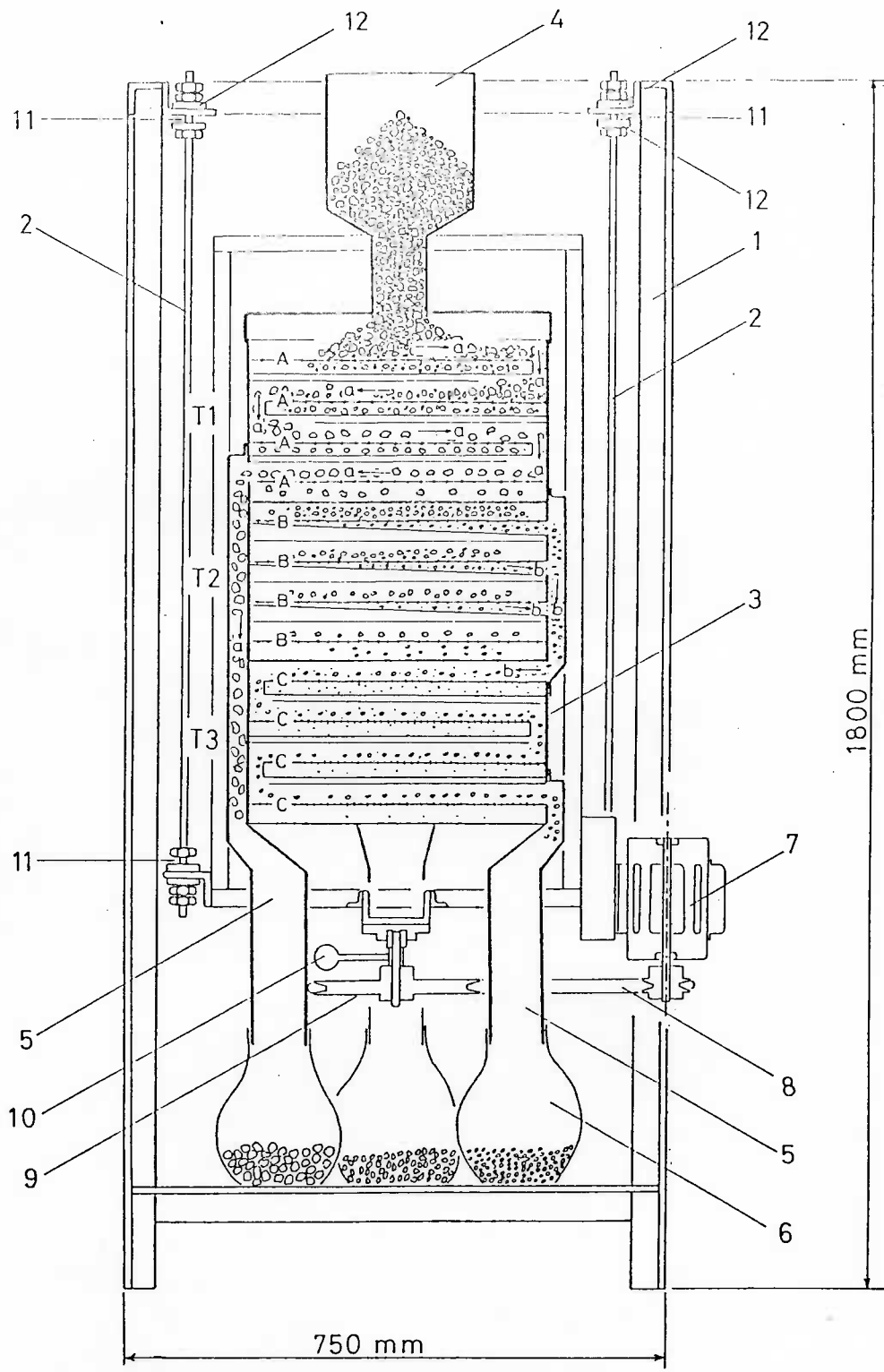


FIGURA # 10: LOS TAMICES

En un soporte metálico (1) está suspendido por varillas metálicas flexibles (2) la caja de los tamices (3). Esta caja está sellada totalmente y tiene en su topc una tolva (4) para alimentar con carbón a los tamices. Del fondo de la caja de tamices salen 4 tubos (5), uno de cada lado, los que sirven como salida de los 4 tipos de gránulos. Las fundas plásticas (6), una para cada tubo, recoge el material tamizado. El motor eléctrico (7) produce por la banda (8) las revoluciones de la polea (9) con un peso de desequilibrio (10), causando así una vibración horizontal y vertical. Por estas vibraciones, las partículas se mueven, saltan, pasan a las diferentes mallas y caen al final a las distintas fundas.

El movimiento vibratorio de la caja de los tamices es muy importante para el efecto de clasificación y su rendimiento.

La amplitud, la frecuencia y la dirección de la vibración se puede variar por algunos detalles en la construcción:

- a) la ubicación y el tamaño del peso de desequilibrio (10) influye en la amplitud del movimiento: Se aumenta la amplitud por un peso mayor y por su ubicación más lejos del eje de la polea.
- b) La velocidad de la polea (9) determina la frecuencia y también la amplitud de la vibración: Más revoluciones significan más frecuencia pero menos amplitud de la caja entera por su gran masa e inercia.
- c) Los elementos de fijación (2) de la caja de los tamices juegan un papel importante para el movimiento de la misma. Elementos muy flexibles como cables de acero o nylon o varillas metálicas delgadas también permiten un movimiento libre de la caja, pero no amortiguan mucho y las vibraciones pueden crecer a una intensidad muy alta. La aplicación de barras con un diámetro de 8 mm da dos efectos necesarios: La vibración horizontal de la caja de tamices es amortiguada y la vibración vertical es forzada por la rigidez de las barras relativamente gruesas. La vibración vertical es favorecida también por la holgura entre la barra y el soporte en el punto de su fijación (11).

Los empaques de caucho (12) amortiguan los golpes verticales. Los golpes resultantes de la vibración vertical en combinación con la construcción especial causan que el material salte en las mallas y por la vibración horizontal se mueva.

Las partículas tienen dos posibilidades de desplazamiento en las mallas:

- Pasando por el tejido de la malla, si su diámetro es menor que los huecos
- Moviéndose en la superficie de la malla hacia una salida lateral, si su diámetro es mayor que los huecos.

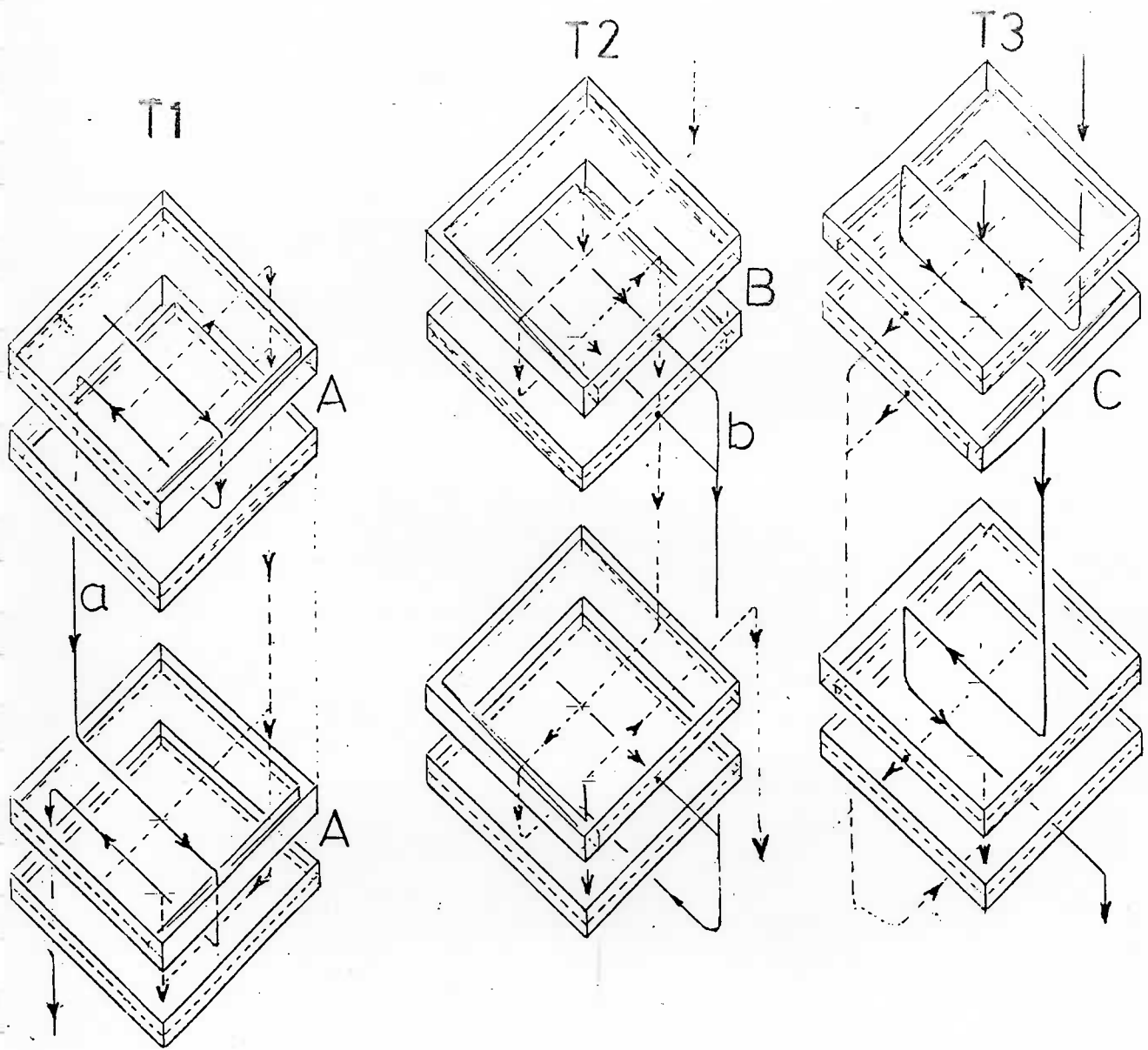


FIGURA # 11 : FLUJO DEL MATERIAL DENTRO DE LOS TAMICES

Ambas vibraciones, la horizontal y la vertical, intensifican el movimiento de las partículas y especialmente la combinación de saltos y vibración horizontal causa un comportamiento del material sólido similar al de un lecho fluidizado.

Así, el material sólido, tanto el polvo como las partículas gruesas, pueden moverse y "fluyen" a las salidas adecuadas según su tamaño.

Para obtener una buena clasificación y una separación completa de los diferentes tamaños de partículas se agrupó 4 mallas del mismo tipo, de tal forma que el material no caído por los huecos tiene que pasar las 4 mallas del mismo tipo. La agrupación de las diferentes mallas A, B y C en grupos de tamices T1, T2 y T3 es mostrada por las figura # 10 y 11.

El flujo de las partículas dentro de los tamices:

La mezcla del material va por la tolva (4) a la primera malla A del primer grupo de tamices T1 con huecos de 3 mm de diámetro. Las partículas menores de 3 mm caen por el tejido de estas mallas A y pasan por un recolector a las mallas B del grupo T2.

Las partículas mayores de 3 mm de diámetro tienen que moverse encima de todas las 4 mallas del tipo A (observe el flujo del material \rightarrow a), por este largo camino pierden todas las partículas más finas (< 3 mm) y caen al final por el tubo 5 al recipiente (funda 6).

Con los gránulos menores de 3 mm ocurre lo mismo: Ellos tienen que pasar las 4 mallas B del grupo T2, que tienen huecos de 1mm diámetro y al final caen por un tubo 5 al recipiente que les corresponde. Las partículas menores de 1mm pasan los huecos de las mallas B y van por el recolector a las mallas C del grupo T3. Las flechas \rightarrow b indican el flujo de las partículas menores de 1 mm . Estas partículas pasan las mallas C del grupo T3 con un diámetro de 0,6 mm, pierden el polvo (menor que 0,6 mm) y se acumulan por el tubo (5) en su recipiente respectivo.

El dibujo esquemático (figura # 10) muestra por los grupos de tamices T1 y T3 el flujo del material encima de las mallas y por T2 el camino y el recolector para los gránulos que caen por los huecos de las mallas.

Las fundas plásticas (6) que sirven para recoger el carbón no influyen gracias a su elasticidad en el movimiento de la caja de tamices.

Debido a la alta vibración de los tamices y del soporte es necesario fijarlo bien en el suelo usando pernos de anclaje.

Los detalles de las mallas y de la construcción y los datos respectivos de la clasificación se encuentran en el capítulo 3.

DATOS TECNICOS DE LA CLASIFICACION

Capacidad de los tamices: 240 kg/día

Clasificación en 4 diferentes tipos de gránulos:

Tipo I polvo con partículas < 0.6 mm

Tipo II gránulos de 0.6 - 1 mm

Tipo III gránulos de 1 - 3 mm

Tipo IV partículas > 3 mm

Tiempo para clasificar 50 kg carbón: 100 min

Consumo de energía para 50 kg: 860 Wh

2.2.5. La Activación

El proceso de activación, elaborado por el proyecto de investigación "Carbón activado a partir de cascarillas de arroz" (LEHNER 1987), es un proceso térmico y necesita para su realización solamente un horno con temperatura uniforme.

Las condiciones elaboradas en el laboratorio han dirigido la búsqueda y el diseño de los hornos de activación: Necesitamos una temperatura entre 350^o y 400^oC relativamente uniforme en un espacio con poco acceso de aire.

Nos orientamos a las dos fuentes de energía principales -la energía eléctrica y el gas líquido- y construimos un horno eléctrico y un horno a gas.

El *horno eléctrico de activación* (fig. # 12) era un horno usado en una panadería, hecho en Taiwan, y lo transformamos según nuestras necesidades. El horno tiene una cámara metálica (1) de 54 cm x 54 cm x 22 cm es igual un volumen de 64,1 litros.

Bajo la base hay una serie de resistencias (2) y separado por una malla en la parte superior una segunda serie de resistencias (3), las cuales permiten calentar la cámara central a temperaturas mayores de 400^oC. Por la perilla A se puede prender a elección las resistencias superiores a, b o a + b juntas según la temperatura deseada, la perilla B dirige las resistencias a, b o a + b en la parte inferior. Para obtener temperaturas altas hay un aislamiento alrededor de la cámara con planchas de asbesto (4).

El regulador de temperatura (RT), de diseño y construcción propios, recibe por una termocupla (5) de NiCr/NiAl una señal y regula electrónicamente por el

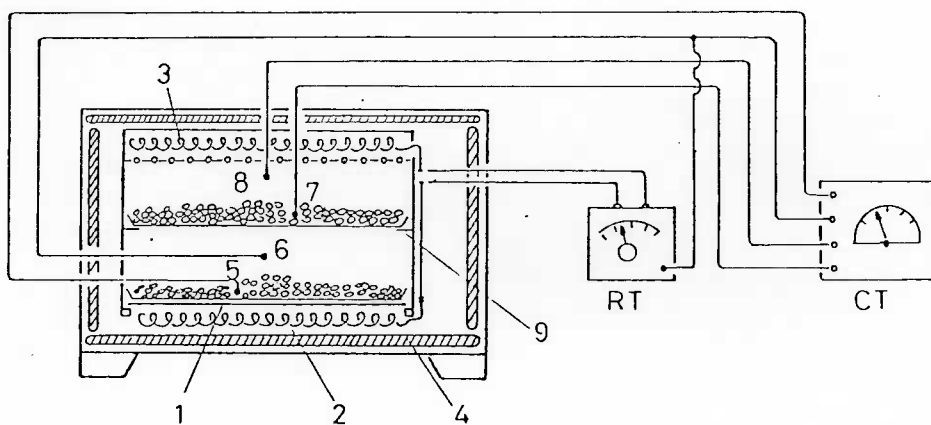
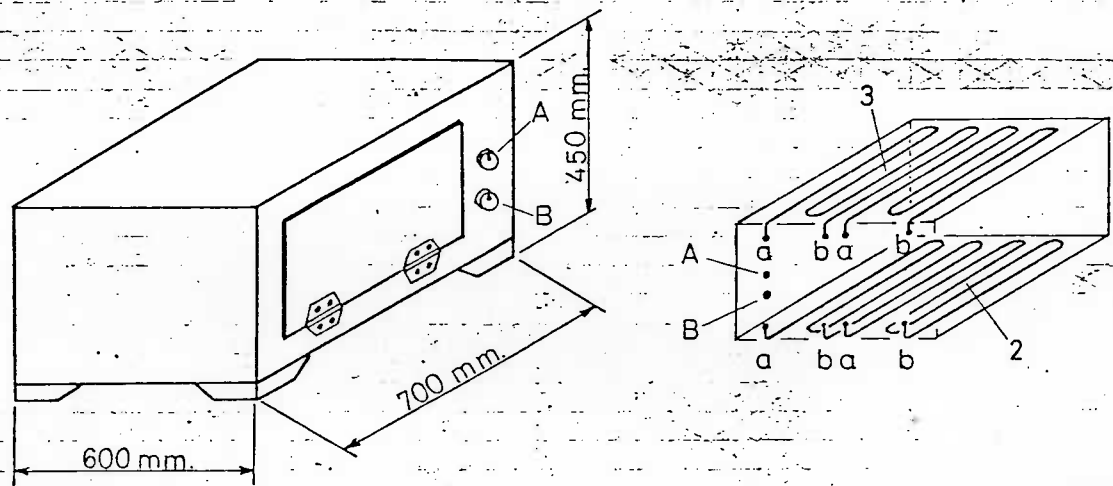


FIGURA # 12: HORNO DE ACTIVACION ELECTRICO

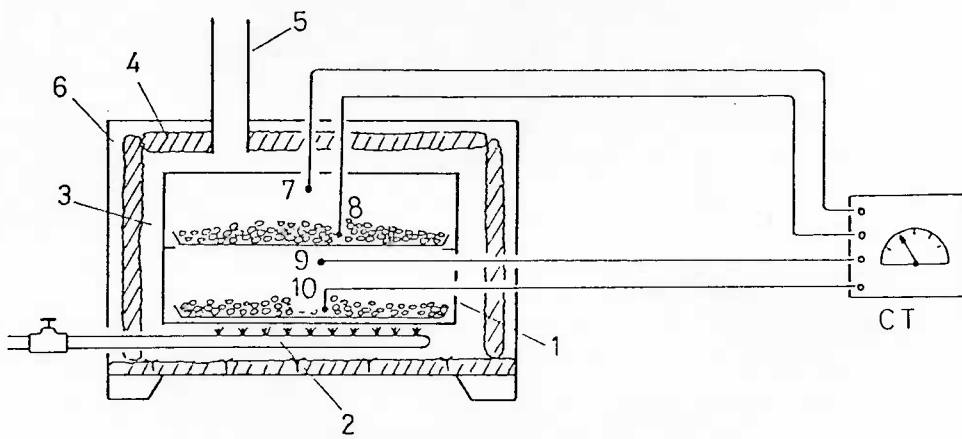
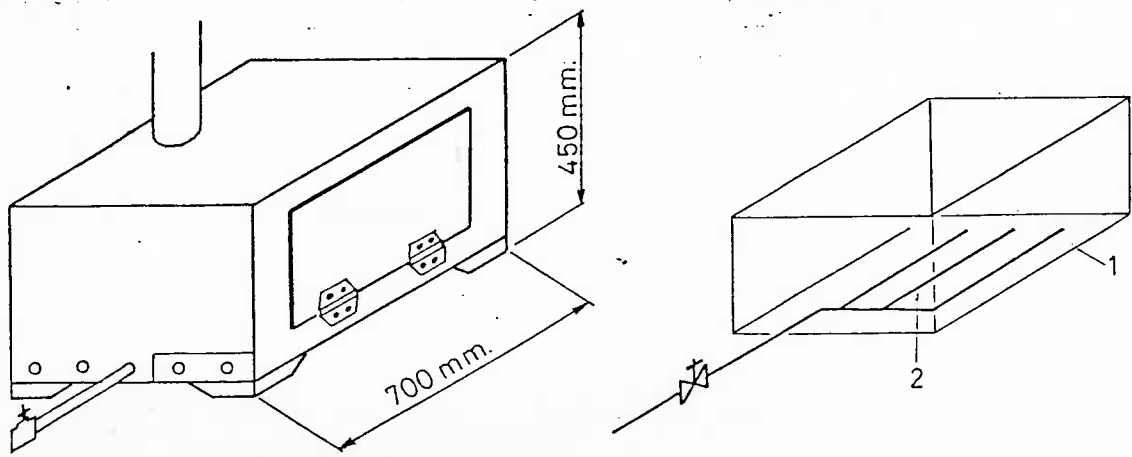


FIGURA # 13: HORNO DE ACTIVACION A GAS

voltaje de las resistencias la temperatura de la cámara. Para el instrumento "Control de la temperatura" (CT) construimos un aparato adicional que nos permite acoplar 4 termocuplas al mismo tiempo. Las termocuplas # 6 y 8 miden la temperatura del horno encima del carbón, la # 5 mide la temperatura del carbón de la bandeja 1, la # 7 la temperatura del carbón de la bandeja 2.

La bandeja 2 está en un soporte (9) que permite cierta circulación del aire entre las diferentes zonas de la cámara principal.

Construimos las bandejas de acero inoxidable porque las planchas de hierro no soportan por mucho tiempo las temperaturas altas ni el cambio brusco de la temperatura por el enfriamiento.

El *horno de activación a gas* (fig. # 13) es una construcción propia con un buen aislamiento para ahorrar energía y para lograr una temperatura uniforme. La cámara principal (1) tiene las mismas dimensiones de la cámara del horno eléctrico y está sellada herméticamente para no tener una entrada de los gases de la combustión. El quemador de gas (2) calienta la cámara metálica (1), los gases de combustión calientes pasan por el espacio de 50 mm (3) entre el material aislante (4) y las paredes de la cámara y salen del horno por la chimenea pequeña (5). El sistema de aislamiento consiste en una capa de 25 mm de una fibra cerámica (4) y un espacio de aire de 50 mm (6) entre la fibra y la pared exterior.

Este sistema nos permite obtener una temperatura uniforme dentro de la cámara principal y poca pérdida de calor. Tenemos para una temperatura interior de 400°C solamente una temperatura de 100°C en la pared exterior.

Las termocuplas 7, 8, 9, 10 nos dan las temperaturas de las distintas zonas del horno y del carbón de las bandejas # 1 y 2; el instrumento "Control de temperatura" (CT) es el mismo que el del horno eléctrico.

Por la distribución uniforme de la temperatura en ambos hornos es posible trabajar con 2 bandejas para la activación y aumentar así la capacidad de los hornos.

DATOS TECNICOS DE LA ACTIVACION

Horno eléctrico:

precalentamiento a 350°C

temperatura del horno: 350 - 400°C

temperatura del carbón: 350 - 400°C

tiempo de la activación: 45 - 60 min

carga de 1 bandeja: 1.5 kg

capacidad del horno: 18 kg/día
consumo de energía:
 precalentamiento: 3.96 kWh
 durante la activación: 1.92 kWh
 para 1 kg de carbón: 0.86 kWh/kg

Horno a gas:

precalentamiento a 350 °C
temperatura del horno: 350 - 400 °C
temperatura del carbón: 350 - 400 °C
tiempo de la activación: 45 - 60 min
carga de 1 bandeja: 1.5 kg
capacidad del horno: 18 kg/día
consumo de energía:
 precalentamiento: 4320 kcal = 5.02 kWh
 activación 60 min.: 2160 kcal = 2.51 kWh
 para 1 kg de carbón: 1.11 kWh/kg

2.3. Control de Calidad

El amplio campo de aplicación del carbón activado ha creado una gran variedad del mismo:

D-carbón para decolorar líquidos,
M-carbón para aplicaciones medicinales,
R-carbón para purificar aire de respiración
A-carbón para adsorber gases y humos.

Un gran espectro de materias primas, sustancias para la activación y procesos de producción permite la obtención de los diferentes tipos de carbón activado y la variación de sus propiedades.

El control de calidad del carbón activado considera sus propiedades físicas y químicas como: densidad gravimétrica, contenido y composición de ceniza, valor de pH, humedad, área total de la superficie, solubilidad en agua y solventes orgánicos entre otros (*1).

La real determinación de la calidad del carbón activado, es decir, su capacidad de adsorción, normalmente se realiza en relación a su aplicación.

(*1) HASSLER 1963, WALKER 1966, ASTM D1512, D1506, D1519, D2854, D2867, D2862, D2866.

Un D-carbón se examina al decolorar un líquido, determinando así la concentración del colorante antes y después del contacto con el carbón. (ASTM S2355) En la industria azucarera se utiliza la propia melaza como solución examinada. Otros métodos usan soluciones de fenol, yodo o azul de metileno.

Para los carbones que sirven para la purificación de gases se aplica la adsorción de benceno como gas, determinando el peso adicional del carbón después del contacto con el benceno a una distinta temperatura y concentración: Se obtiene la isoterma de adsorción.

La ventaja de los diferentes métodos es su exactitud en relación a la aplicación del carbón activado. Pero casi todos los métodos exigen mucho tiempo para su realización y no son aptos para ensayos en serie.

En nuestro proyecto de investigación sobre la obtención de carbón activado a partir de materiales orgánicos agrícolas se presentó la situación de examinar hasta 30 muestras de carbón al día. Debido al tiempo que esto implicaba no fue posible la aplicación de los métodos descritos en la literatura para el control de adsorción.

Investigando los diferentes métodos para determinar la capacidad de adsorción de carbón activado, elaboramos los parámetros necesarios para el método aplicable en nuestro proyecto de investigación:

La determinación debe:

- ser rápida (no más de 10 minutos)
- utilizar reactivos no tóxicos y accesibles
- ser válida para varios tipos de carbón activado
- ser exacta respecto a la determinación particular y a la comparación con otros carbones
- ser sencilla, de tal manera que también el personal no calificado pueda realizarla.

Los métodos descritos en la literatura y aplicados también por la industria química no cumplen con los parámetros deseados por ej.:

- La determinación del número de adsorción de yodo exige muchos pasos, personal de laboratorio calificado y demora mucho tiempo (*1)
- La prueba con Azul de metileno es rápida y sencilla, pero carece de exactitud (*2)

(*1) ASTM D1510. MERCK 1986, pág. 18, HASSLER 1974, pág. 308 ff

(*2) MERCK 1986, pág 4, HUNGARIAN 1982, pág 17

- Las determinaciones con benceno, orto-diclorobenceno, tetracloruro de carbono, fenol, fosgeno, usan sustancias nocivas y además no permiten obtener resultados exactos (* 1).

La búsqueda de una sustancia adecuada para la determinación de la adsorción de carbón activado nos dirigió al colorante anaranjado de metilo, el cual tiene algunas ventajas para su aplicación.

Anaranjado de metilo ($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$)

- es bien soluble en agua
- es estable y no hay descomposición por la luz
- no es tóxico
- es un colorante fuerte, lo cual significa que para su aplicación se necesita poca sustancia.
- se puede analizar directamente sin otros reactivos en un espectrofotómetro.

Por estas ventajas y por la determinación directa de su concentración investigamos el anaranjado de metilo y desarrollamos el método *AD* adsorción de Anaranjado de Metilo por Carbón Activado (*ADAMCA*)

EL DESARROLLO DEL METODO ADAMCA.

Preparando una solución acuosa de anaranjado de metilo y utilizando el Espectrofotómetro SPECTRONIC 20 de la MILTON ROY COMPANY logramos encontrar para cubetas de 1/2" diámetro una concentración de 3×10^{-5} mol/l adecuada para usar en el colorímetro.

La determinación de la longitud de onda con la absorción máxima del anaranjado de metilo nos dio 465 nm. Con esta longitud de onda elaboramos una curva standard, variando las concentraciones de anaranjado de metilo y determinando la absorbancia adecuada (tabla # 9).

Para realizar la adsorción por el carbón activado agregamos a la solución acuosa de anaranjado de metilo cierta cantidad del carbón activado, agitamos, filtramos y determinamos la absorbancia por el fotómetro.

Para obtener la cantidad de carbón activado necesario para resultados exactos y que puedan reproducirse, variamos el peso de carbón entre 50 mg y 500 mg y elaboramos la tabla # 10.

(*1)ASTM D1618, HUNGARIAN 1982, pág.18 y 20, CALGON 1986 pág. 2

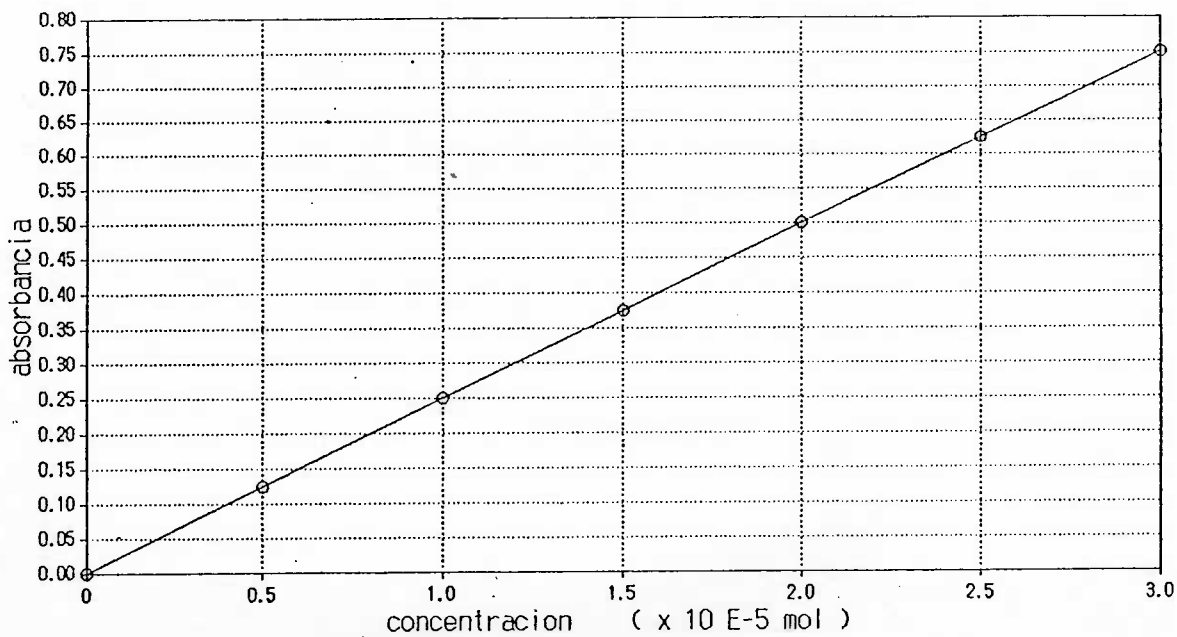


TABLA # 9: CURVA STANDARD DE ABSORCION DE ANARANJADO DE METILO
EQUIPO : SPECTRONIC 20, CUBETAS 1/2 "

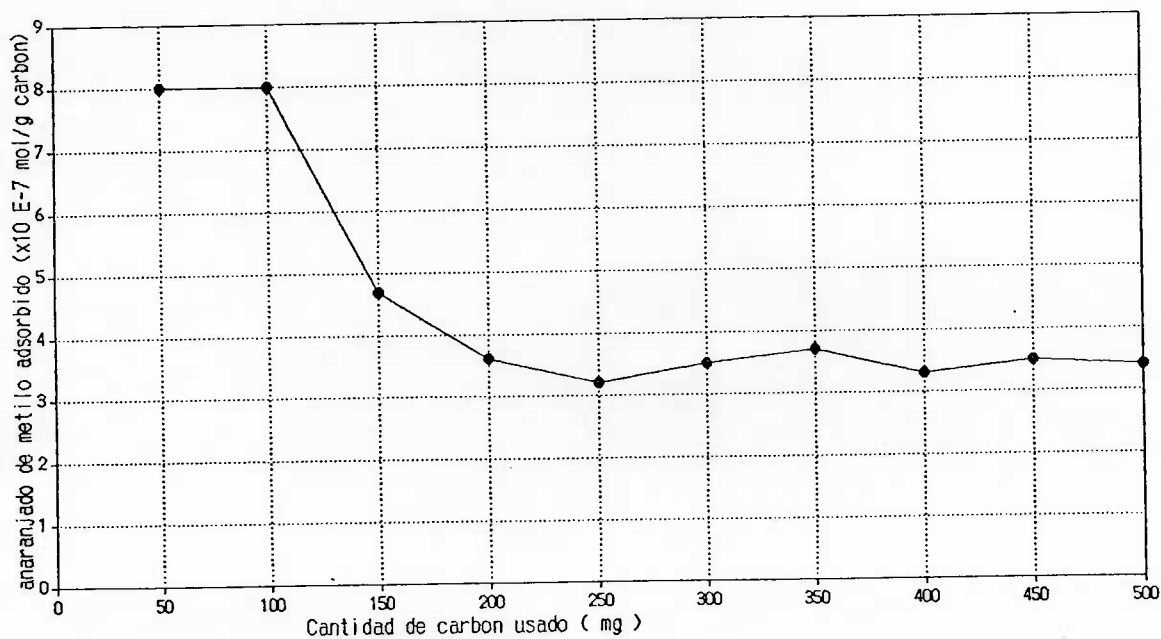


TABLA # 10: ADSORCION DE ANARANJADO DE METILO CON VARIACION DE LA CANTIDAD DE CARBON ACTIVADO

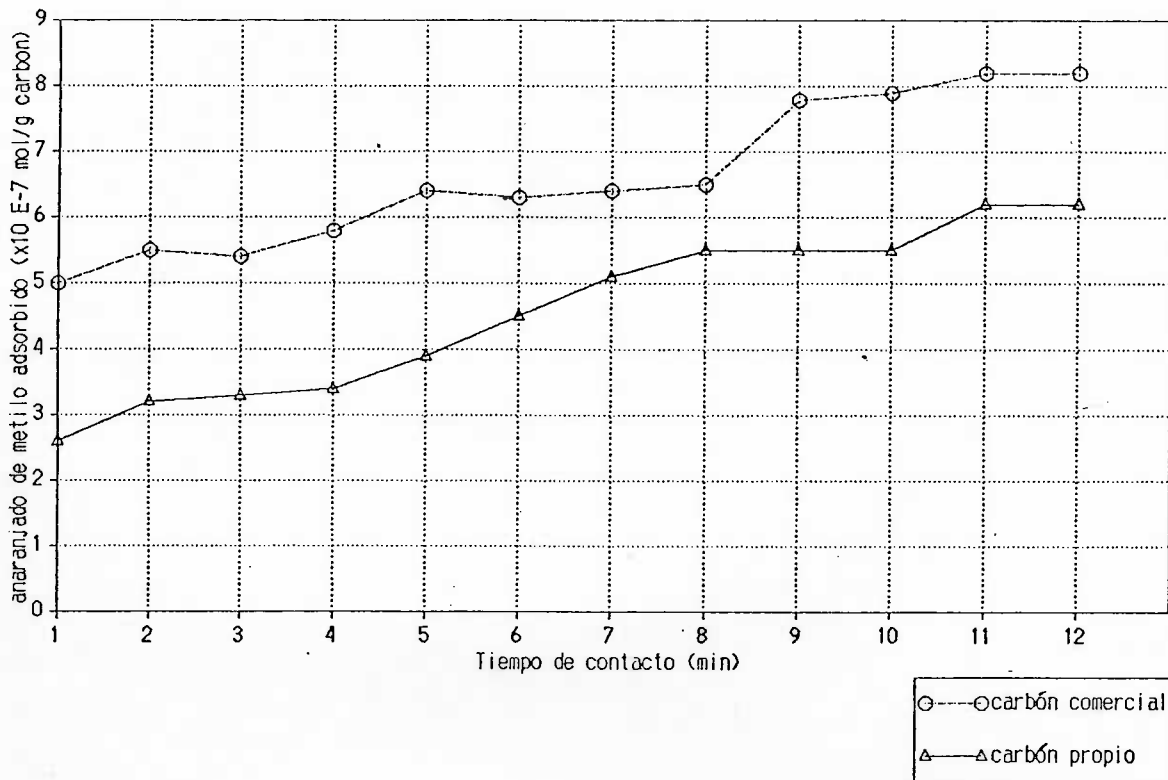


TABLA # 11a: ADSORCION DE ANARANJADO DE METILO CON VARIACION DEL TIEMPO DE CONTACTO CON CARBON ACTIVADO (1-12 MIN.)

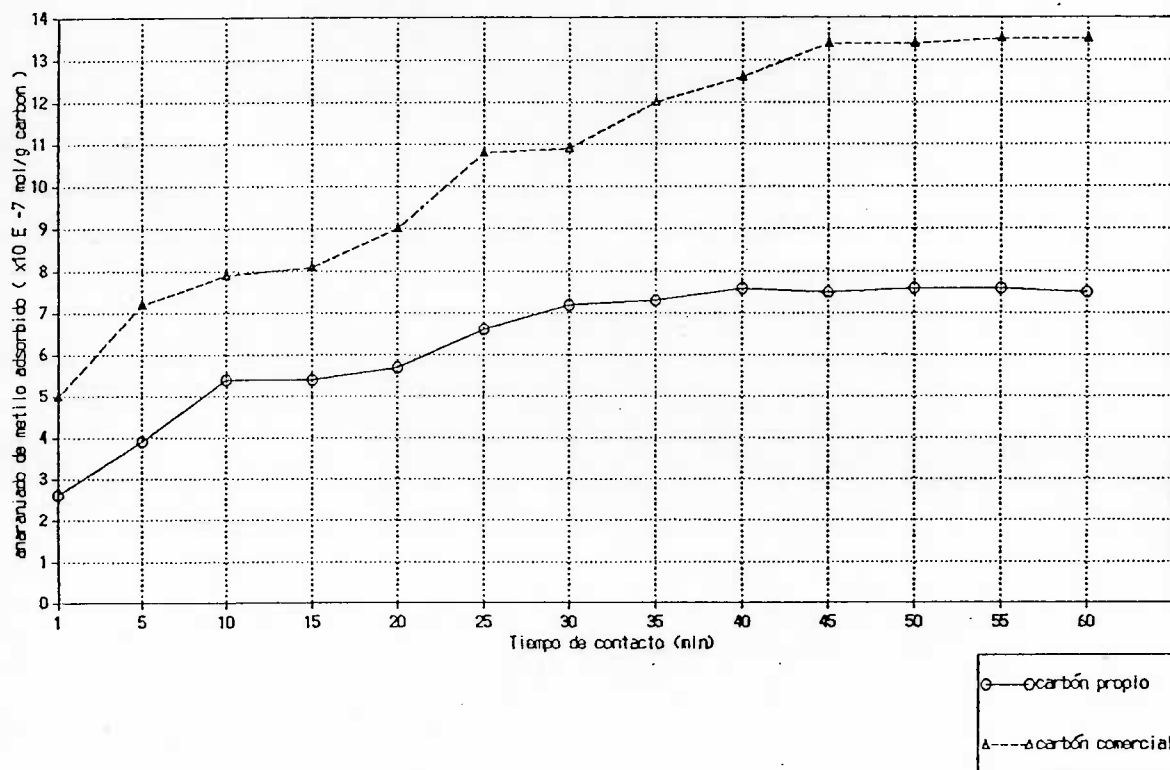


TABLA # 11b: ADSORCION DE ANARANJADO DE METILO CON VARIACION DEL TIEMPO DE CONTACTO CON CARBON ACTIVADO (1-60 MIN.)

Como lo muestra la curva # 10, la exactitud de la determinación con pocos miligramos de carbón es baja, pero a partir de 150 mg. es estable.

La adsorción de una sustancia por carbón activado depende también del tiempo de contacto (tablas # 11a y 11 b). Por eso variamos el tiempo de agitación entre 1 y 60 minutos y encontramos un primer nivel de una adsorción constante entre 2 y 3 minutos y un segundo nivel con más de 11 minutos (tabla # 11a). Porque tenemos interés de realizar rápidamente la determinación y porque comparamos los resultados sin considerar la adsorción máxima , nos decidimos a aplicar 2 minutos de contacto entre el carbón y la solución.

Está claro que los resultados después de 2 minutos de contacto no significan la adsorción máxima y completa del carbón activado, pero para comparar diferentes tipos de carbón y para tener una idea exacta sobre la capacidad de adsorción del carbón, los resultados son aplicables.

Para la determinación de la adsorción máxima de un carbón activado es necesario aplicar 100 horas y más de contacto entre el carbón y la solución de anaranjado de metilo, porque después de 60 minutos todavía se adsorbe más del colorante (ver tabla # 11b y tabla # 28)

EL METODO ESTANDARIZADO

- 1) Preparar una solución standard de anaranjado de metilo con la concentración de 3.0×10^{-5} mol/l en 2 etapas:
 - a) Preparar una solución de 1.0×10^{-3} mol/l (= 0,32734 g de anaranjado de metilo (pm=327,34g) en 1000 ml de agua destilada
 - b) Sacar 30 ml de la solución a) y agregar 970 ml de agua destilada (= $3,0 \times 10^{-5}$ mol/l)
- 2) Pesar 0.200 g del carbón activado seco.
- 3) En un tubo de ensayo agregar a los 200 mg del carbón activado 10.0 ml de la solución standard y tapanlo.
- 4) Agitar a mano el tubo de ensayo por 2 minutos.
- 5) Filtrar inmediatamente, utilizando un papel filtro para precipitados finos y para el filtrado una cubeta 1/2" del colorímetro, limpia y seca. El filtrado tiene que ser totalmente claro, sin partícula alguna.

6) Medir la absorbancia del filtrado por el colorímetro, utilizando la longitud de onda 465 nm.

7) Determinar por la curva standard (Absorción versus concentración, tabla # 9) la concentración del anaranjado de metilo en el filtrado.

8) Calcular la cantidad de anaranjado de metilo adsorbido:

$$\frac{(\text{conc. solución standard} - \text{conc. filtrado}) \times 5}{100} = \text{mol/g carbón}$$

El resultado se obtiene como mol de anaranjado de metilo adsorbido por 1 g de carbón activado.

Una determinación completa que consiste en: pesar el carbón, pipetear 10 ml de la solución standard, agitar por 2 minutos, filtrar y medir la absorbancia demora entre 5 y 8 minutos y permite así la realización rápida de determinaciones en serie.

Los resultados son exactos, pueden reproducirse y sirven para examinar la calidad del carbón activado. Para la determinación de la adsorción máxima de un carbón se puede usar el mismo método pero con un contacto de 100 horas entre el carbón activado y la solución standard y con una variación del peso del carbón y del volumen de la solución

DATOS TECNICOS DEL CONTROL DE CALIDAD

Reactivo: Anaranjado de Metilo de la empresa RIEDEL DE HAEN AG
(República Federal de Alemania) $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$
peso molecular 327,34 g

Espectrofotómetro: Spectronic 20 de la empresa MILTON ROY
COMPANY (EE.UU.) con un rango de 340-950 nm
Cubetas utilizadas con un diámetro de
1/2 pulgada (= 12.5 mm)

Papel filtro: Diámetro 12,5 m, caja verde, muy denso, para precipitados finos de la empresa MACHEREY-NAGEL (Rep. Fed. de Alemania).

Embudo: Diámetro 8 cm.

2.4. Medidas de seguridad y protección del medio ambiente.

Uno de los objetivos principales del proyecto "Carbón activado a partir de las cascarillas de arroz" fue el de elaborar una aplicación para la gran cantidad de cascarillas de arroz, que no tienen uso en el Ecuador y contaminan mucho el ambiente.

Como materia prima para el carbón activado utilizamos también otros desechos agrícolas como cáscaras de café o coco para de esta manera reducir la contaminación ambiental producida también por estos residuos orgánicos.

Adicionalmente tratamos de evitar o reducir el impacto ambiental que podría producirse por los procesos de la Planta Piloto y lograr también una protección del personal mediante construcciones adecuadas y por varias medidas de seguridad:

1) Para evitar el *desprendimiento de polvo* hay construcciones especiales de los aparatos:

- El molino está herméticamente cerrado con una alimentación del mismo por un sistema de 3 tolvas con chapaletas.
- Los tamices también están totalmente sellados y no hay ninguna producción de polvo ni al alimentarlos ni al recoger el material.

2) Por el *sistema de succión central* (ver figura # 3), la combinación de un extractor y una tubería con varias bocatomas para conectar una manguera es posible aspirar polvo, gases o humo de todas las zonas y de todos los equipos de la Planta Piloto. El extractor sopla los gases por una chimenea de 5 m de altura al aire, evitando así la contaminación dentro de la planta.

3) Construimos una *campana de ventilación* extra para la máquina briquetadora, porque el proceso de compactación produce humo y gas desagradable. Conectada con el sistema de succión central, la campana aspira todo los gases contaminantes y permite así el manejo de la máquina dentro de la Planta Piloto.

4) El *proceso de carbonización* produce una gran cantidad de gases y líquidos tóxicos. Por el sistema de condensación separamos los gases y los líquidos y luego:

- quemamos los gases dentro del horno por los quemadores especiales, transformándolos a gases inofensivos y por su poder calorífico ahorramos combustible.
- los líquidos contienen mucha agua y un líquido negro (alquitrán) altamente tóxico. Separamos la fase acuosa y absorbemos todo el alquitrán con cascarillas de arroz para obtener un "sólido" negro.

Por una incineración de la mezcla cascarillas de arroz/alquitrán dentro del horno de carbonización eliminamos el alquitrán y podemos sustituir al mismo tiempo una parte del combustible

5) Como *material para aislar* las paredes del horno de carbonización y del horno de activación a gas no utilizamos asbesto, sino una fibra cerámica de la empresa Babcock + Wilcox: Kaowool Ceramic Fiber que tiene gran resistencia contra temperaturas altas, una buena protección calorífuga y no es peligrosa como el asbesto.

Utilizamos la misma fibra cerámica también como empaquetadura de la tapa del tanque de carbonización para evitar fugas del gas pobre.

6) La *protección del personal* consiste

- en mascarillas de respiración contra el polvo que se produce por el manejo de las materias primas y del carbón
- gafas de seguridad
- guantes de cuero y de asbesto para manejar los hornos y materiales caliente.

Lamentablemente no fue posible sustituir los guantes de asbesto por otro material, porque en el Ecuador no hay otro tipo de guantes para estos asuntos.

7) Para tener cierta seguridad en el manejo de los *cilindros de gas*, los ubicamos fuera del alcance de los hornos de carbonización y activación y los conectamos por medio de una cañería con los quemadores respectivos.

8) El enfriamiento de los gases de la carbonización exige un gran volumen de agua (aprox. 360 l/h). La ciudad de Guayaquil tiene bastantes problemas con el abastecimiento del agua potable y por eso vamos a conectar el condensador del horno de carbonización a la *torre de enfriamiento* de la Facultad de Mecánica que ya existe cerca de la Planta Piloto lo que nos permitirá el ahorro de agua potable.

3. RESULTADOS DE LOS PROCESOS Y DEL ANALISIS DEL CARBON ACTIVADO

En este capítulo vamos a resumir los datos obtenidos al utilizar las diferentes materias primas. Las cascarillas de arroz nos han servido como materia prima básica y los resultados obtenidos a partir de su utilización nos han servido de orientación para elaborar las condiciones de los diferentes procesos. Una vez obtenidos los datos y condiciones adecuadas aplicamos los mismos para las demás materias primas.

3.1. La briquetación

Debido a nuestra falta de experiencia en el manejo de la máquina briquetadora y ya que el manual no contiene muchos detalles sobre el mismo, necesitamos varios ensayos para obtener las condiciones adecuadas.

En general, se puede indicar que la humedad y el tamaño del material juega un papel importante en la fabricación de las briquetas.

La humedad de las cascarillas causa la evaporación del agua dentro del tubo caliente de la briquetadora. Este vapor puede aumentar bruscamente la presión dentro del tubo con la consecuencia de una expansión brusca, una explosión, y un desprendimiento peligroso de partículas de las briquetas por la salida del tubo. Debido a estas explosiones es importante no estar frente a la salida durante la briquetación. Según nuestra experiencia se puede evitar estas explosiones bajando la humedad a un valor entre 7 y 9 %. Por esto secamos y analizamos la materia prima antes de su aplicación. Para secar las cascarillas aprovechamos el sol y el clima seco durante más de 9 meses y producimos bastantes briquetas para utilizarlas durante la época de lluvia.

El tamaño de las cascarillas influye en la densidad y en la compactación de las briquetas. Una materia prima fina, como el aserrín, produce una alta compactación y en poco tiempo tanta presión dentro del tubo central, que el motor no aguanta la carga y los breakers lo apagan todo. La limpieza y preparación nueva de la briquetadora después de una obturación de este tipo demora 2 horas.

El tamaño de las cascarillas de arroz (aproximadamente 9x2 mm) es el tamaño mínimo aceptable por el tornillo sin fin, los demás polvos exigen otro tipo de tornillo sin fin de la máquina, pero la fábrica no lo ofrece. Durante la briquetación, debido al enfriamiento que produce el material, baja la temperatura del tubo general, después de 20 minutos, a menos de 300°C y es necesario parar la máquina y recalentarla a 400°C. Para una producción industrial sería muy necesario reconstruir las resistencias para evitar este tipo de interrupciones de la briquetación.

La tabla # 12 indica los datos respectivos del proceso de la briquetación de las diferentes materias primas.

| MATERIA PRIMA | TAMAÑO PARTICULAS | PROCESO DE BRIQUETACION | BRIQUETA | | CONSUMO DE ENERGIA kWh/kg |
|---|-------------------|--|----------------------------|----------------|---------------------------|
| | | | DENSIDAD g/cm ³ | ASPECTO | |
| cascarillas de arroz | 9 x 2 mm | regular, 35 kg/h | 1.35 | dura, compacta | 0.197 |
| cáscaras de café | 10 x 13 mm | regular, 37 kg/h | 1.18 | suave, frágil | 0.227 |
| aserrín | < 1 mm | muy difícil | 1.16 | dura | - |
| virutas de madera | 5 a 30 mm | lento, 19 kg/h | 1.09 | dura | 0.402 |
| cásc. de café / cásc. de arroz 82 % / 18 % 75 % / 25 % 50 % / 50 % | | regular, 30 kg/h no es posible no es posible | 1.24 | no compacta | 0.270 |
| cásc. de café / aserrín 75 % / 25 % | | no es posible | | | |
| cásc. café / aserrín / cas. arroz 60 % / 20 % / 20 % | | no es posible | | | |

TABLA # 12: DATOS DE LA BRIQUETACION DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS

3.2. La carbonización

La carbonización en combinación con la activación son los procesos claves de la elaboración de carbón activado y son los que finalmente determinan su calidad y su capacidad de adsorción.

El desarrollo de nuestro proceso de carbonización tuvo 2 fases:

En la *primera fase*, después de la construcción del horno de carbonización, mejoramos el horno, especialmente el condensador y la recirculación del gas pobre con sus quemadores respectivos.

La cantidad de gas pobre depende del tipo de materia prima que se utilice y de la carga del tanque de carbonización. Una carga de 50 kg o más de briquetas produce tanto gas, que es necesario no quemar todo dentro del horno para no tener un sobrecalentamiento del mismo. Un quemador extra instalado encima del techo de la planta y conectado a la válvula 27 nos permite quemar el gas inútil y controlar de esta manera la temperatura dentro del horno.

El gran volumen de gas producido, que sale del tanque con una temperatura de hasta 400°C, nos obligó a mejorar también el sistema de refrigeración. Agregamos un condensador espiral de cobre (Figura # 6, No. 18) al tubo de condensación para intensificar el enfriamiento y logramos así una condensación suficiente de los líquidos dentro del gas pobre.

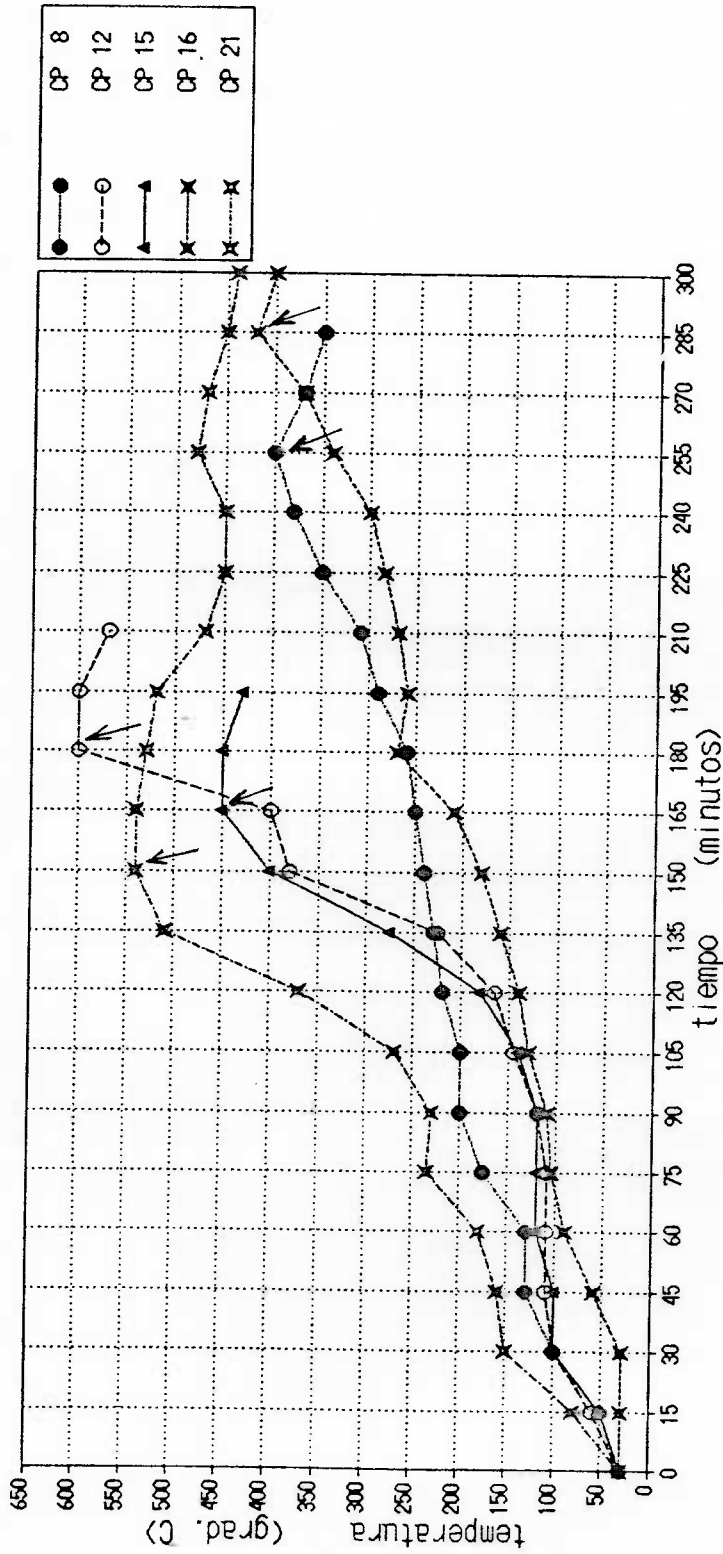
En la *segunda fase* elaboramos las condiciones de la carbonización para obtener un producto final de buena calidad. Variamos p.ej. la intensidad de la descomposición de la materia orgánica para obtener desde un material semicrudo hasta uno totalmente carbonizado.

La tabla # 13 muestra la evolución de la temperatura dentro del tanque de carbonización, lleno con briquetas de cascarillas de arroz, bajo diferentes condiciones. Las flechas indican el final del calentamiento. La temperatura máxima de las briquetas depende del manejo del combustible y del gas pobre y no del tipo del combustible.

Las tablas # 14 y # 15 muestran el desarrollo de las temperaturas del horno y del material dentro del tanque al usar gas y leña como combustible. Con leña, el calentamiento puede ser más rápido, pero la temperatura en el horno no es tan uniforme como al usar gas como combustible.

Desarrollo de la carbonización

El desarrollo de la temperatura del material dentro del tanque de carbonización es muy característico y similar en todas las carbonizaciones e indica bien las diferentes etapas de la carbonización. La siguiente descripción se refiere a cascarillas de arroz como materia orgánica.



COMBUSTIBLE: CP 8 : gas , CP 12 : gas , CP 15 : leña , CP 16 : leña + alquitran , CP 21 : leña + alquitran + briquetas

TABLA # 13 : CARBONIZACION: Desarrollo de la temperatura dentro del tanque

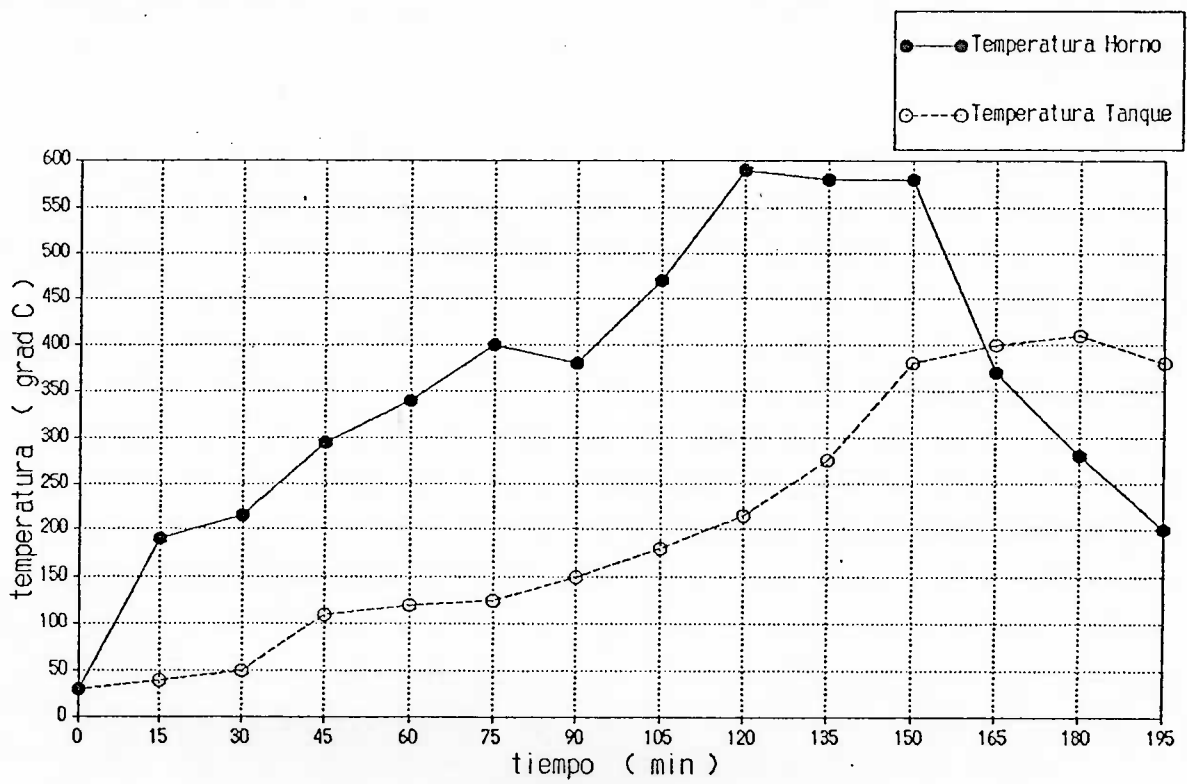


TABLA # 14: CARBONIZACION CON GAS COMO COMBUSTIBLE
MATERIAL: Cascasillas de arroz

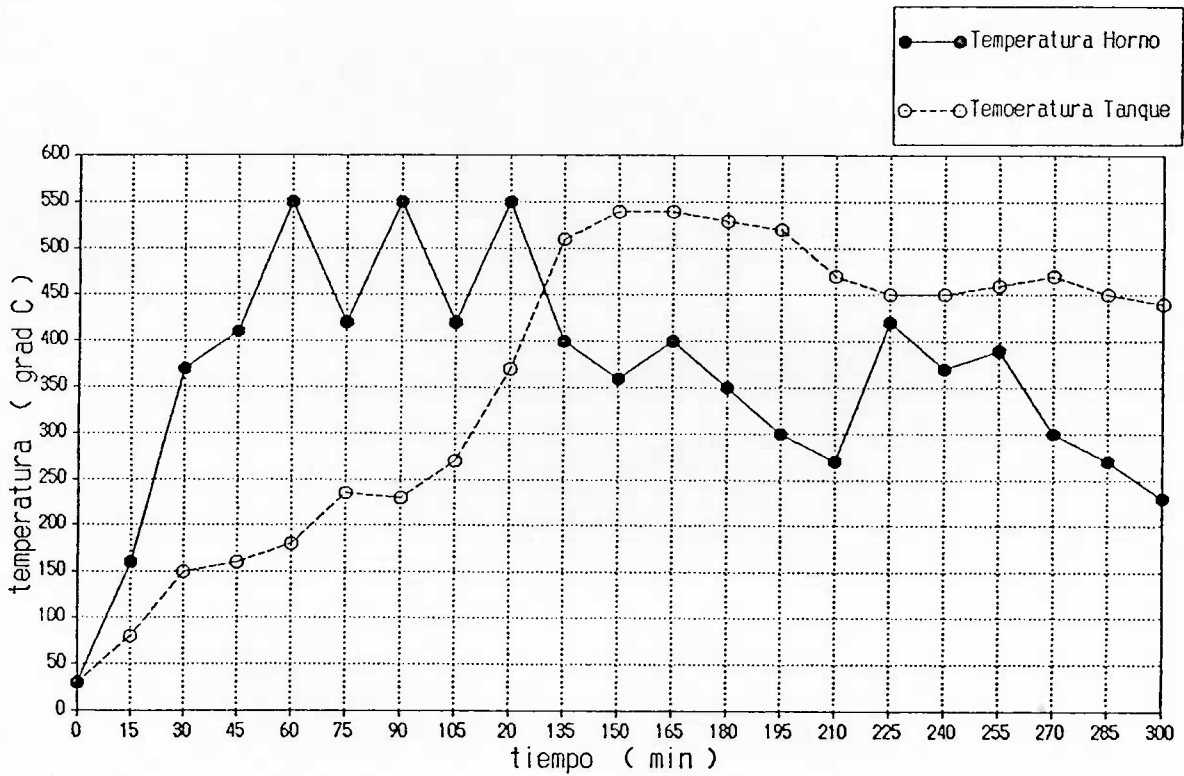


TABLA # 15: CARBONIZACION CON LEÑA COMO COMBUSTIBLE
MATERIAL: Cascasillas de arroz

Después del calentamiento del material a 100-120°C, la temperatura se conserva por un lapso de aprox. 30 min. La energía agregada en este tiempo se consume por la evaporación del agua que contiene el material como humedad. En esta fase, después de 10-20 minutos con una temperatura de 100/110°C, aparece el primer gas pobre y esto significa el comienzo de la descomposición térmica de las moléculas livianas del material orgánico.

El gas formado tiene el contenido más alto de CO: cascarillas de arroz producen hasta 48,6 % CO, las cáscaras de coco seco 58,3 % y las demás materias primas 35% (ver también tabla # 19)

Continuando el calentamiento con una temperatura del horno entre 400° y 600°C, la temperatura del material dentro del tanque sube y causa una descomposición más. En esta fase entre 300 y 350°C del material se observa la mayor producción del gas pobre y la concentración de 29,1 % de CO (de cascarillas de arroz) indica, que la descomposición térmica forma un gas con otros componentes combustibles, los cuales son fragmentos de moléculas orgánicas pesadas.

El control de la temperatura del horno durante este tiempo de alta producción de gas pobre es importante, porque la combustión de todo el gas dentro del horno causa un sobrecalentamiento del mismo. La temperatura podría subir a 700 u 800°C lo que traería como consecuencia la deformación y destrucción del horno. El manejo del quemador extra ubicado encima del techo de la planta permite el control de la temperatura del horno para evitar dicho sobrecalentamiento.

Una carbonización total, es decir un calentamiento del material dentro del tanque hasta que no se forme más gas pobre, es mostrada por la curva de la tabla # 14. Con una temperatura de aproximadamente 550°C las briquetas de cascarillas de arroz han sufrido una descomposición total, el gas pobre se apaga y dentro del tanque quedan solamente briquetas de carbón. Es posible calentar más estas briquetas, hasta altas temperaturas (ver la curva de CP 12 en la tabla # 13), pero debido a la construcción del horno hay un límite de 650-700°C.

La tabla # 16 muestra algunos datos de la calidad del carbón activado después carbonizaciones en distintas condiciones. Es evidente, que una carbonización total como CP12 o CP21 no da buena calidad al producto final, mientras una carbonización parcial como CP16 o CP22 mejora la calidad del carbón activado.

El control de la carbonización es posible mediante la observación de la temperatura del material dentro del tanque y del gas pobre. Con una temperatura de las briquetas de cascarillas de arroz entre 400-420°C se obtiene un material aprox. 90% carbonizado. Con esta temperatura del material en el tanque aún se forma gas pobre, pero su cantidad está reducida a 10-20% de su cantidad

máxima durante la carbonización. Esta reducción del volumen de gas pobre se puede utilizar como indicador del estado de la carbonización y apagar el horno e iniciar el enfriamiento del tanque de carbonización antes de la descomposición total del material.

| No | CARBONIZACION | | | CARBON ACTIVADO ABSORCION DE ANARANJADO DE METILO x 10 E -7 mmHg |
|-------|---|---------------|--------------------|--|
| | TEMP. MAX DENTRO DEL TANQUE °C | TIPO | CALENTA- MIENTO | |
| CP 8 | 380 | parcial | lento | 3.00 |
| CP 12 | 620 | completa | rápido | 2.15 |
| CP 14 | 500 | casi completa | rápido | 1.75 |
| CP 15 | 450 | parcial | rápido | 3.00 |
| CP 16 | 420 | parcial | lento | 4.60 |
| CP 21 | 540 | completa | rápido | 2.75 |
| CP 22 | 380 | parcial | lento | 3.60 |

TABLA # 16: CALIDAD DE CARBON ACTIVADO EN RELACION A LAS CONDICIONES DE LA CARBONIZACION.

MATERIA PRIMA: Briqueas de cascarillas de arroz
CARBON ACTIVADO: Tipo III 0.6 - 1.0 mm

La carbonización de las otras materias fue realizada con las condiciones elaboradas con las briquetas de cascarillas de arroz, en este caso también intentamos lograr una carbonización parcial de 90 %. Las curvas en las tablas # 17 y # 18 muestran el desarrollo de la temperatura de los diferentes materiales durante la carbonización y también el momento en que termina su carbonización.

El diferente comportamiento de los materiales durante la carbonización depende de su composición química y de su humedad. El bagazo por ejemplo, contiene mucha agua, y por eso la temperatura del material se mantiene entre 100-110°C durante más de 3 horas, que es el tiempo necesario para eliminar toda la humedad.

Ocurre lo mismo con las cáscaras de coco de la palma africana, una temperatura entre 100-115°C se mantiene constante durante más de 4 horas. El líquido condensado de esta carbonización tiene una sola fase y no es posible separar el agua. Además, el líquido, aún negro, tiene el olor y la viscosidad del aceite de coco. Conseguimos esta materia prima de una procesadora pequeña que aplica un procedimiento antiguo y poco eficaz y por eso extrajimos por nuestro tratamiento térmico los restos de aceite que todavía tuvieran las cáscaras de coco.

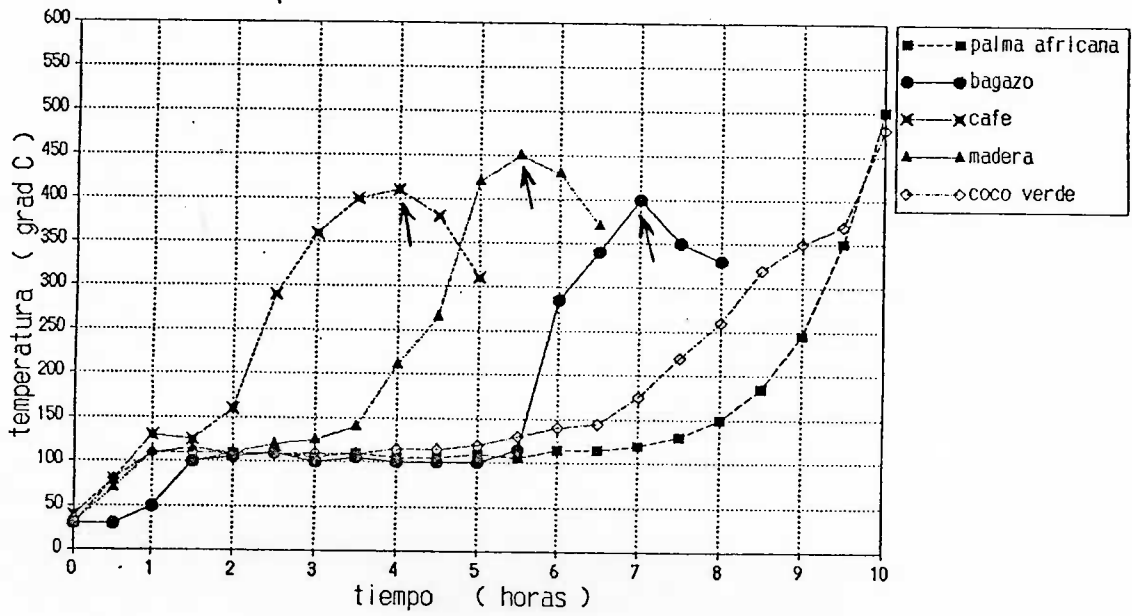


TABLA # 17: CARBONIZACION DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS (I PARTE)

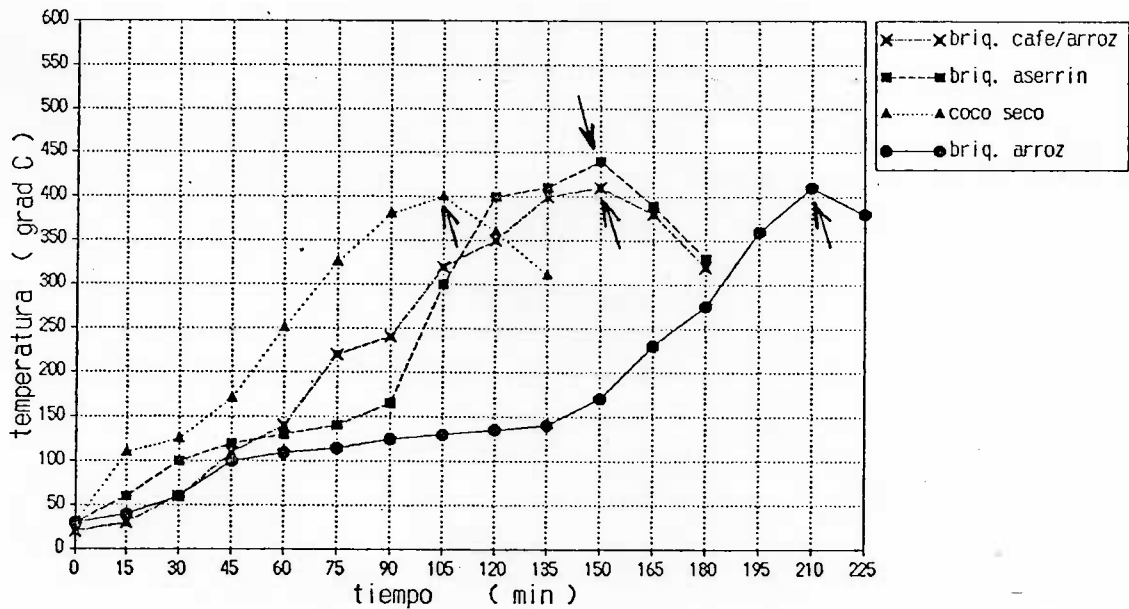


TABLA # 18: CARBONIZACION DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS (II PARTE)

| MATERIA PRIMA | PERDIDA DE PESO % | CONSUMO DE ENERGIA con respecto a la materia prima Kcal | | GAS POBRE | CONDENSADO (según respecto a la materia prima) | | |
|-------------------------------|-------------------|---|----------|-----------|--|---------|--------|
| | | | | | VOLUMEN | % CO | AGUA % |
| cascajillas de arroz | 60.0 | - | - | mucho | - | - | - |
| bricuetas casc. de arroz | 50.8 | 475 | 1057 | mucho | 40.4 | 18.5 | 3.7 |
| bricuetas casc. de café | 60.0 | 683 | 1140 | poco | 35.0 | 34.4 | 3.1 |
| virutas de madera (chamul) | 75.6 | - | - | mucho | - | - | - |
| bricuetas de aserrín | 64.0 | 772 | 2154 | mucho | 35.2 | 16.5 | 5.5 |
| madera (chamul) | 68.3 | 1796 | 5670 | mucho | 34.9 | 38.3 | 5.0 |
| bagazo de café | 85.4 | 8775 | 58500 *1 | muy poco | 2.0 | 80.5 | 4.8 |
| cáscaras de coco seco | 68.4 | 1020 | 3234 | poco | 58.3 | 44.7 | 7.9 |
| cáscaras de coco verde | 92.9 | 3631 | 50746 *1 | poco | 42.4 | 75.8 | 0.8 |
| cáscaras de coco palma afric. | 71.1 | 2515 | 8363 | mucho | 23.3 | 39.6 *2 | - |

*1 materia prima contiene poca sustancia orgánica

*2 contiene alquitran, aceite y agua

TABLA # 19: DATOS DE LA CARBONIZACION DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS

Comparando los datos de carbonización de las diferentes materias primas (tabla # 19) es obvio, que todas las sustancias orgánicas pierden más del 50 % de su peso y, especialmente, materiales como el bagazo, cáscaras de coco verde, coco seco, coco de palma africana, madera, sufren una reducción de su peso que va desde el 70 % hasta más del 80 %.

La energía necesaria para carbonizar el material tiene una relación con esta pérdida de peso o mejor dicho con el porcentaje de humedad y también con la cantidad de gas pobre desprendido. Bagazo, coco verde, coco seco y las cáscaras de café producen poco gas y por eso se necesita más combustible para su carbonización.

La composición del gas pobre, el porcentaje de CO, varía entre 23 y 58 %, el bagazo con solamente 2 % es una rara excepción, pero se puede explicar esto por la pequeña porción de la materia orgánica que contiene. La composición del gas pobre cambia durante el proceso de carbonización y por ejemplo, las briquetas de arroz desprenden el gas con variaciones del volumen y del porcentaje de CO.

La tabla # 20 indica la variación del gas pobre y del porcentaje de CO, ésta sirve también como indicador de los diferentes procesos de descomposición del material orgánico.

| TIEMPO min | TEMPERATURA DENTRO DEL TANQUE °C | GAS POBRE | |
|---------------|---|-----------|------|
| | | VOLUMEN | % CO |
| 15 | 60 | no hay | - |
| 30 | 100 | no hay | - |
| 45 | 110 | poco | 48.6 |
| 60 | 110 | poco | - |
| 75 | 110 | poco | - |
| 90 | 120 | mucho | 19.4 |
| 105 | 145 | mucho | - |
| 120 | 165 | mucho | - |
| 135 | 225 | mucho | - |
| 150 | 380 | máximo | 29.1 |
| 165 | 400 | mucho | - |
| 180 | 600 | poco | - |
| 195 | 620 | muy poco | - |

TABLA # 20: VARIACION DEL GAS POBRE DURANTE LA CARBONIZACION
MATERIAL: BRIQUETAS DE CASCARILLAS DE ARROZ.

De los líquidos condensados durante la carbonización separamos una fase líquida (agua) y una fase orgánica (alquitrán). Los porcentajes de agua y alquitrán en la tabla # 19 en relación con las pérdidas totales de las materias primas muestran que, por ejemplo, el coco seco o el bagazo por su gran cantidad de agua contienen poca materia orgánica a desintegrarse y por eso se desprende poco gas pobre y se necesita gran consumo de energía para su carbonización respectiva.

El valor de 18.5 % de agua condensada por las cascarillas de arroz es dos veces más alto que la humedad inicial de 8,5 % de las briquetas: El agua formada adicionalmente resulta de reacciones químicas por la descomposición de las moléculas orgánicas y recombinación de oxígeno e hidrógeno.

3.3. La Trituración

El molino está construido especialmente para briquetas carbonizadas. Independientemente de la materia prima que se use, las briquetas salen del horno de carbonización relativamente suaves y quebradizas. La variación de la separación entre los 2 rodillos permite triturar las briquetas enteras y, reduciendo la separación, obtener partículas medianas o finas.

Una trituración completa, la misma que consiste en 3 pasadas del material con diferentes separaciones entre los 2 rodillos, demanda de aprox. 60 minutos para 50 kg de briquetas carbonizadas (tabla # 21).

| pasos # | separación entre los rodillos (mm) | tiempo para ali- mentar/recoger el material (min) | tiempo para triturar (min) | tiempo total (min) |
|------------|--|--|---------------------------------------|----------------------------|
| 1 | 32 | 15 | 5 | 20 |
| 2 | 15 | 15 | 5 | 20 |
| 3 | 3 | 15 | 5 | 20 |
| total | 32 - 3 | 45 | 15 | 60 |

TABLA # 21 : Tiempo para realizar la trituración de 50 kg de briquetas de carbón.

Para un carbón más duro como el que se obtiene de las cáscaras de coco seco, cáscaras de coco de palma africana, leña, se necesita aproximadamente 20 % más de tiempo para su trituración, pues la alimentación del molino tiene que ser más lenta para de esta manera proteger la construcción y el motor del mismo.

Los diferentes gránulos que se obtienen al triturar estos carbones fueron clasificados de otra manera (ver tabla # 22). Especialmente el carbón de las diferentes cáscaras de coco tiene más partículas gruesas, porque no es tan quebradizo como las briquetas. Para obtener gránulos más finos de estos carbones duros sería necesario reconstruir los rodillos (poner una superficie más áspera) y reducir la separación entre ellos.

3.4. La clasificación

Para la construcción de los tamices y la selección de las mallas consideramos las diferentes aplicaciones del carbón activado. Un polvo muy fino tiene debido a su gran área superficial una alta capacidad de adsorción, pero su aplicación como agente purificador causa algunos problemas en la industria, porque su filtración y eliminación de los líquidos exige filtros y procesos especiales.

Es más fácil la aplicación del carbón activado en gránulos, por eso nos orientamos a la obtención de partículas con un diámetro entre 0,6 mm y 3 mm. El carbón activado en filtros de cigarrillos tiene un tamaño entre 0,6 - 0,8 mm y por esto escogimos las mallas adecuadas con un tejido de 0,6 mm y 1 mm respectivamente. La construcción de filtros de gases o de líquidos necesita partículas más gruesas. Utilizando una malla con un tejido de 3 mm es posible obtener gránulos de 1-3 mm de diámetro y algunos gránulos gruesos con un diámetro que va desde más de 3 mm hasta 15 mm.

La división del carbón triturado en las 4 fracciones, como muestra la tabla # 22, es el resultado de la trituración del carbón por 3 pasadas en el molino, como está indicado en la tabla # 21.

| CARBON de la MATERIA PRIMA | FRACCION | | | |
|------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| | TIPO I < 0.6 mm | TIPO II 0.6-1.0 mm | TIPO III 1.0-3.0 mm | TIPO IV > 3 mm |
| briquetas casc. de arroz | 34 % | 13 % | 12 % | 41 % |
| briquetas casc. de café | 60 % | 12 % | 13 % | 15 % |
| briquetas de aserrín | 49 % | 6 % | 12 % | 33 % |
| madera | 39 % | 8 % | 9 % | 44 % |
| cáscaras de coco seco | 9 % | 9 % | 27 % | 55 % |
| cáscaras de coco verde | 15 % | 8 % | 8 % | 69 % |
| cáscaras de coco palma áfricana | 23 % | 12 % | 22 % | 43 % |

TABLA # 22: FRACCIONES DE CARBÓN OBTENIDAS POR LA CLASIFICACION

La clasificación normalmente será realizada según la aplicación y la demanda. Es relativamente fácil variar el peso de las fracciones de los tipos II, III y IV cambiando las condiciones de la trituración (pasadas, separación entre los rodillos). Pero no es posible reducir la cantidad de polvo, especialmente de las briquetas carbonizadas (arroz, café aserrín), porque ellas por su suavidad y fragilidad siempre producen cierta cantidad del mismo, dicha cantidad de polvo está en directa relación a la cantidad de veces que se pasen las briquetas por el molino.

También sería posible variar las fracciones y los tamaños de los gránulos cambiando las mallas y utilizando otras con diferentes tejidos, pero esto significaría la reconstrucción de los tamices lo que tardaría 1-2 días

3.5. La Activación

Junto con el proceso de la carbonización, la activación determina las propiedades y la calidad del carbón.

Nuestra activación es un proceso térmico con la presencia de oxígeno (aire) que exige condiciones térmicas relativamente exactas. Para obtener temperaturas uniformes y estables dentro de nuestros hornos utilizamos algunas medidas extras.

El horno eléctrico cuenta no sólo con un buen aislamiento térmico sino además con un regulador electrónico de propia construcción, el cual estabiliza la temperatura con una variación de aproximadamente 10°C .

El horno a gas también tiene un buen aislamiento y posee un quemador triple con 3 válvulas que nos permite, regular las llamas independientemente y controlar bien la temperatura para tener una variación entre 10 y 15°C .

Ambos hornos tienen 4 termocuplas tipo K (NiCr/NiAl) para medir la temperatura del carbón y del horno interior. Gracias a un panel de construcción propia es posible controlar las temperaturas de los dos hornos al mismo tiempo, mismo tiempo.

Las tablas # 23 y # 24 muestran el comportamiento térmico de los hornos y del carbón. Determinamos las curvas de las temperaturas bajo las mismas condiciones:

- precalentar el horno a 350°C
- utilizar 1 bandeja con 1 kg carbón tipo II
- no abrir la puerta durante la activación
- medir la temperatura del carbón en el centro de la bandeja
- medir la temperatura del horno 5 cm encima del carbón.

En ambos hornos el carbón necesita 20 min. para lograr la temperatura de 350°C . Esta temperatura es necesaria para iniciar la activación, porque el carbón en contacto con el oxígeno del aire se quema y especialmente las moléculas orgánicas todavía existentes en el carbón reaccionan con el oxígeno.

Ya mencionamos en el apartado 3.2. que terminamos la pirólisis antes de una carbonización completa. Este material orgánico (aprox. 10 %), que nos queda de la carbonización parcial, se quema a $350-400^{\circ}\text{C}$ dentro del horno de activación y deja huecos y poros en la superficie del carbón.

Un proceso adicional ocurre dentro del carbón: La formación de cristalitas. Por las altas temperaturas, los átomos del carbono amorfo pueden agruparse y formar una estructura cristalina irregular, denominada cristalitas (en inglés: crystallites), dejando también irregularidades y poros en la superficie del carbón. (HASSLER 1974, pág. 184-188).

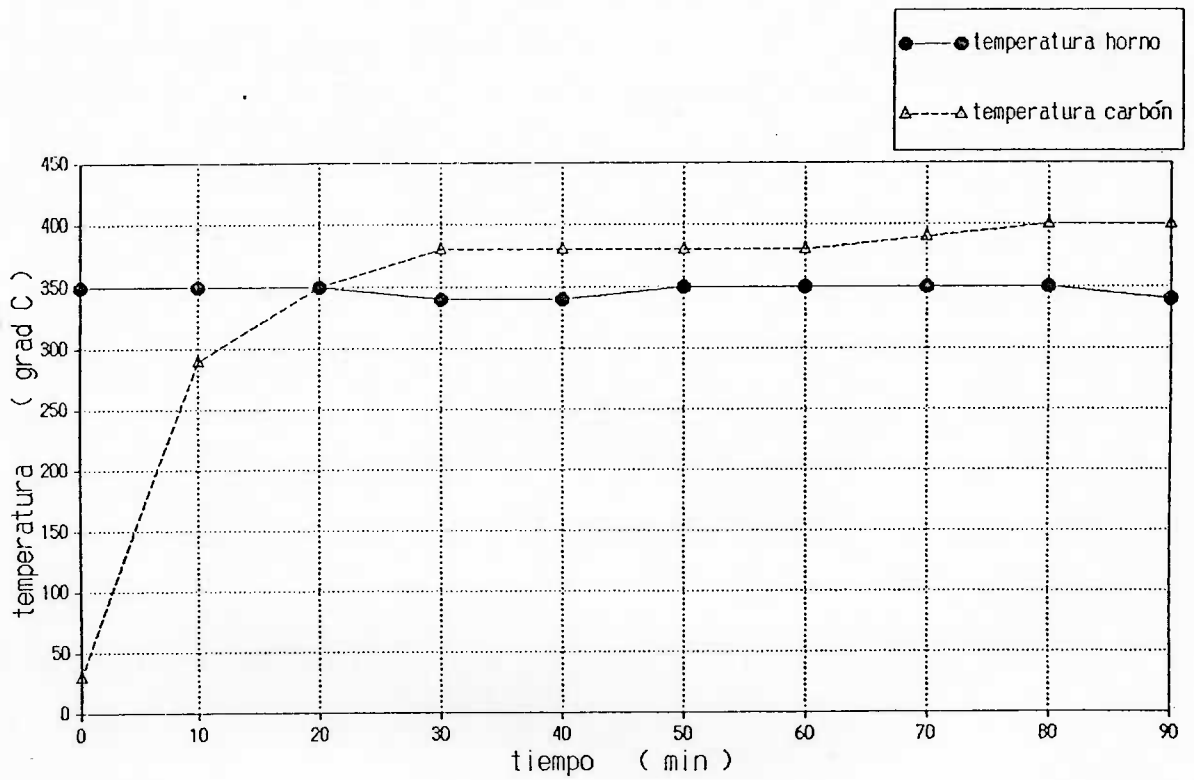


TABLA # 23 : DESARROLLO DE LA TEMPERATURA DURANTE LA ACTIVACION EN EL HORNO ELECTRICO

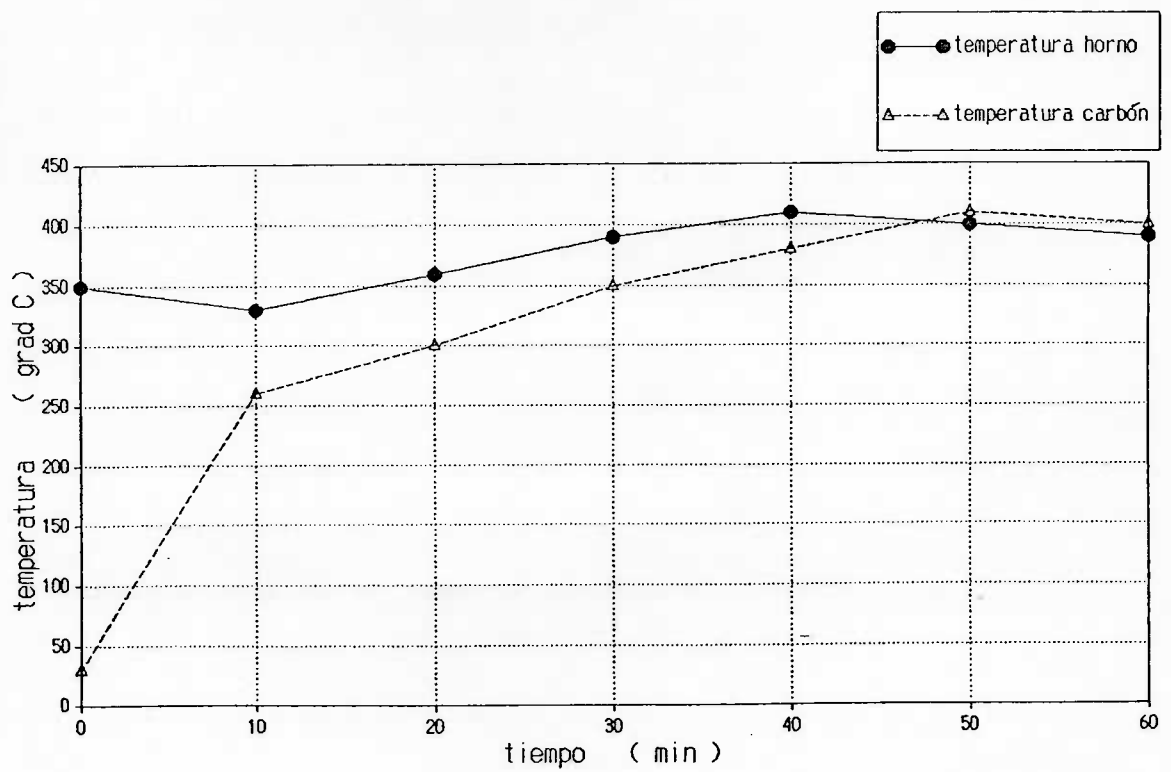


TABLA # 24 : DESARROLLO DE LA TEMPERATURA DURANTE LA ACTIVACION EN EL HORNO A GAS

La combinación de ambos efectos - combustión del resto de la sustancia orgánica y formación de cristalitas- es la que le confiere al carbón la característica de tener una gran superficie y por lo tanto una gran capacidad de adsorción.

Debido a la combustión de los restos del material crudo y del carbón mismo aumenta la temperatura del carbón en 20 o 30°C más que la temperatura del horno y también se reduce el peso del carbón.

La tabla # 25 indica la pérdida del peso en la activación del carbón de las diferentes materias primas.

| CARBON de la MATERIA PRIMA | PERDIDA DE PESO | | |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| | TIPO II 0.6-1.0 mm | TIPO III 1.0-3.0 mm | TIPO IV > 3 mm |
| briquetas casc. de arroz | 12 % | 6 % | 5 % |
| briquetas casc. de café | 13 % | 13 % | 8 % |
| briquetas de aserrín | 10 % | 6 % | 6 % |
| madera | 4 % | 4 % | 3 % |
| cáscaras de coco seco | 18 % | 15 % | 10 % |
| cáscaras de coco verde | 14 % | 16 % | 13 % |
| cáscaras de coco palma africana | 8 % | 7 % | 5 % |

TABLA # 25 : PERDIDA DE PESO EN LA ACTIVACION

CONDICIONES: 380 - 400 °C, 60 min.

Para el proceso de la activación térmica es importante determinada temperatura, porque con menos que 350°C no hay efecto alguno y con más de 420°C el carbón se quema fácilmente por la presencia del oxígeno. La temperatura ideal es entre 380°C y 400°C y el tiempo ideal es de 60 min. La tabla # 26 muestra la calidad de carbones activados bajo diferentes condiciones. No solamente la mejor adsorción con temperaturas de 380°C o 400°C es decisiva, sino también la cantidad de cenizas que se forman con 420°C y más. En el caso del carbón a partir de cascarillas de arroz, estas cenizas blancas perjudican la calidad del carbón y también su aplicación, por eso establecimos la temperatura de activación a 380°C-400°C y el tiempo a 60 minutos.

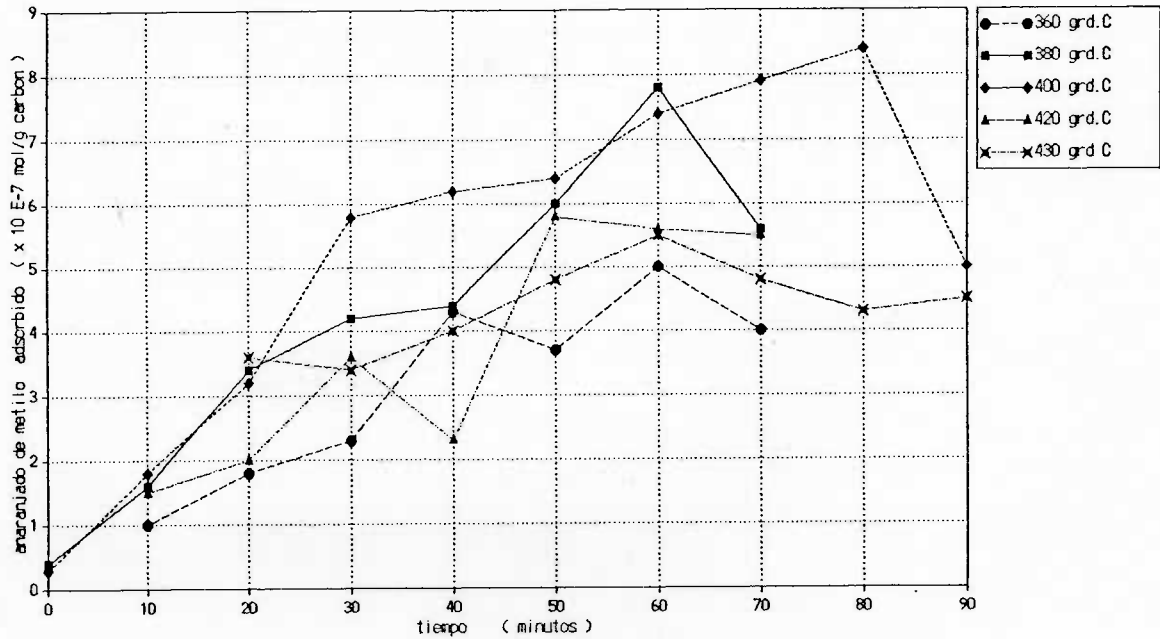


TABLA # 26: DIFERENTES CONDICIONES DE ACTIVACION Y SU EFECTO EN LA CALIDAD DE CARBON ACTIVADO:

MATERIAL: Carbón tipo II de cascarillas de arroz

No se puede determinar una diferencia en la calidad del carbón que se obtiene de cada uno de los dos diferentes hornos de activación (horno eléctrico y horno a gas). Solamente cabe anotar que el manejo del horno a gas requiere de más atención y que de vez en cuando haya que regular los quemadores para controlar bien la temperatura.

Los hornos de activación necesitan para su precalentamiento a 350°C la siguiente cantidad de tiempo:

| | |
|-----------------|--------|
| Horno eléctrico | 55 min |
| Horno a gas | 65 min |

3.6. Calidad del Carbón Activado

La determinación de la capacidad de adsorción la realizamos normalmente mediante nuestro método ADAMCA (ver apartado 2.3.) y comparamos los resultados con los del carbón activado comercial.

Como referencia utilizamos 2 tipos de carbón activado granulado:

- Carbón activado de los filtros de cigarrillos LARK, procedencia de los EE.UU., tamaño de los gránulos 0,6 - 0,8 mm
- Carbón activado de filtros para pipas, marca VAUEN Dr. Perl JUNIOR, procedencia Rep. Federal de Alemania, tamaño de los gránulos 0,6 - 1,5 mm

Como indicamos en el apartado 2.3., los resultados del análisis de la calidad de carbón activado no son absolutos y no muestran la capacidad de adsorción total, sino que sirven para comparar los diferentes tipos de carbón y para indicar cuál carbón activado tiene una calidad aceptable.

La tabla # 27 muestra estos resultados, obtenidos con nuestro método por un contacto de 2 minutos entre el carbón y la solución de anaranjado de metilo.

| CARBON TIPO II de la MATERIA PRIMA | ADSORCION | | |
|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | anaranjado de metilo x 10 E -7 mol/g | con respecto al filtro LARK % | con respecto al filtro PIPA % |
| filtro LARK | 9.00 | 100.0 | 110.4 |
| filtro para PIPA | 8.15 | 90.5 | 100.0 |
| cascarillas de arroz | 8.40 | 93.3 | 103.0 |
| cáscaras de café | determinación no es posible, la solución es turbia | | |
| madera | 9.65 | 107.2 | 118.4 |
| aserrín / virutas de madera | 5.80 | 64.4 | 71.1 |
| cáscaras de coco seco | 6.70 | 74.4 | 82.2 |
| cáscaras de coco verde | 8.20 | 91.1 | 100.6 |
| cáscaras de coco palma afric. | 7.20 | 80.0 | 88.3 |

ANOTACION: Los datos de esta tabla #27 no son comparables con los de la tabla # 8, porque hubo un cambio de las condiciones del método y del equipo.

TABLA # 27 : CALIDAD DE CARBON ACTIVADO: COMPARACION DE CARBONES DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS. (Método ADAMCA)

Lamentablemente, no fue posible determinar la adsorción del carbón obtenido a partir de las cascarillas de café, pues la turbiedad en la solución de anaranjado de metilo después del contacto con el carbón evitó la determinación y no fue posible eliminar las partículas muy finas mediante una filtración.

Los resultados, especialmente del carbón activado a partir de las cascarillas de arroz y de la madera, son impresionantes. El carbón de los diferentes tipos de coco también tiene una calidad aceptable. Pero además de la capacidad de adsorción hay que considerar las propiedades físicas del carbón. El carbón de coco seco y de la palma africana tienen buenas características, son duros y resistentes contra fricción, mientras el carbón de las cascarillas de arroz es más suave y frágil.

La calidad del carbón activado, como la indicada en la tabla # 27, puede ser obtenida cumpliendo las condiciones óptimas de los diferentes procesos, especialmente de la carbonización y de la activación. Una producción normal de carbón activado va a bajar la calidad en 10-20 %, pero aún quedaría una capacidad de adsorción suficiente para la mayoría de las aplicaciones.

Los carbones de referencia - filtro de cigarrillos, filtro de pipa - son carbones activados comerciales para aplicaciones industriales. Encontramos en el mercado de Guayaquil, para el uso especialmente de laboratorios, otros 2 tipos de carbón granulado con las características siguientes:

- A: Carbón activado, gránulos 0,6-0,8 mm, adsorción de anaranjado de metilo: $12,2 \times 10^{-7}$ mol/g
- B: Carbón activado, gránulos 0,5- 1,0 mm, adsorción de anaranjado de metilo: $12,6 \times 10^{-7}$ mol/g.

El carbón de los filtros (cigarrillos, pipas) y nuestro carbón activado tienen solamente 75 % de la adsorción de estos carbones especiales, pero el alto precio de estos carbones de 5000 sucres/kg (=8,5 US\$/kg) limita su uso al laboratorio o a aplicaciones extras.

Adsorción máxima del carbón activado.

Nuestro método desarrollado y aplicado para el control de la calidad sirve para determinar rápidamente la adsorción de diferentes tipos de carbón, pero no permite conocer la capacidad total de adsorción.

Con una determinación especial, que aplica un contacto por largo tiempo entre la solución de anaranjado de metilo y del carbón activado, es posible examinar la adsorción máxima del carbón.

La tabla # 28 muestra el desarrollo de la adsorción de nuestro carbón activado durante 130 horas. Después de aproximadamente 100 horas de contacto se nota un equilibrio y no hay más adsorción del colorante. Varias repeticiones de este ensayo mostraron el mismo resultado: la adsorción máxima de nuestro carbón activado se logra entre 100 y 120 horas. En la tabla # 29 podemos encontrar los valores de la adsorción máxima de diferentes tipos de carbón activado.

Estos datos no juegan un papel importante en la realidad del uso de carbón activado, porque normalmente sólo hay un contacto corto entre el medio y el carbón, pero la adsorción máxima da una idea adicional sobre la calidad del carbón activado y puede servir como comprobación de los resultados de la determinación rápida.

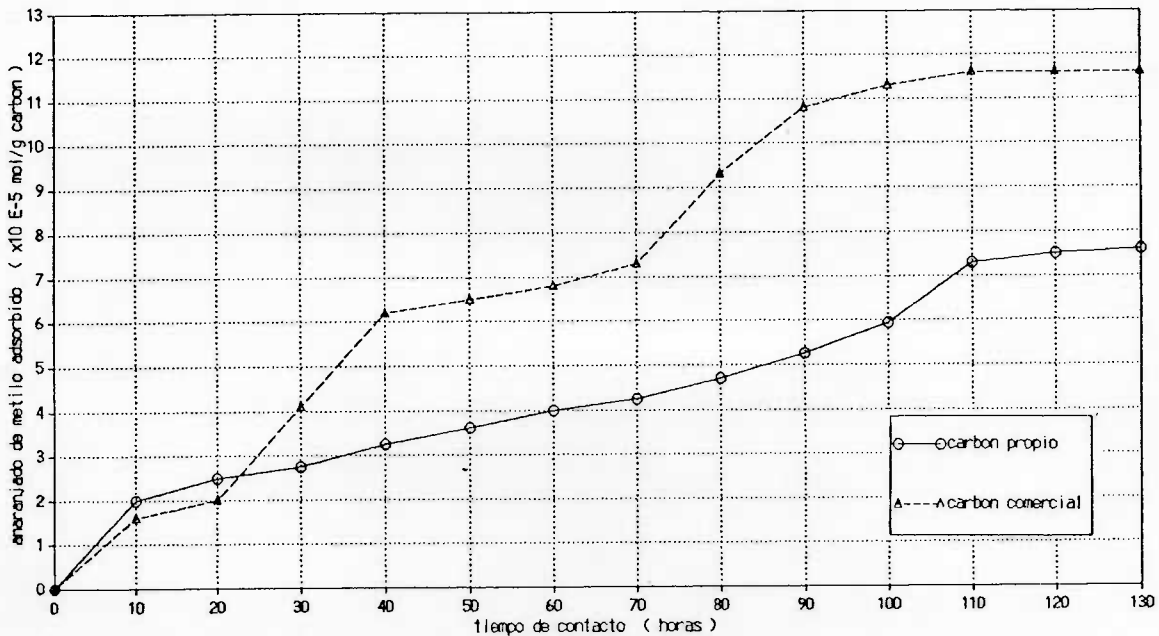


TABLA # 28 : DESARROLLO DE LA ADSORCION POR CARBON ACTIVADO EN 130 HORAS DE CONTACTO CON EL MEDIO

| TIPO DE CARBON | ADSORCION de anaranjado de metilo después 100 horas de contacto |
|----------------------------|---|
| filtro LARK | 1.40×10^{-4} mol / g carbón |
| filtro PIPA | 1.16×10^{-4} mol / g carbón |
| briq. cascarillas de arroz | 0.76×10^{-4} mol / g carbón |
| comercial A | 1.42×10^{-4} mol / g carbón |
| comercial B | 1.36×10^{-4} mol / g carbón |

TABLA # 29:
ADSORCION MAXIMA DE DIFERENTES TIPOS DE CARBON ACTIVADO

Especificaciones del carbón activado

La tabla # 30 muestra las especificaciones de los diferentes tipos de carbón activado.

| TIPO DE CARBON ACTIVADO | TAMAÑO PARTICUL. mm | DENSIDAD APARENTE g/cm ³ | HUMEDAD % | CENIZAS % |
|---------------------------------------|------------------------|--|--------------|--------------|
| filtro LARK | 0.6 - 0.8 | 0.54 | 18.3 | 6.3 |
| filtro PIPA | 0.6 - 1.5 | 0.58 | 19.3 | 1.9 |
| briq. cascarillas de arroz tipo II | 0.6 - 1.0 | 0.41 | 0.6 | 42.4 |
| tipo III | 1.0 - 3.0 | 0.41 | 0.5 | 42.6 |
| tipo IV | 3.0 - 15 | 0.44 | 0.5 | 42.7 |
| briq. cásc. de café tipo II | 0.6 - 1.0 | 0.25 | 4.7 | 11.9 |
| cásc. de palma afr. tipo II | 0.6 - 1.0 | 0.44 | 4.1 | 12.1 |
| cásc. de coco seco tipo II | 0.6 - 1.0 | 0.54 | 2.9 | 1.6 |
| briq. de aserrín tipo II | 0.6 - 1.0 | 0.38 | 3.1 | 15.5 |
| madera (chanul) tipo II | 0.6 - 1.0 | 0.34 | 3.7 | 11.2 |
| comercial A | 0.6 - 0.8 | 0.49 | 11.6 | 27.9 |
| comercial B | 0.5 - 1.0 | 0.55 | 7.6 | 4.6 |

TABLA # 30:
ESPECIFICACIONES DE DIFERENTES TIPOS DE CARBON ACTIVADO

Realizamos las determinaciones según las normas de:

Densidad: ASTM D2854: Standard Method of Test for "Apparent Density of Activated Carbon".

Humedad: ASTM D2867: Standard Methods of Test for "Moisture in Activated Carbon".

Cenizas: ASTM D2866: Standard Method of Test for "Total Ash Content of Activated Carbon".

Para la aplicación del carbón activado también son importantes sus componentes químicos. Por eso realizamos un análisis químico del carbón activado de las cascarillas de arroz y determinamos los componentes más interesantes. Los resultados se encuentran en la tabla # 31 y muestran en comparación con los de un carbón activado comercial muy pocas impurezas. El carbón comercial de la compañía MERCK tiene el sello de calidad "para análisis", lo que significa que es un reactivo de alta pureza para fines analíticos. Por tener valores similares, nuestro carbón activado también serviría para estas aplicaciones analíticas.

| COMPONENTES | CARBON ACTIVADO | |
|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| | a partir de cascarillas de arroz | de la compañía MERCK *1 |
| solubles en HCl 5% | 2.96 % | máx. 1 % |
| solubles en H ₂ O | 1.20 % | máx. 0.5 % |
| cloruro Cl ⁻ | 0.12 % | máx. 0.01% |
| sulfato SO ₄ ²⁻ | bajo del límite | máx. 0.01% |
| metales pesados (como Plomo) | < 0.5 ppm | máx. 30 ppm |
| hierro Fe | 0.0026 % | máx. 0.003 % |
| cinc Zn | 0.0014 % | máx. 0.001 % |

*1 Datos tomados del catálogo MERCK: REACTIVOS, DIAGNOSTICA, PRODUCTOS QUIMICOS 1987/88

TABLA # 31: ANALISIS QUIMICO DEL CARBON ACTIVADO

4.2. Horno de carbonización

Dimensiones:

Altura = 1820 mm
Ancho = 1190 mm
Largo = 3800 mm
Altura chimenea = 2400 mm , alt. total = 4220 mm

Condensador:

Diám. ext = 300 mm; diám. int = 90 mm; largo = 1220 mm
Capacidad de agua = $0,078 \text{ m}^3 = 78 \text{ litros}$
Gasto de agua = 360 litros por hora

Tanque de condensado:

Diám. = 300 mm , altura = 330 mm
Volumen condensado = $0.02 \text{ m}^3 = 20 \text{ litros} = 5 \text{ galones}$

Tanque de carbonización:

Volumen = $0.220 \text{ m}^3 = 220 \text{ litros} = 55 \text{ galones}$
Carga de briquetas = 100 kg = 220 lbs
Carga 75% = 75 kg = 165 lbs
Diám. tanque = 570 mm
Long tanque = 900 mm

Quemadores:

Longitud de quemadores LPG = 80 cm
Perforaciones = diám. $3/32'' = 238 \text{ mm}$
Longitud de quemadores gas pobre = 60 cm
Perforaciones = diám. $5/32'' = 396 \text{ mm}$

Materiales usados:

8 planchas de hierro: espesor 1 mm (1200x2400 mm)
10 metros cañería de cobre diám. $3/8''$ para serpentín del condensador
15 metros cañería de cobre diám. $3/8''$ para instalación de los quemadores de gas.
12 metros de tubería diám. $3/4''$ en sistema de recirculación y de agua
18 metros de tubería diám. $1/2''$ en sistema de agua de enfriamiento
2 llaves de diám. $1/2''$
5 llaves de diám. $3/4''$ para sistema de recirculación de gas pobre
2 tanques de 55 galones

1 tubo de diám. 3" x 3 metros 9 cédula 40 = 4 mm
6 metros tubo diám. 1" (cédula 40 = 4mm) para alta temperatura
2 válvulas para gas
2 cartones de fibra cerámica: Tipo bloque 12x12x6 "
 espesor 25 mm.
6 metros de ángulo 2"x2"x 3/16"
12 metros platinas 1"x 1/8"
10 tubos cuadrados de 1"x1"x 1 mm de espesor 1/20
 Plancha de aluminio para recubrimiento
12 metros de mangueras para agua

Capacidad de producción:

Pérdida en peso por carbonización: 52 %

Pérdida de agua: 15%

 alquitrán: 3 %

 gas: 34 %

Tiempo necesario para carbonización: 4 horas

Tiempo de enfriamiento: 3 horas

Se puede obtener 36 kg de carbón por 1 carbonización

Se puede realizar 2 carbonizaciones al día

Producción total de carbón : 360 kg/semana

Consumo de energía

En cada carbonización se consume un promedio de 3,64 kg de gas

Poder calorífico del gas 11889 kcal/kg

Consumo de energía para obtener 1 kg de carbón:

 504 kcal/kg materia prima

 1050 kcal/kg carbón= 1,22 kWh/kg carbón

4.3 Molino

Dimensiones:

 Altura = 1900 mm

 Ancho = 450 mm

 Largo = 1000 mm

Diámetro de los cilindros huecos

 ext. = 216 mm int. = 200 mm e = 8 mm

 Chumaceras de piso diám. 1 1/4"

 Diámetro de las poleas: menor = 100 mm

 mayor = 200 mm

 razón de cambio 2:1

 1720 RPM —> 860 RPM

Volúmen de las tolvas:

$$\begin{aligned} \text{Tolva 1} &= 0,032 \text{ m}^3 \\ 2 &= 0,031 \text{ m}^3 \\ 3 &= 0,022 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Valores de placa del motor:

Marca: WEG MODELO: G56H1187 60 HZ
2 HP 1720 RPM 110/220 V 26/13 Amp

Abertura entre los rodillos:

$$\text{máxima} = 32 \text{ mm} \quad \text{mínima} = 3 \text{ mm}$$

Materiales usados:

2 poleas para banda tipo V
4 chumaceras de piso diám. 1 1/4" NGK
2 planchas de espesor 1 mm (1200 x 2400 mm)
1 motor de 2 HP
1 tornillo sin fin diám. 5/8"
9 metros ángulo 2"x2"x3/16"
6 metros ángulo 1"x1"x1/8"
pernos diám. 3/8x 1"
pernos diám. 1/2"x 2 1/2"

Capacidad de producción:

$$50 \text{ kg/hr} = 400 \text{ kg/día} = 2000 \text{ kg/semana}$$

Consumo de energía:

$$1320 \text{ Wh} = 1,32 \text{ kWh} \quad (V = 220 \quad A = 6 \text{ A})$$

Consumo de energía por kg de carbón:

$$26,4 \text{ Wh/kg} = 0,026 \text{ kWh/kg}$$

4.4. Tamices

Dimensiones:

Altura = 1800 mm

Ancho = 750 mm

Largo = 750 mm

Mallas :

gránulos > 3 mm

1- 3 mm

< 0,6 mm

Platos:

Altura de los platos : 60 mm

Altura total de los platos : 720 mm

Cantidad de platos : 12

Medidas = 450 x 450 mm

Abertura del paso entre los platos = 30 mm

Capacidad de la tolva de llenado: 0,0086 m³

Contrapeso:

3,5 lbs = 1,59 kg.

Distancia peso - eje : 11cm

Poleas:

250 mm y 75 mm

Relación de cambio 1 : 3,33 —>1745 : 524 RPM

Valores de Placa del motor:

Marca: WEG

Mod B 481157 60 Hz 1/4 HP

1745 RPM 110/220 V 8/4 A

Chumacera de pared: diám. 1/2"

Materiales usados:

18 metros angulo 2"x2"x3/16"

4 pernos de anclaje diám. 3/8" x 3"

6 metros varilla lisa diám. 8 mm

8 pernos diám. 3/8" x 2"-

8 metros tubo cuadrado 1,2

2 metros angulo 1"x1"x1/8"

2 planchas hierro 1,0 mm (1200 x 2400 mm)

100 tornillos 5/8" x 10

Motor de 1/4 HP
Chumacera de pared 1/2"
Poleas de aluminio para banda V: 250 y 75 mm
Mallas de acero
 orificios 3 mm
 orificios 1 mm
 orificios 0.6 mm

Capacidad de producción:
 50 kg cada 100 min
 240 kg/día

Consumo de energía:
 0,575 kWh
 Consumo de energía por kg carbón: 17,2 Wh/kg = 0,017 kWh/kg

4.5. Horno de activación a gas

Dimensiones:

 Altura = 450 mm
 Ancho = 600 mm
 Largo = 700 mm
 Interior del horno = 220 x 540 mm
 Separación de las paredes = 80 mm
 25 mm de espesor de la fibra cerámica
 20 mm de separación entre pared interior y la fibra
 35 mm de separación entre fibra y pared exterior
 3 quemadores circulares con entrada de aire calibrable y perforaciones de diám. 3/16"

Materiales usados:

 Plancha de 1/8" (paredes laterales interiores)
 Plancha de 3/16 (pared inferior interior)
 Angulos de 1"x1"x1/8"
 Plancha de acero blanco (0,80 mm)
 Regulador de gas
 Quemadores circulares
 Bisagras
 Tornillos 5/8"x10
 Plancha de 1 mm de espesor (paredes exteriores)

Capacidad de Producción:

 En 1 bandeja: 1,5 kg = 18 kg/día

Consumo de energía:

Pre calentamiento: 60 min

Consumo de energía : 0,8 lbs de gas = 0,36 kg
= 4320 Kcal = 5,02 kWh

Activación: 60 min

Consumo de gas: 0,4 lbs = 0,18 kg
= 2160 kcal = 2,51 kWh

Consumo de energía por 1 kg de carbón 960 kcal/kg = 1,11 kWh/kg

4.6. Horno de activación eléctrico

Dimensiones:

Altura = 450 mm

Ancho = 600 mm

Largo = 700 mm

Espesor del aislamiento: Plancha asbesto 1/8"

Separación de paredes: 50 mm

Medidas interiores del horno: 220x450 mm

Resistencias de 220V; 18 Amp.

Materiales usados:

2 resistencias de 220 V, 18 Amp —>3960 kW

Plancha de hierro 1/8" (paredes interiores)

Plancha de hierro 1 mm espesor (paredes exteriores)

Plancha de acero blanco (0,8 mm)

Regulador de voltaje para controlar la temperatura

Capacidad de producción:

1 bandeja: 1,5 kg = 18 kg/día

Consumo de energía:

Pre calentamiento: 60 min

Consumo de energía: 3,96 kWh

Activación: 60 min

Consumo de energía: 1,92 kWh

Consumo de energía por 1 kg carbón: 0,86 kWh/kg

4.7. Extractor de aire

Dimensiones:

Altura = 300 mm
Ancho = 250 mm
Largo = 300 mm
Entrada al extractor = 5"
Salida del extractor = 4"
Diámetro de las paletas = 220 mm

Materiales usados:

Plancha de aluminio
Angulo 2"x2"x3/16"
12 metros tubería PVC diám. 4"
Angulos T, codos, tapas.

Capacidad de extracción:

20,1 m³/min

Consumo de energía:

200 W

5. CLASIFICACION DE LOS COSTOS

Dentro de los gastos para la construcción de la Planta Piloto y para su operación no se incluye, a pesar de su importancia, los gastos efectuados en las actividades necesarias para obtener los resultados y condiciones de los equipos y procesos.

5.1. Gastos en la construcción de la Planta Piloto.

Hay que mencionar que utilizamos un terreno de la ESPOL y sus instalaciones de agua potable, agua servida y electricidad para la construcción civil. Por eso la siguiente lista de gastos indica solamente los efectuados en las construcciones y equipos dentro de la Planta Piloto.

| | US-\$ |
|---|---------------|
| Construcción civil (materiales, mano de obra) | 2.600 |
| Briquetadora | 5.860 |
| Horno de carbonización (materiales) | 1.820 |
| Molino (materiales, motor) | 930 |
| Tamices (materiales, motor) | 410 |
| Hornos de activación (materiales, regulador de temperatura) | 480 |
| Control de calidad (materiales de vidrio, espectrofotómetro) | 2.805 |
| Medidas de seguridad (extractor, gafas, etc.) | 380 |
| Mano de obra (diseño y construcción de los equipos) | 5.550 |
| <hr/> | |
| Total | US- \$ 20 835 |

Los bajos precios de la construcción civil, del molino, de los tamices y de los hornos de activación son resultado de la construcción sencilla, del bajo nivel de los precios en el país en general y de que la construcción fue realizada con nuestras propias herramientas y por el personal del proyecto.

5.2. Costos de la producción

Semanalmente es posible elaborar 150 kg de carbón activado si solamente se produce carbón activado granulado (tipo II, III, IV). El manejo de los aparatos exige al menos 2 trabajadores, esto sin considerar el personal para la administración.

Según los datos mencionados en el capítulo 4, el consumo de energía en la producción utilizando cascarillas de arroz como materia prima es el siguiente:

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Briquetación: | 0,20 kWh/kg briquetas |
| = | 0,50 kWh/kg carbón |
| Carbonización: | 1,22 kWh/kg carbón |
| Trituración: | 0,03 kWh/kg carbón |
| Clasificación: | 0,02 kWh/kg carbón |
| Activación: | 0,86 kWh/kg carbón |
| <hr/> | |
| Consumo total de energía: | 2,63 kWh/kg carbón |

De esta energía se consume aproximadamente un 55 % como energía eléctrica. Si calculamos con el precio nacional de 1 kWh = 0,043 US-\$, el costo de energía es de 0,113 US-\$ para producir 1 kg de carbón activado.

Actualmente (septiembre 1989), el sueldo promedio de los trabajadores en el Ecuador es de 60.000 sucres (equivalente a 97 US-\$) mensual. Para una producción de 600 kg de carbón activado granulado, el gasto por personal es de 194 US-\$ o 0,323 US-\$ por kilogramo.

El consumo de agua por la recirculación en una torre de enfriamiento es mínimo, cuesta aproximadamente 1000 sucres /semana (1,61 US-\$) o 0,010 US-\$ por kg de carbón.

La materia prima no cuesta nada, solamente hay gastos para su transporte. Este es de aproximadamente 4.000 sucres para 500 kg (=6,45 US-\$) o 0,032 US-\$ por kg de carbón.

Costos de la producción de 1 kg de carbón activado:

| | | |
|--------------|-------|-------|
| Energía | 0,113 | US-\$ |
| Mano de obra | 0,323 | US-\$ |
| Agua | 0,010 | US-\$ |
| Transporte | 0,032 | US-\$ |
| <hr/> | | |
| Total | 0,478 | US-\$ |

Normalmente, al calcular los costos de producción, hay que considerar también los factores de amortización, tasa de interés, mantenimiento, pero por la falta de experiencia en el manejo de la planta y por el carácter experimental de la misma no están incluidos estos costos en el cálculo.

6. CONCLUSIONES

La Planta Piloto para la Producción de Carbón Activado, descrita en este informe, brinda la posibilidad de elaborar un producto químico mediante procesos y equipos sencillos. Orientada especialmente a los recursos de un país no-industrializado, la Planta Piloto no cuenta con una alta y sofisticada tecnología, sino con equipos y un procedimientos tan simples, que aun personal no calificado puede manejarlos.

La construcción de la maquinaria y el manejo de la planta necesitan mucha mano de obra. Esto es importante, ya que permitiría crear puestos de trabajo especialmente en zonas rurales.

El carbón activado obtenido por la Planta Piloto tiene aproximadamente 70-80% de la calidad del carbón comercial, la misma que es suficiente para muchas aplicaciones. El carbón activado granulado sirve bien para todos los tipos de filtros. El carbón de la Planta Piloto se usa con mucha satisfacción

- en filtros de mascarillas
- en filtros de aire comprimido para equipos de buzo
- en filtros para refrigeradoras
- en filtros de campanas para la cocina
- en filtros de agua para laboratorios de camarón
- en filtros de acuarios
- en filtros de agua potable

Una aplicación muy sencilla es utilizándolo dentro de la refrigeradora. Elaboramos una funda de tela con aproximadamente 20 g de carbón activado tipo III y colocándola en una refrigeradora, el carbón activado adsorbe todo el mal olor por un lapso de 1-2 meses. Estamos vendiendo estas fundas bajo el nombre de "Refricarb" y esperamos poder introducir este producto al mercado nacional.

Un objetivo a corto plazo es el autofinanciamiento de la Planta Piloto mediante la venta de carbón activado. Tenemos demandas por parte de varias tiendas de acuarios, las cuales necesitan un carbón tipo IV para filtros de acuarios. También esperamos más demanda por parte de los laboratorios de camarones.

Además, el carbón de la Planta Piloto puede servir para otros proyectos de investigación como por ejemplo: purificación de agua.

Pero la meta principal de la Planta Piloto es la divulgación del proceso y de la idea. La ESPOL a nivel nacional y la GTZ a nivel internacional podrían distribuir por medio de informes y exposiciones los principios del funcionamiento, y la misma Planta Piloto podría servir como planta de exposición.

El procedimiento y las construcciones de la Planta Piloto pueden ser aplicados sin problemas a otros países, y por supuesto se podría mejorar los procesos y la calidad del carbón. Quizás mediante una investigación más y con la utilización de reactivos para una activación química se pueda aumentar la calidad del carbón activado y perfeccionar así el procedimiento.

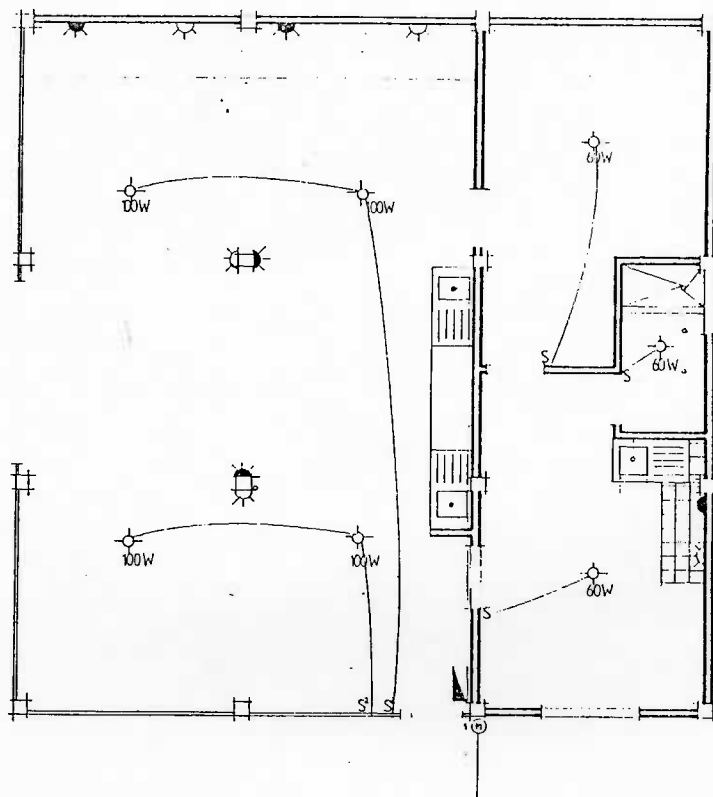
Otro proyecto más sería la elaboración de carbón activado en polvo. Nos dirigimos especialmente a la obtención de un carbón granulado; los procesos de activación y control de calidad para un carbón en polvo todavía nos faltan.

Pero, lamentablemente, necesitamos apoyo externo para la continuación de estas investigaciones, porque la ESPOL no cuenta con los medios necesarios.

7. DETALLES DE LA CONSTRUCCION DE LOS EQUIPOS.

Lista de los dibujos

| pág. | | |
|------|--|-----|
| 1 | Construcción Civil I | 93 |
| 2 | Construcción Civil II | 94 |
| 3 | Horno de carbonización Detalle del condensador | 95 |
| 4 | Detalles del tanque de carbonización | 96 |
| 5 | Vista general del molino | 97 |
| 6 | Corte transversal del molino | 98 |
| 7 | Detalles de las tolvas del molino | 99 |
| 8 | Detalles de rodillos y tren de calibración del molino | 100 |
| 9 | Vista general de los tamices | 101 |
| 10 | Corte transversal de los tamices | 102 |
| 11 | Detalles de estructura y platos de los tamices | 103 |
| 12 | Detalles del grupo # 1 de mallas de los tamices | 104 |
| 13 | Detalles del grupo # 2 de mallas de los tamices | 105 |
| 14 | Detalles del grupo # 3 de mallas de los tamices | 106 |
| 15 | Hornos de activación: Corte transversal | 107 |



● INSTALACIONES

SIMBOLOGIA

INSTALACIONES ELECTRICAS

S INTERRUPTOR SIMPLE

S² INTERRUPTOR DOBLE

⚡ TOMACORRIENTE DE 220V

⚡ TOMACORRIENTE DE 110V

⚡ BREAKER

⊙ FOCO

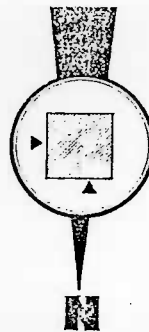
⊙ MEDIDOR

INSTALACIONES AA PP

◊ ACOMETIDA DE AAPP

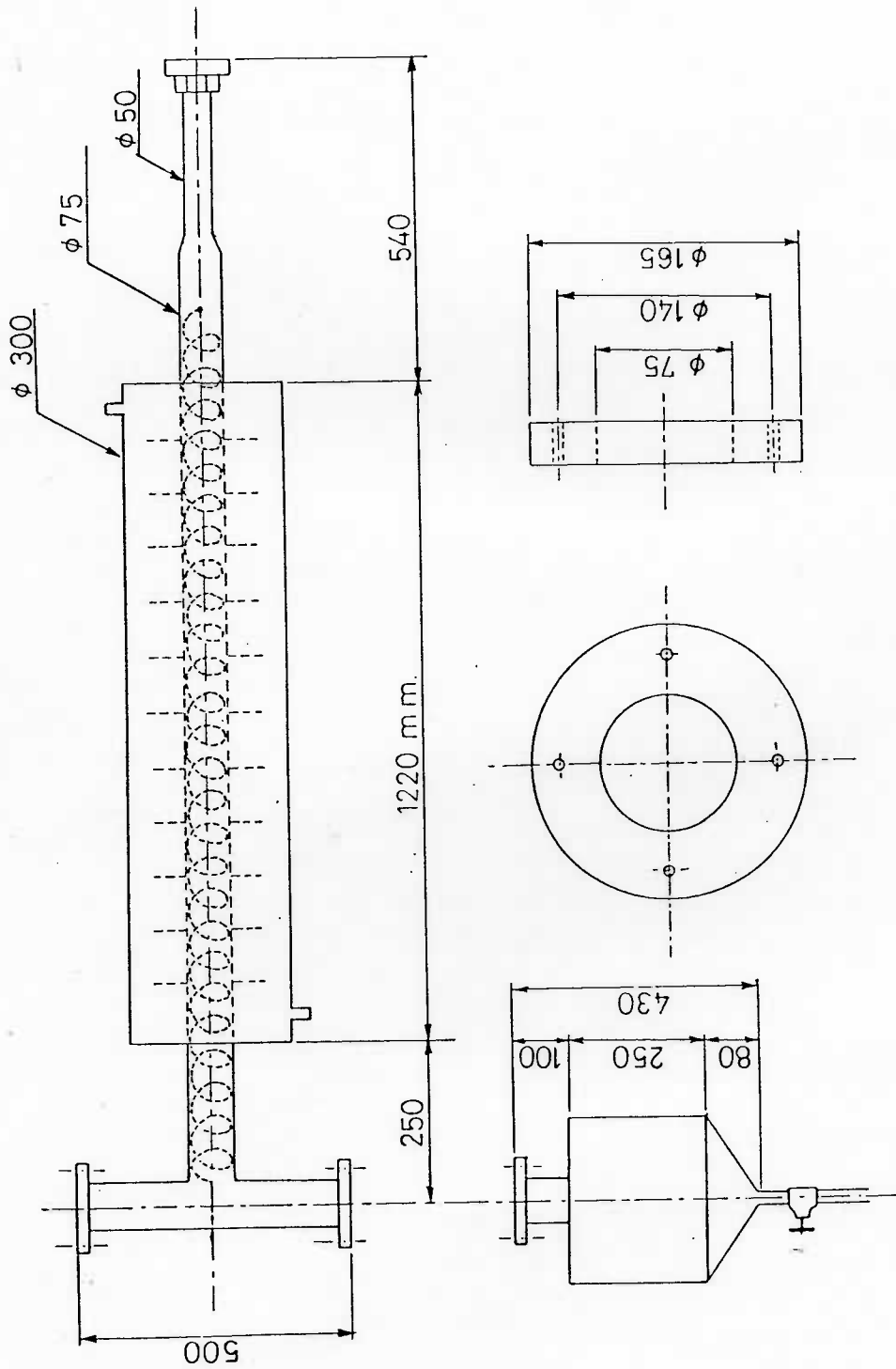
◊ TUBERIA DE AA PP

◊ GRIFO

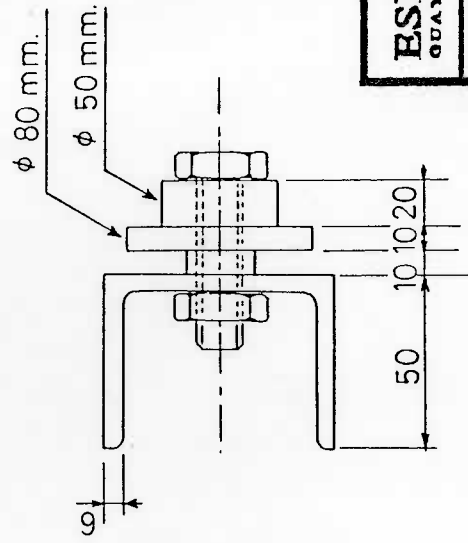
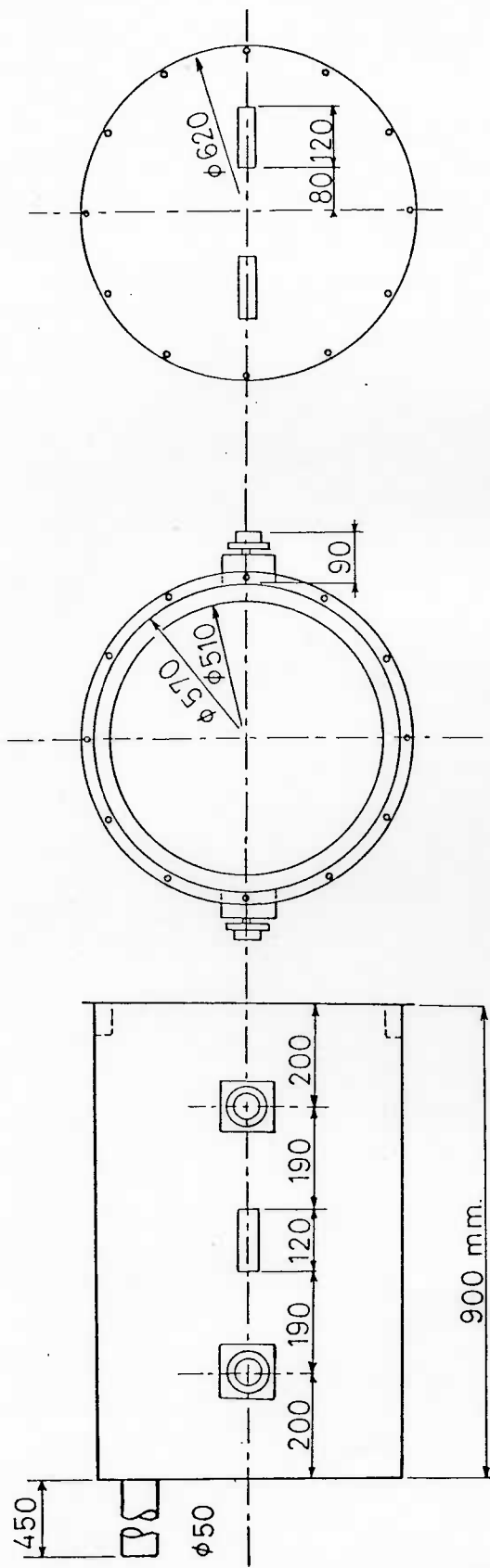


| | | |
|--------------|---|-----------------|
| PROYECTO | PLANTA PILOTO DE CARBON ACTIVADO | |
| DISEÑO | Victor. F. Guadalupe. G | Mayo -5 de 1988 |
| PROPIETARIO: | _____ | Escala: 1:50 |
| | | L:1 |

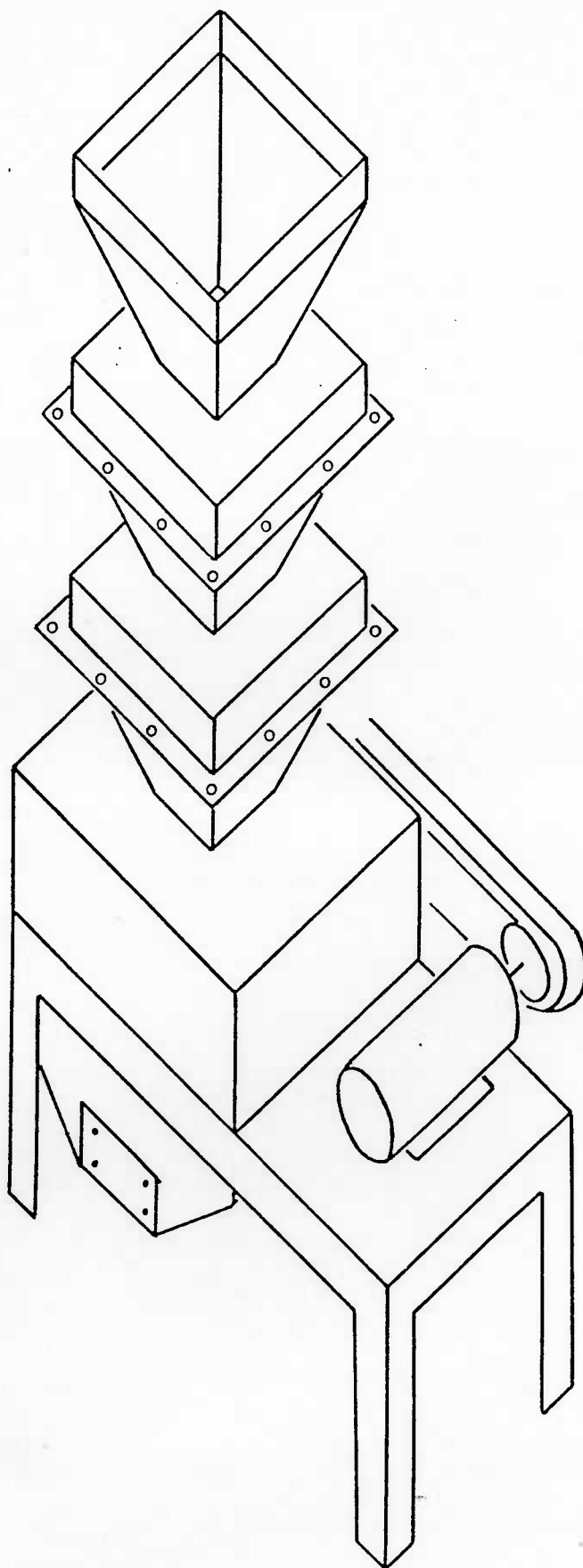
DIBUJO #1: CONSTRUCCION CIVIL I



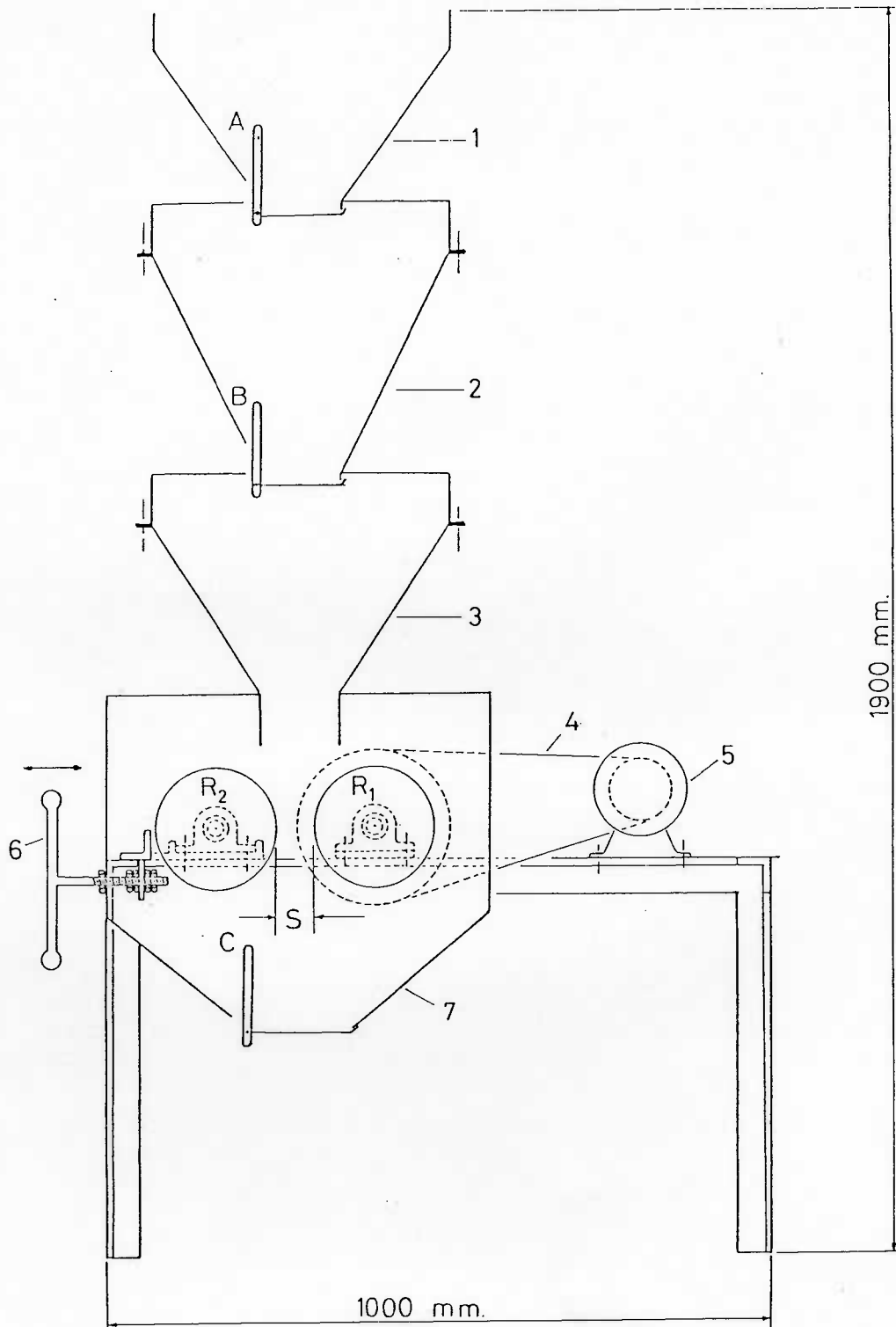
| | | | |
|---|--------------------------------|--|------------------------------------|
| ESPOL QUAYTAQUIL | PLANTA PILOTO | | DISEÑO y DIBUJO Alfonso Aguirre |
| | CARBON ACTIVADO | | APROBADO Ing. Richard Leberer |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUÍMICAS | HORNO DE CARBONIZACION | | FECHA 30 de mayo '88 |
| | DETALLE DEL CONDENSADOR | | Nº. 3 |



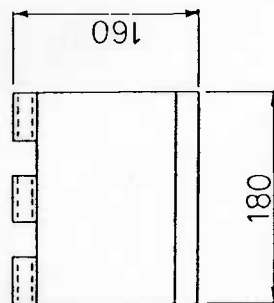
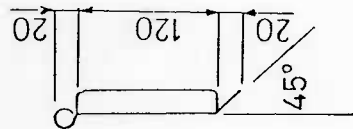
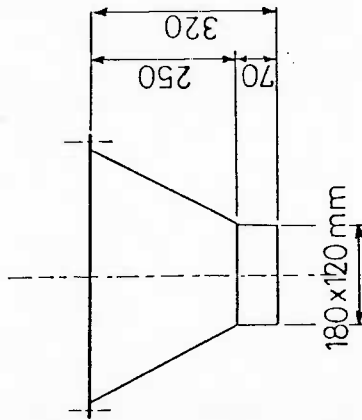
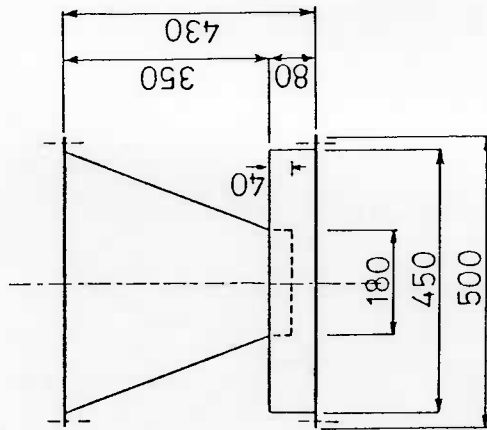
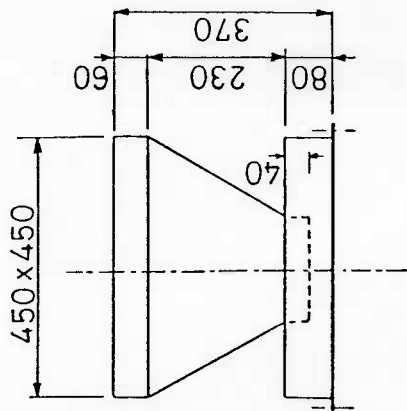
| | | | |
|---|--|-----------------------|-----------------------|
| ESPOL QUAYAGUIL | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISENYO Y DIBUJO | APROBADO |
| | | ING. EUGENIO LABRADOR | ING. EUGENIO LABRADOR |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | HORNO DE CARBONIZACION DETALLE DEL TANQUE DE CARBONIZACION | FUENTA | FECHA |
| | | | 30 de mayo '23 |
| | | No. | 4 |



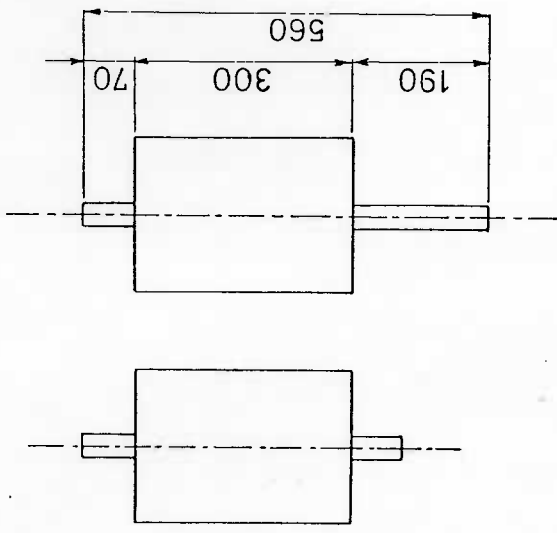
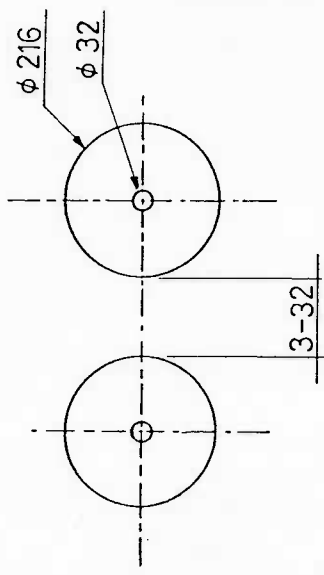
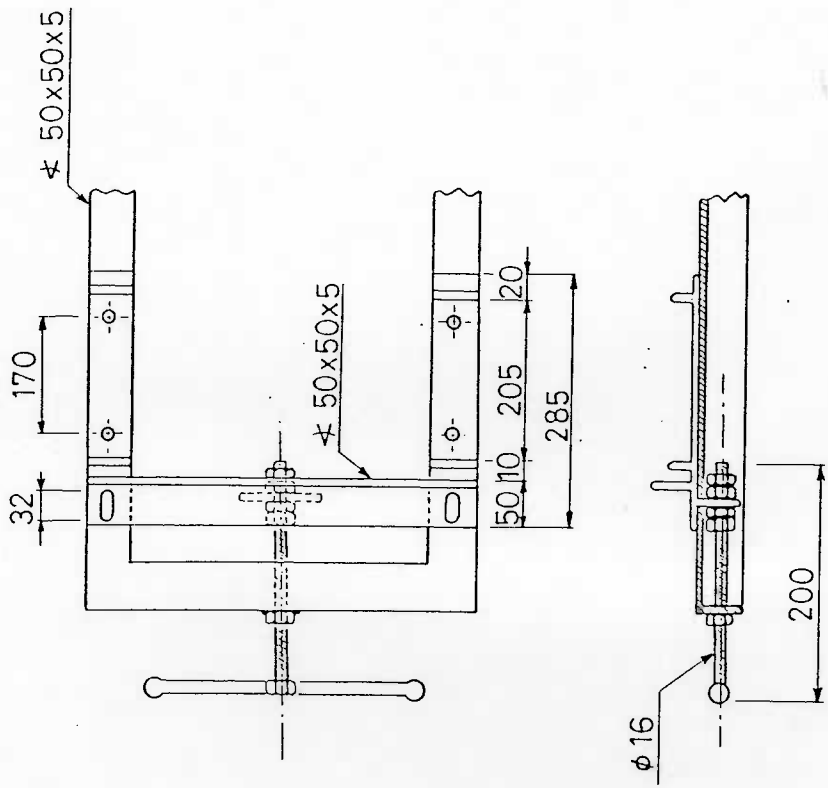
| | | |
|---|---|---|
| ESPOL GUAYAQUIL | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISEÑO y DIBUJO Anselmo Aguirre APROBADO Ing. Richard Lehaer |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | VISTA GENERAL DEL MOLINO | FECHA 15 de Junio '88 No. 5 |



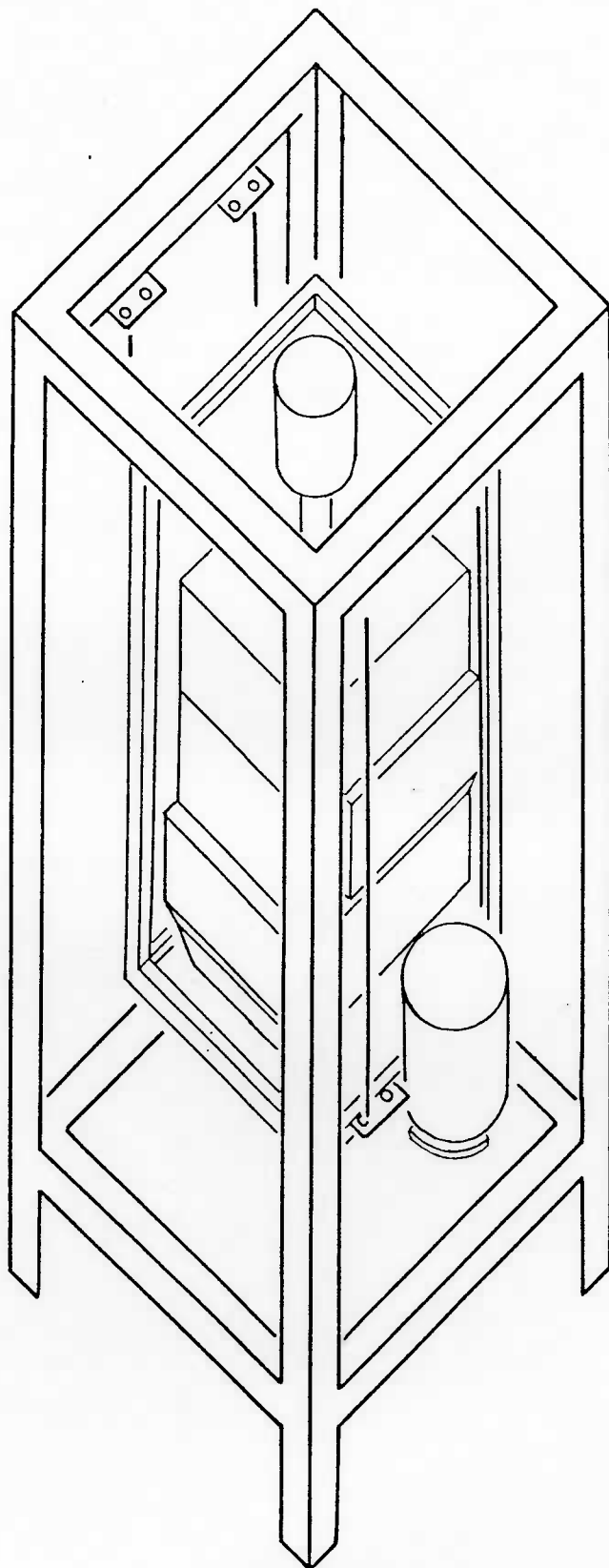
| | | |
|---|--|------------------------------------|
| ESPOL GUAYAQUIL | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISEÑO y DIBUJO Antonio Aguirre |
| | | APROBADO Ing. Richard Lehner |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | CORTE TRANSVERSAL DEL MOLINO | FECHA 15 de junio '88 |
| | | No. 6 |



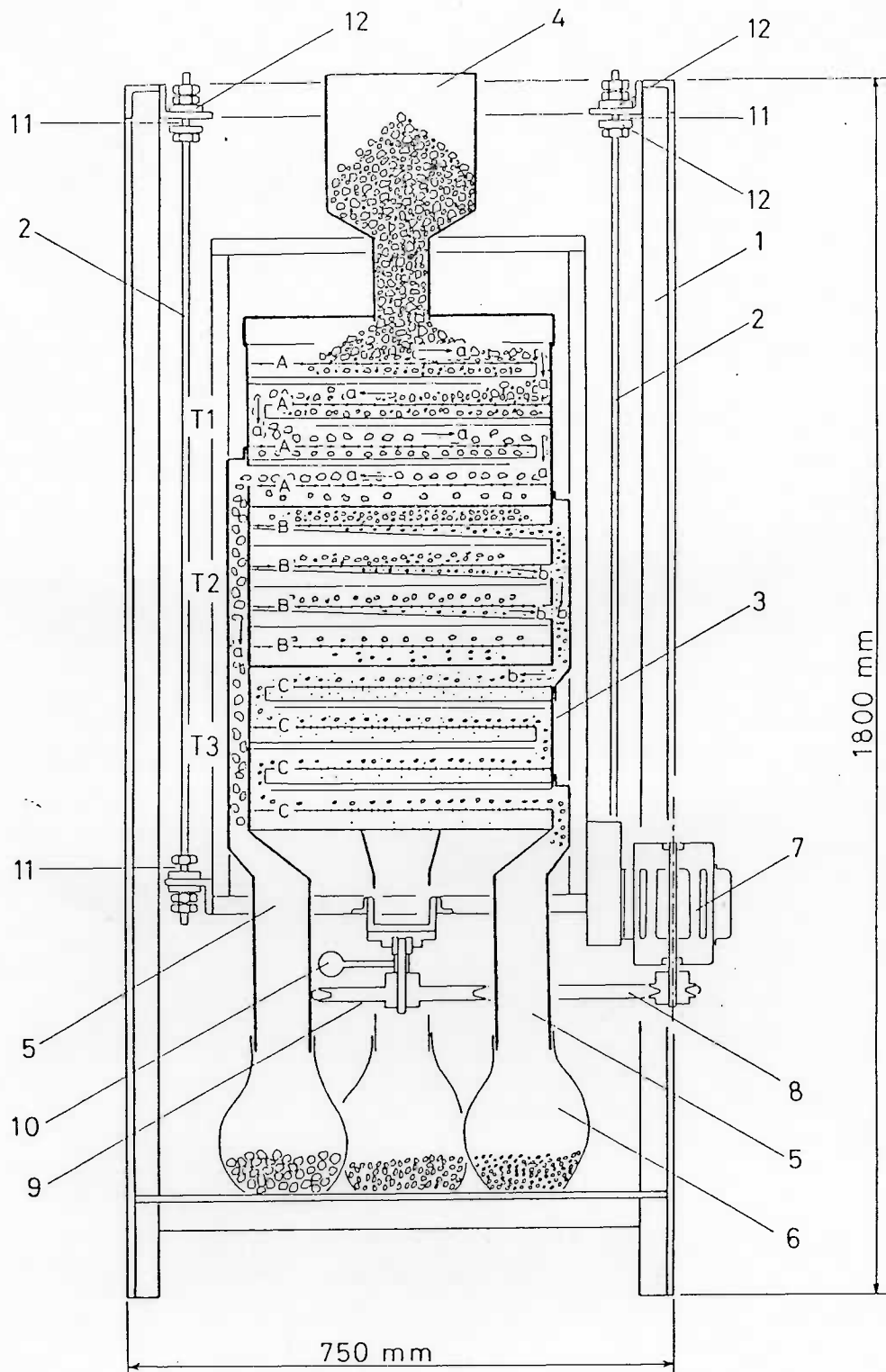
| | |
|---|------------------------------------|
| ESPOL GUAYAGUIL | DISEÑO Y DIBUJO Armando Aguirre |
| | APROBADO Ing. Richard Lohrner |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | FECHA 15 de Julio '86 No. 7 |
| PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | |
| DETALLES DE LAS TOLVAS DEL MOLINO | |



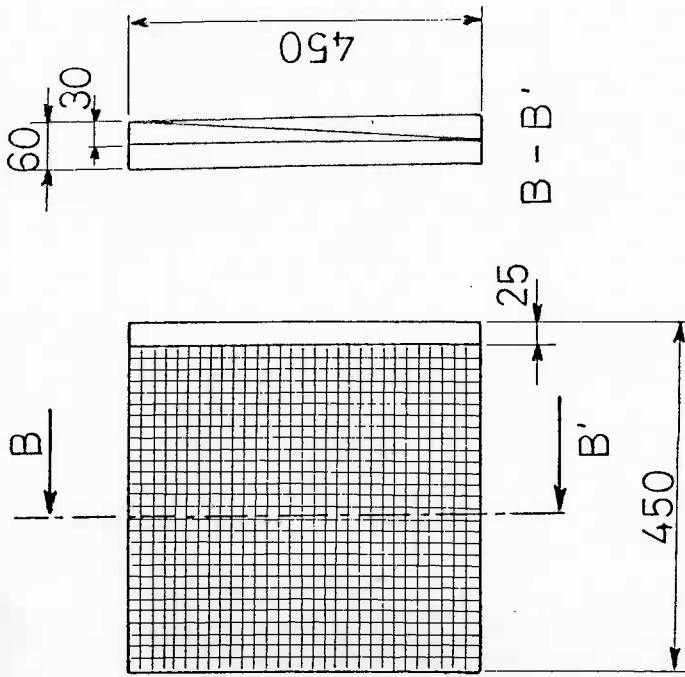
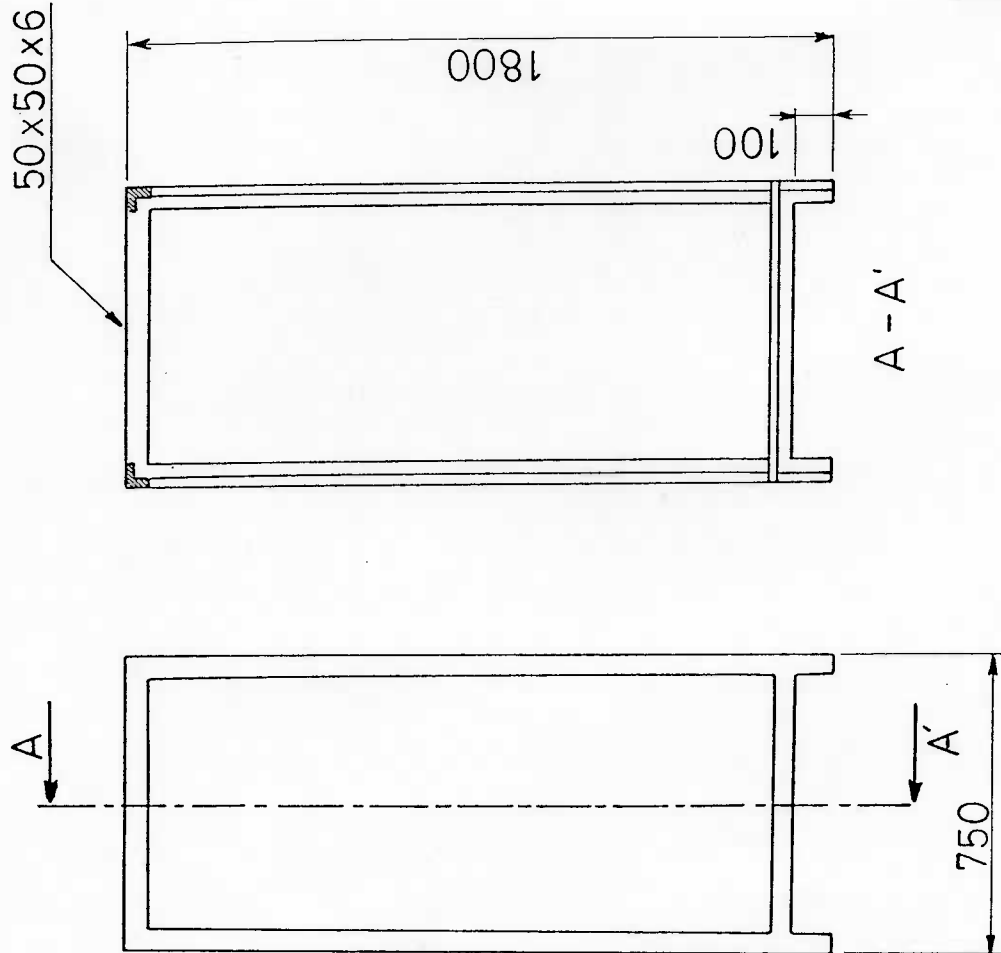
| | | |
|--|--|---|
| ESPOL GUAYAQUIL | DISEÑO Y DISEÑO América A. Guerra | DISEÑO Y DISEÑO América A. Guerra |
| | AFICIBADO Ing. Richard Lebar | AFICIBADO Ing. Richard Lebar |
| INSTITUTO de Ciencias QUIMICAS | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | |
| | DETALLES DE RODILLOS Y TREN DE CALIBRACION DEL MOLINO | |
| | FECHA 15 de Julio '88 | No. 8 |



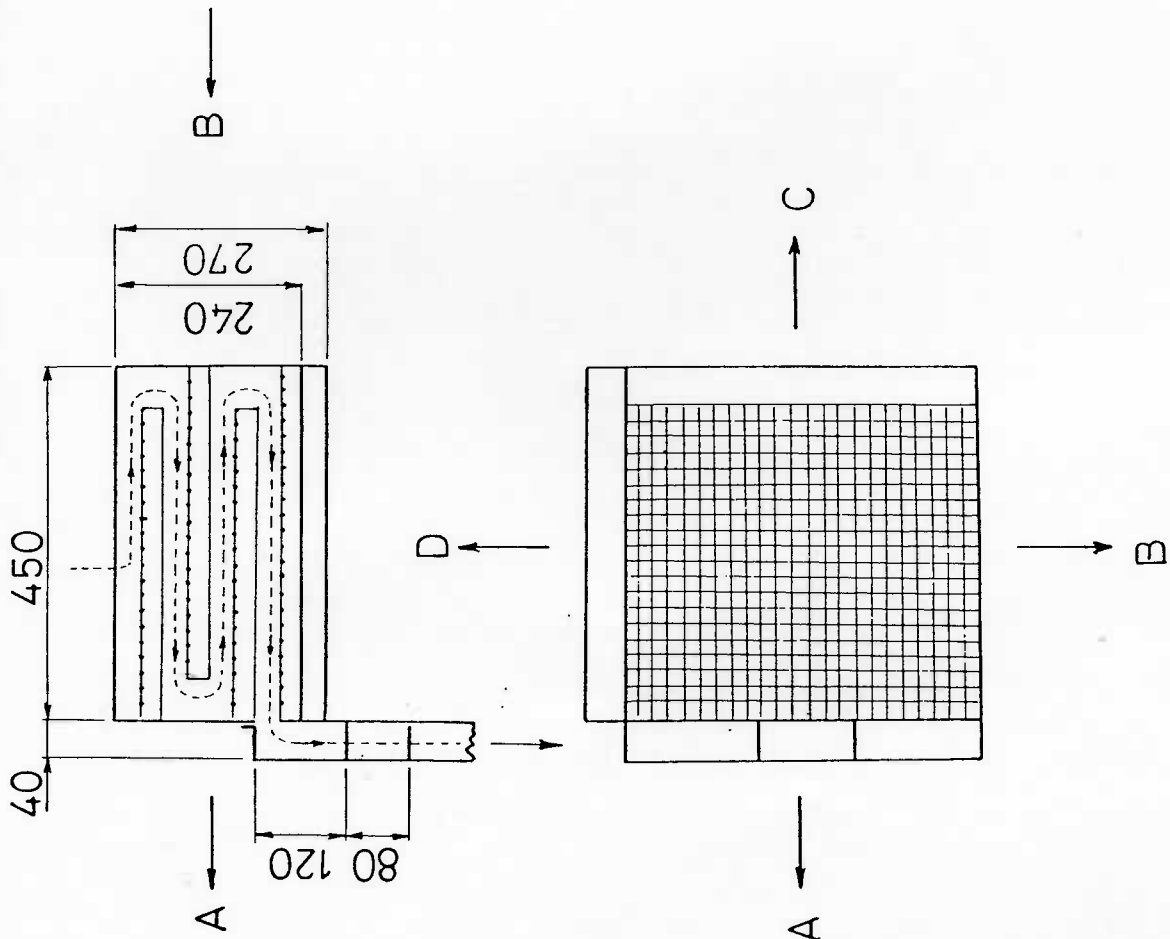
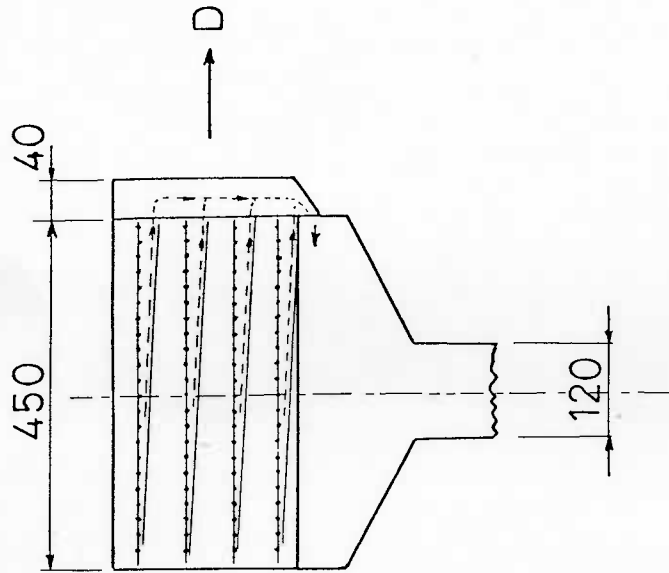
| | | |
|---|---|-----------------------------------|
| ESPOL GUAYAQUIL | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISEÑO y DIBUJO Alfredo Aguero |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | | APROBADO Ing. Richard Lehner |
| VISTA GENERAL DE LOS TAMICES | | FECHA 30 de junio '88 |
| | | No. 9 |



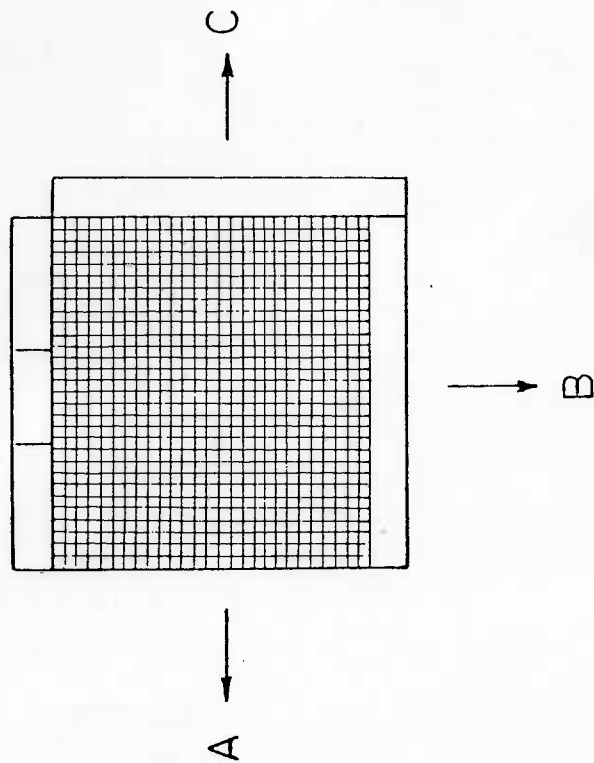
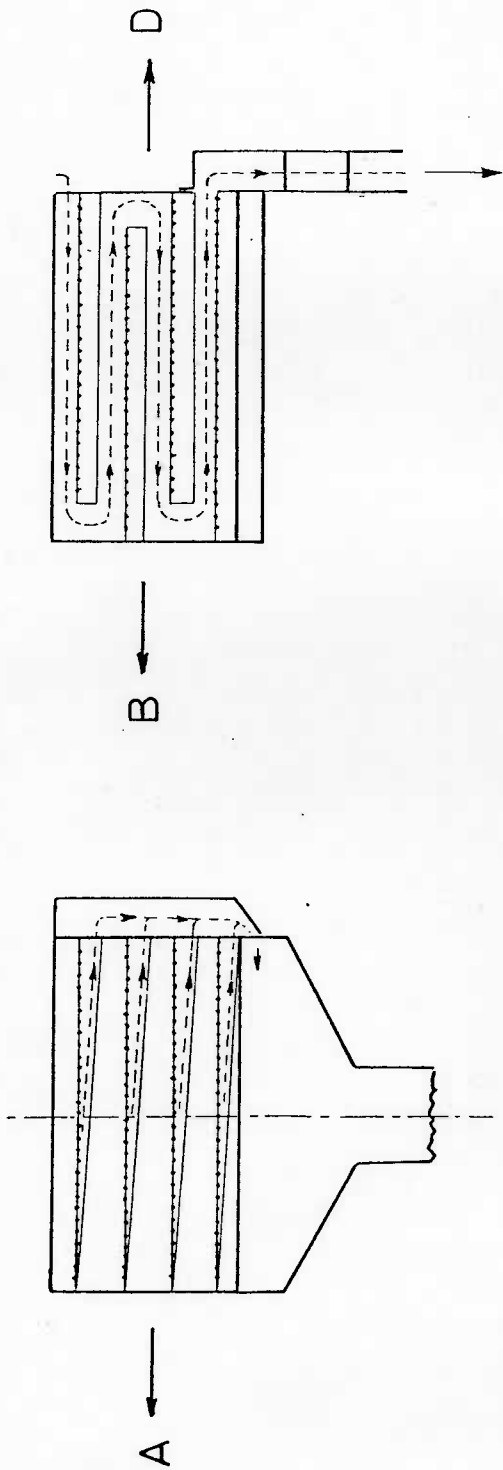
| | | |
|---|--|------------------------------------|
| ESPOL GUAYAQUIL | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISEÑO y DIBUJO Armando Aguirre |
| | | APROBADO Ing. Richard Lehner |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUÍMICAS | CORTE TRANSVERSAL DE LOS TAMICES | FECHA 30 de junio '88 |
| | | No. 10 |



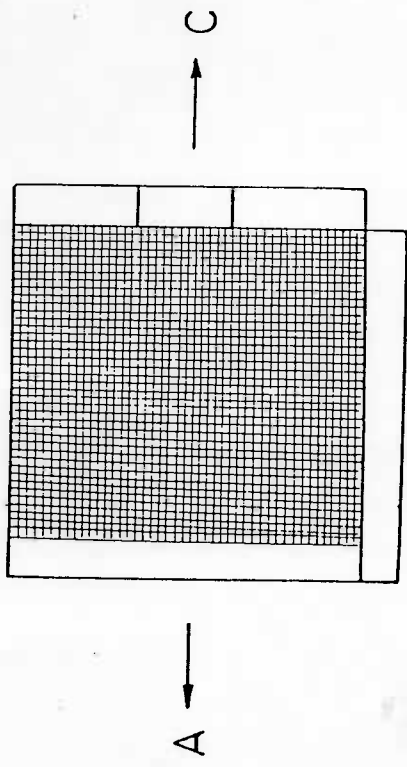
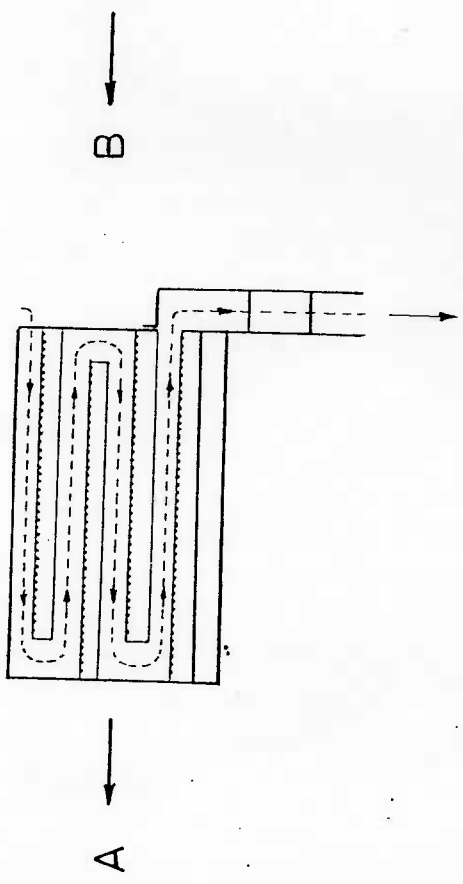
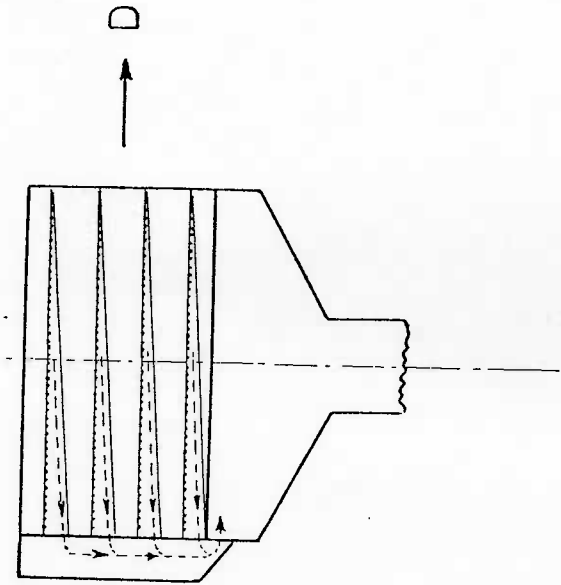
| | | |
|---|--|------------------------------------|
| ESPOL QUAYTAQUIL INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISEÑO Y DIBUJO Armando Aguirre |
| | DETALLE DE ESTRUCTURA Y PLATOS DE LOS TAMICES | APROBADO Ing. Richard Lohner |
| | | FECHA 30 de Julio '88 |
| | | No. 11 |



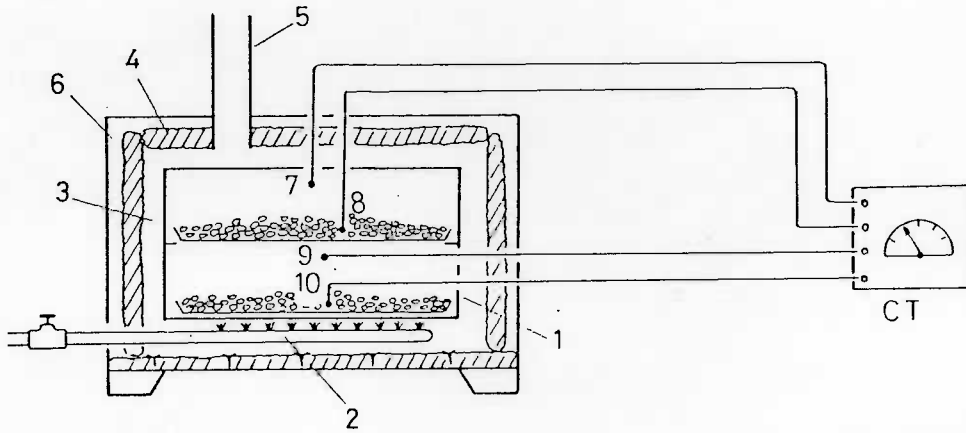
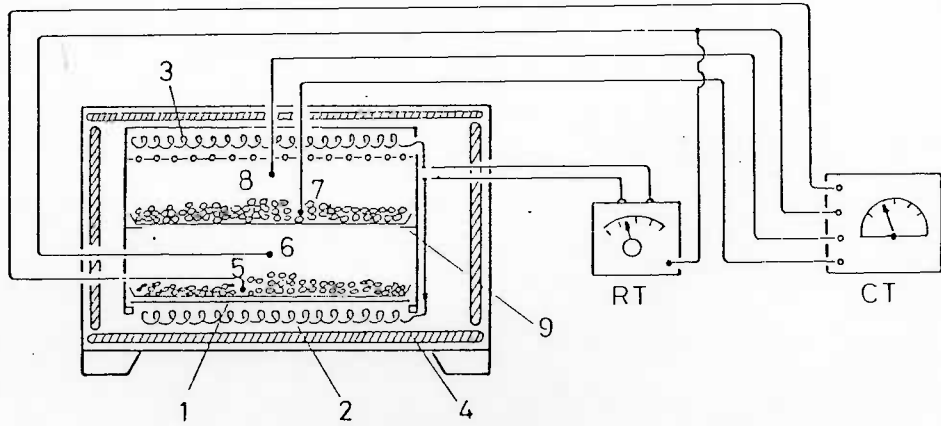
| | | |
|--|--|---------------------------------------|
| ESPOL GUAYAQUIL INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISEÑO Y DIBUJO Aprobado A. Amador |
| | DETALLES DEL GRUPO # 1 DE MALLAS DE LOS TAMICES | APROBADO Ing. Richard Labbe |
| | | FECHA 30 de Julio '88 |
| | | No. 12 |



| | | |
|---|--|---------------------------------------|
| ESPOL GUAYAMAQUIL | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISEÑO Y DIBUJO Aprobado A. Castro |
| | | APROBADO Ing. Richard Lehnner |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | DETALLES DEL GRUPO # 2 DE MALLAS DE LOS TAMICES | FECHA 30 de Julio '68 |
| | | No. 13 |



| | | | |
|--|--|--------------------------|----------------------------------|
| ESPOL QUAYAQUIL INSTITUTO de CIENCIAS QUIMICAS | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | | DISEÑO Y DIBUJO Amador Amador |
| | DETALLES DEL GRUPO # 3 DE MALLAS DE LOS TAMICES | | APROBADO Ing. Richard Labor |
| | | FECHA 30 de Julio '88 | No. 14 |



| | | |
|---|--|-----------------------------------|
| ESPOL QUAYAQUIL | PLANTA PILOTO CARBON ACTIVADO | DISEÑO y DIBUJO Azceno Aguirre |
| | | APROBADO Ing. Richard Lehner |
| INSTITUTO de CIENCIAS QUÍMICAS | HORNO DE ACTIVACION CORTE TRANSVERSAL | FECHA 30 de junio '88 |
| | | No. 15 |

8. BIBLIOGRAFIA

- ADAMSON, A.W.:
Chemistry of Surfaces. New York 1960
- ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS):
Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia 1973
- BIO ENERGY: Bau und Entwurf einer Versuchs- und Demonstrationsanlage zur
Produktion von Aktivkohle. Isen (Alemania Federal). 1988.
- BOYK, S., HASS, H.B.:
Active Carbon from chemistry coal
en: Industrial and Engineering chemistry
Julio 1946, p. 745-748
- CALGON CARBON CORP.:
TYP PCB Granular Carbon. Pittsburgh 1987
- CHANEY, N.K.:
Trans. Electrochem. Soc. 36, pag.91 (1919)
- GOULD, R.F. (Editor):
Surfaces and the Gas-Solid Interface. Washington 1961
- GUERASIMOV, YA. :
Curso de Química Física. Moscú 1971
- HASSLER, I.W.:
Activated Carbon. New York 1963
- HASSLER, I.W.:
Purification with Activated Carbon. New York 1974
- HORMATS, S.:
German Process for Manufacturing Activated charcoal
en: Chemical and Metallurgical Engineering.
Junio 1946, p. 110-114
- HUNGARIAN CENTRAL TECHNICAL LIBRARY AND DOCUMENTACION
CENTER:
Manufacture of Activated Carbon, pag. 17. Budapest 1987
- KAUPP, A./GOSS I.R.:
Small Scale Gas Producer-Engine Systems. Braunschweig 1984
- LAURICIO, F.M.:
Technology manual on rice-husk ash cements. Filipinas 1987
- LEHNER, R.:
Carbón Activado a partir de cascarillas de arroz. Guayaquil 1987

MERCK DARMSTADT :

Prüfungsvorschrift für Aktivkohle. Darmstadt 1986

MONTAÑO/GUTIERREZ/PATIÑO/VALENCIA:

Proyecto de Fabricación de Carbón Activado: Estudio de prefactibilidad. Guayaquil 1987

MORGAN, L, Fink, C.E:

Binders and Base Materials for Active Carbon en: Industrial and Engineering Chemistry.

MORRISON,R.:

The Chemical Physics of Surfaces, New York 1977

PAULSSEN, M.:

Identification of Active Charcoals and wood charcoals. Trondheim 1964

PONEC,V./KNOR,Z./CERNY,S.:

Adsorption on solids. London 1974

SEAN:

Sistema Estadístico Agropecuario Nacional del INEC: Producción agrícola en el Ecuador. Quito 1989

SMISEK, M/CERNY, S.:

Active carbon. New York 1970.

WALKER, Ph.L.:

Chemistry and physics of carbon. New York 1966

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Lista de las figuras:

| | pág. |
|--|------|
| Figura # 1 Proceso de laboratorio para obtener carbón activado | 20 |
| Figura # 2 Esquema de la Planta Piloto para la producción de carbón activado | 27 |
| Figura # 3 La Planta Piloto y la ubicación de los equipos | 28 |
| Figura # 4 La máquina briquetadora | 30 |
| Figura # 5 Arrastre y extrusión en la briquetadora | 30 |
| Figura # 6 Horno de carbonización | 33 |
| Figura # 7 Interior del horno de carbonización | 34 |
| Figura # 8 Sistema de combustión del horno de carbonización | 35 |
| Figura # 9 Triturador de 2 rodillos | 40 |
| Figura # 10 Los Tamices | 43 |
| Figura # 11 Flujo del material dentro de los tamices | 45 |
| Figura # 12 Horno de activación eléctrico | 48 |
| Figura # 13 Horno de activación a gas | 49 |

Lista de las tablas:

| | |
|--|---|
| Tabla # 1 Consumo de Carbón Activado en el Ecuador en el año 1986 | 6 |
| Tabla # 2 Importaciones de Carbón Activado al Ecuador | 7 |
| Tabla # 3 Producción de arroz y cascarillas de arroz en el Ecuador | 8 |
| Tabla # 4 Composición química de cascarillas de arroz | 9 |
| Tabla # 5 Composición química de las cenizas de cascarillas de arroz | 9 |

| | pág. |
|-------------|--|
| Tabla # 6 | Análisis químico de materia orgánica 14 |
| Tabla # 7 | Productos formados durante la pirólisis de cascarillas de arroz 16 |
| Tabla # 8a | Comparación de la adsorción de carbón activado a partir de cascarillas de arroz (I parte) 22 |
| Tabla # 8b | Comparación de la adsorción de carbón activado a partir de cascarillas de arroz (II parte) 23 |
| Tabla # 9 | Curva standard de absorción de anaranjado de metilo 54 |
| Tabla # 10 | Adsorción de anaranjado de metilo con variación de la cantidad de carbón activado 54 |
| Tabla # 11a | Adsorción de anaranjado de metilo con variación del tiempo de contacto con carbón activado (1-12 min) 55 |
| Tabla # 11b | Adsorción de anaranjado de metilo con variación del tiempo de contacto con carbón activado (1-60 min) 55 |
| Tabla # 12 | Datos de la briquetación de diferentes materias primas 61 |
| Tabla # 13 | Carbonización: Desarrollo de la temperatura del material dentro del tanque 63 |
| Tabla # 14 | Carbonización con gas como combustible 64 |
| Tabla # 15 | Carbonización con leña como combustible 64 |
| Tabla # 16 | Calidad de Carbón Activado en relación a las condiciones de la carbonización 66 |
| Tabla # 17 | Carbonización de diferentes materias primas (I parte) 67 |
| Tabla # 18 | Carbonización de diferentes materias primas (II parte) 67 |
| Tabla # 19 | Datos de la carbonización de diferentes materias primas 68 |
| Tabla # 20 | Variación del gas pobre durante la carbonización. 69 |
| Tabla # 21 | Tiempo para realizar la trituración de 50 kg de briquetas de carbón 70 |
| Tabla # 22 | Fracciones de carbón obtenidas por la clasificación 71 |
| Tabla # 23 | Desarrollo de la temperatura durante la activación del horno eléctrico 73 |

| | pág. |
|------------|---|
| Tabla # 24 | Desarrollo de la temperatura durante la activación en el horno a gas 73 |
| Tabla # 25 | Pérdida de peso en la activación 74 |
| Tabla # 26 | Diferentes condiciones de activación y su efecto en la calidad de carbón 75 |
| Tabla # 27 | Calidad del carbón activado: Comparación de carbones de diferentes materias primas 76 |
| Tabla # 28 | Desarrollo de la adsorción por carbón activado en 130 horas de contacto con el medio 78 |
| Tabla # 29 | Adsorción máxima de diferentes tipos de carbón activado 78 |
| Tabla # 30 | Especificaciones de diferentes tipos de carbón activado 79 |
| Tabla # 31 | Análisis químico del carbón activado 80 |

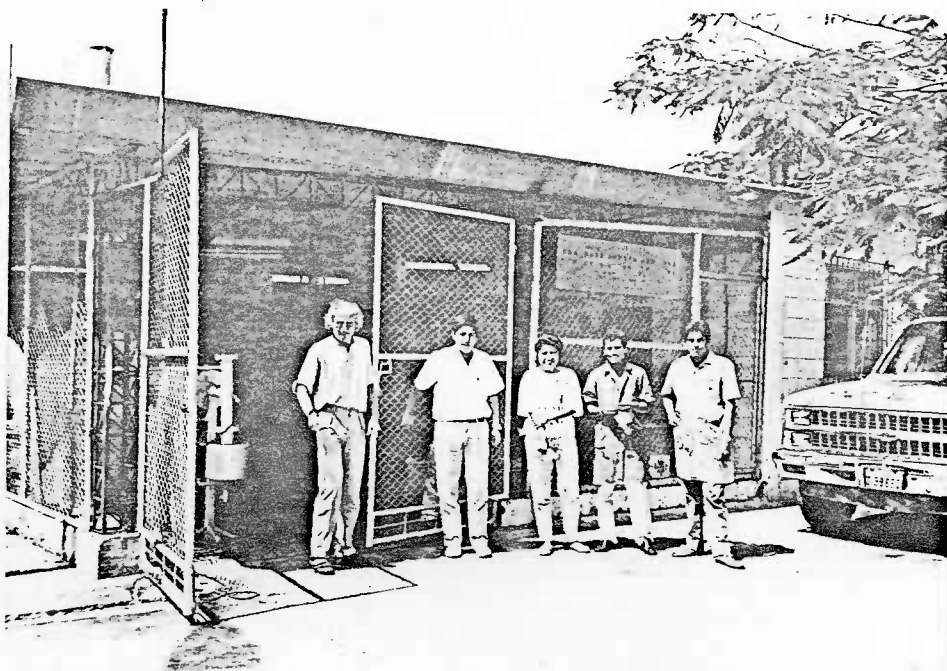


FOTO # 1: La Planta Piloto para Carbón Activado y una parte del personal.

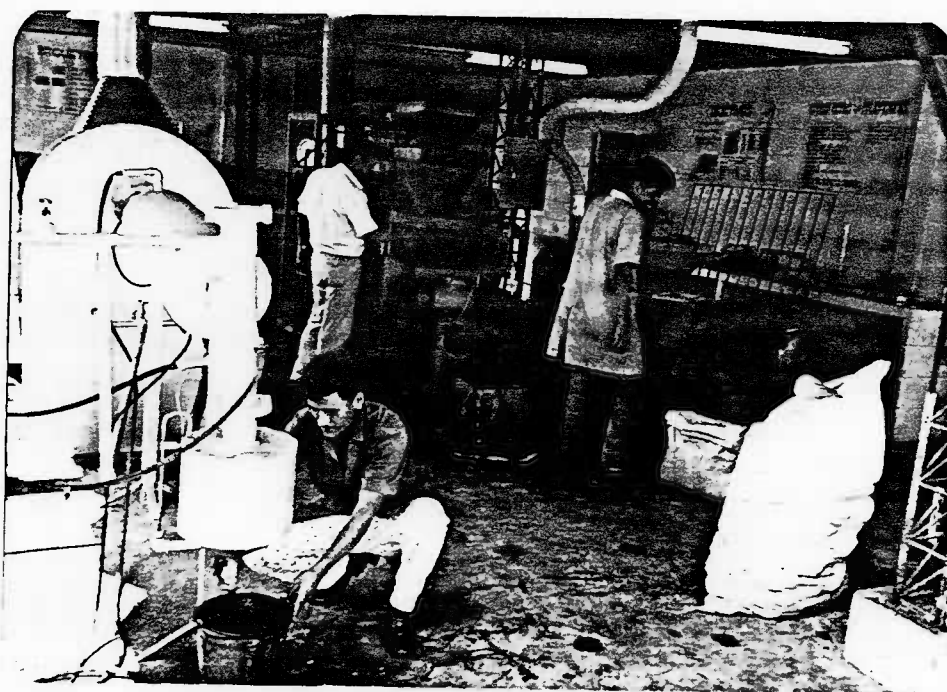


FOTO # 2: Vista del interior de la Planta Piloto



FOTO # 3: Cascarillas de arroz significan un gran problema ambiental



FOTO # 3: La incineración de las cascarillas de arroz contamina el medio ambiente por los gases desprendidos y por las cenizas



FOTO # 5: La maquina briquetadora

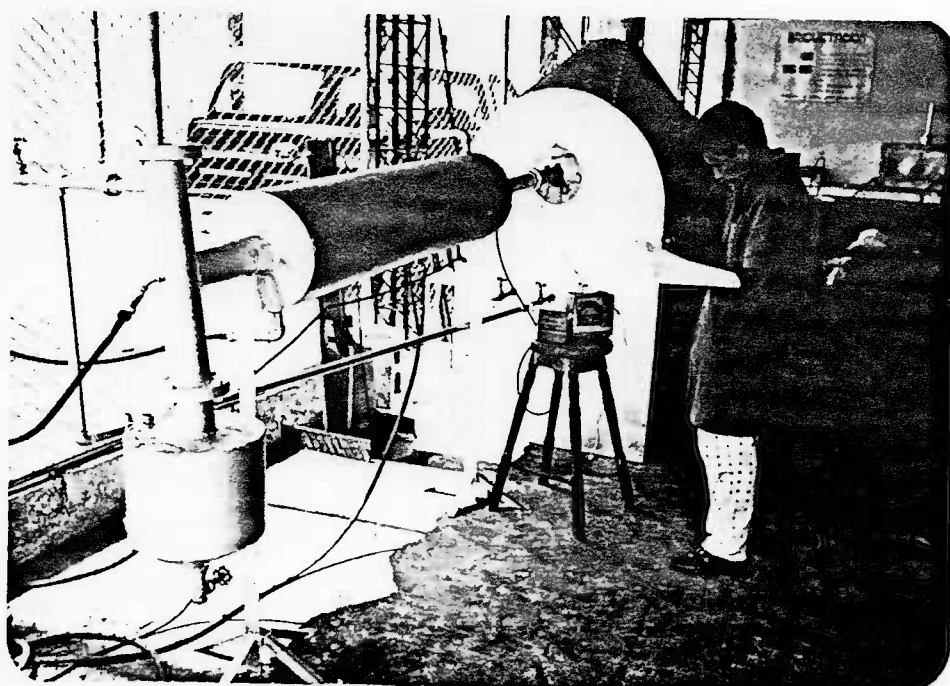


FOTO # 6: El horno de carbonización con la parte de condensación y recirculación de los gases

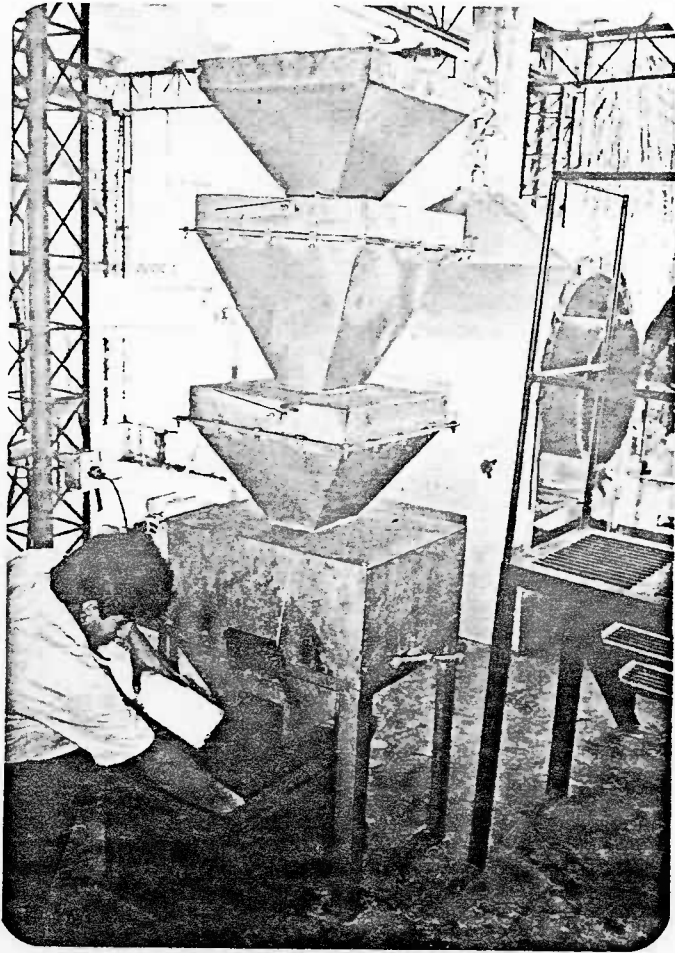


FOTO #7: El molino

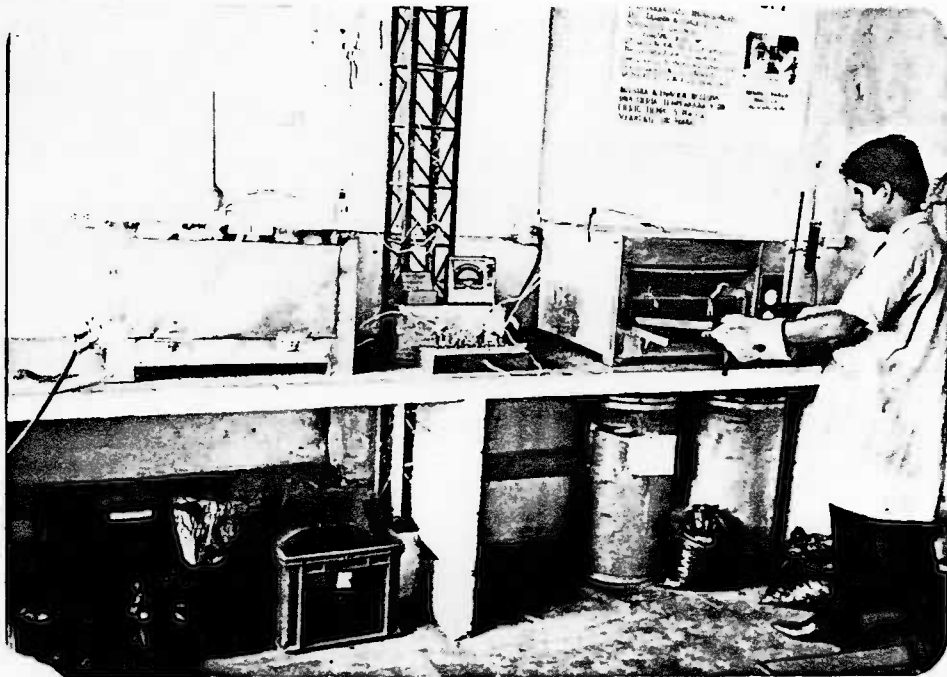


FOTO #8: Los hornos de activación con el control de la temperatura



FOTO # 9: Los tamices

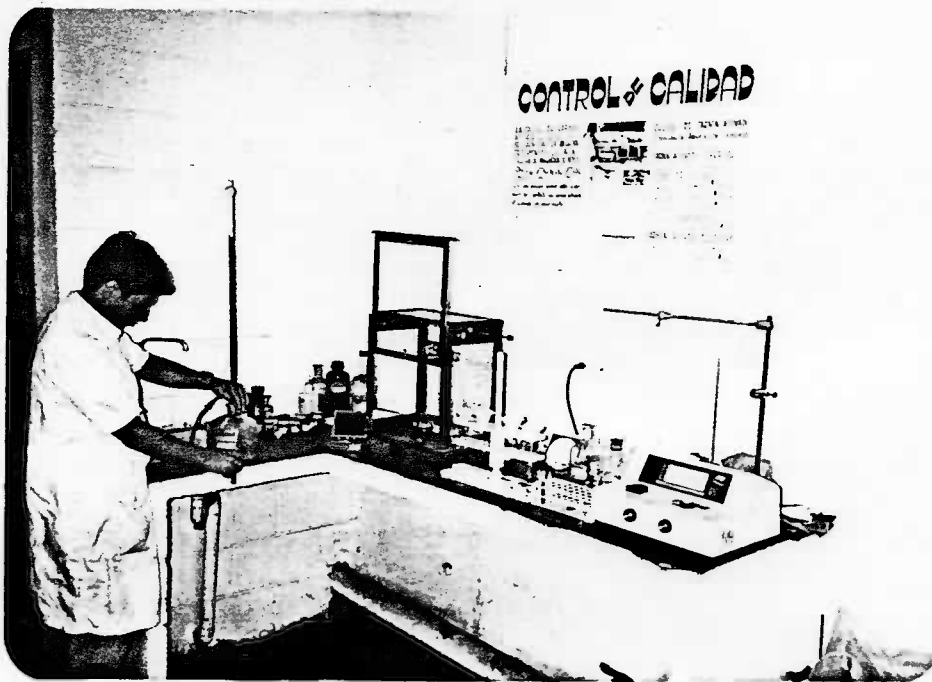


FOTO # 10: El pequeño laboratorio para el control de calidad del carbón activado