662.15
JOH

ESPOL
CIB
D-19374

Escuela Superior Politécnica del Litoral

FACULTAD DE INGENIERIA EN MECANICA

"Analisis Termico de un Horno Para Producir Carbon"

PROYECTO DE GRADO

ESPOL
BIBLIOTECA CENTRAL

Previa a la Obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

JIMMY CHRISTOPHER JOHNSON RODRIGUEZ

Guayaquil - Ecuador

Año - 1990

A G H A D E C I M I E N T O

AL DR. ALFREDO BARRIGA RIVERA DIRECTOR DEL TOPICO, POR SU INVALORABLE AYUDA COMO MAES - TRO Y AMIGO EN LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

AL ING. JORGE DUQUÉ POR SU - AYUDA BRINDADA.

AL ING. MARIO PATIÑO POR SU COLABORACION PRESTADA.

D E D I C A T O H I A

- A DIOS
- A LA MEMORIA DE MI PADRE
- A MI ESPOSA
- A MIS HIJOS
- A MI MADRE
- A MIS HERMANOS
- A MIS ABUELOS
- A MIS PADRES POLITICOS

TRIBUNAL DE GRADUACION

DR. ALFREDO BARRIGA R.
DELEGADO DEL DECANO FIM

DR. ALFREDO BARRIGA R.
DIRECTOR PROYECTO DE GRADO

ING. JORGE DUQUE RIVERA
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

ING. FRANCISCO ANDRADE S.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLAHACION EXF'HESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doc
expuestos en este Proyecto de Grado, me corres
exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mi
la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL ."

(Reglamento de Tópico de Graduación)

JIMMY C. JOHNSON RODRIGUEZ

R E S U M E N

En este trabajo se intenta realizar un análisis térmico de la retorta pirolítica, localizada en el centro experimental de tecnología energética (CETE), de la ESPOL, para producción de carbón vegetal, a partir de la pirolización de la madera.

Esto se lo hizo tratando de seguir la secuencia de cambio de algunos parámetros que intervienen en dicho proceso, básicamente se intentará seguir la variación de la conductividad térmica de la madera durante el proceso de pirolización, así como también la variación de la densidad y el coeficiente convectivo durante el mismo proceso.

También se tratará, a partir de una prueba experimental del equipo, sin recirculación de volátiles, predecir teóricamente el incremento que sufriría la eficiencia del sistema si se recircularan los gases producto de la pirolización de la madera o volátiles, a través de un quemador y se lo utilizara como fuente externa de energía, determinando así un autoabastecimiento de la energía que requeriría el sistema para poder completar el proceso de pirolización.

INDICE GENERAL

PAGS.

RESUMEN

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE GRAFICOS

INDICE DE TABLAS

INTRODUCCION

CAPITULO I

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. OBJETIVO

1.2. ALCANCE

1.3. JUSTIFICACION

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1. SITUACION DEL CARBON EN EL ECUADOR

2.2. ECONOMIA Y EFICIENCIA DEL CARBON

2.3. VENTAJAS DEL CARBON

2.4. CARBONIZACION

2.5. ETAPAS DE LA CARBONIZACION

2.6. FASES DE LA CARBONIZACION

2.7. ZONAS PRODUCIDAS DURANTE EL PROCESO DE CARBONIZACION

2.8. TRANSFORMACION DE LA MADERA A DIFERENTES TEMPERATURAS DURANTE LA CARBONIZACION.

2.9. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LOS PRODUCTOS DE LA CARBONIZACION.

CAPITULO III

EQUIPOS PARA CARBONIZAR MADERA

3.1. EQUIPOS CON FUENTE INTERNA DE CALOR

3.2. EQUIPOS CON FUENTE EXTERNA DE CALOR

3.3. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LA RETORTA PIROLITICA DE LA E.S.P.O.L.

3.4. OPERACION DE LA RETORTA PIROLITICA

CAPITULO IV

ANALISIS TERMICO DEL SISTEMA (RETORTA PIROLITICA)

4.1. INTRODUCCION AL ANALISIS

4.2. DESCRIPCION DEL ANALISIS

4.3. FORMULAS A UTILIZARSE

4.4. CALCULOS REPRESENTATIVOS

4.5. BALANCE TERMICO DEL SISTEMA

4.6. DESARROLLO DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN LA ENERGIA QUE ENTRA, AL SISTEMA EN LA ECUACION DEL BALANCE.

4.7. DESARROLLO DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN LA ENERGIA QUE SALE, DEL SISTEMA EN LA ECUACION DEL BALANCE.

4.8. PERDIDAS TERMICAS DEL SISTEMA

4.9. CALCULO DE LA ENERGIA MINIMA NECESARIA PARA QUE EL SISTEMA ADQUIERA AUTONOMIA.

4.10 CALCULO TEORICO DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA SIN RECIRCULACION DE VOLATILES.

4.11 CALCULO TEORICO DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA SI SE USARA RECIRCULACION DE LOS VOLATILES.

4.12 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APENDICE

BIBLIOGRAFIA.

INDICE DE FIGURAS

No.		PAGS.
1	COMBUSTION DE LA LENA	
2	DESHIDRATACION DE LA LENA	
3	EXOTERMIA	
4	ENFRIAMIENTO	
5	RETORTA PIROLITICA	
6	COLOCACION DE LAS TERMOCUPLAS EN LOS LENOS	
7	BALANCE TERMICO DEL SISTEMA	

INDICE DE GRAFICOS

No.		PAGS.
1	TEMPERATURA Vs TIEMPO EXPERIMENTAL	a-
2	TEMPERATURA Vs TIEMPO TEORICA	

INDICE DE TABLAS

No.		PAGS.
1	RESULTADOS DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL.	
2	TEMPERATURA TEORICA OBTENIDA.	

I N T R O D U C C I O N

En vista de la sobre explotación del petróleo conforme transcurre el tiempo; dicho recurso natural no renovable esta cada vez reduciendo sus reservas lo que hace preveer que al cabo de unos años el petróleo va a irse extinguiendo; por lo tanto debemos ir desarrollando una fuente energética alterna no dependiente del petróleo centrada en los recursos naturales renovables, como los vegetales; de esta forma encontramos, que el carbón puede suplir en cierto grado la demanda energética que hubiere, siempre y cuando este sea de alto poder calorifico y en cantidades necesarias; para llegar a esto debemos de prepararnos hacia el futuro tratando de implementar hornos eficientemente concebidos para logarar los propósitos antes descritos, dentro del conjunto de dichos hornos se situan a las retortas en las cuales el carbón resultante es "Puro" es decir sin suciedades.

Este carbón puede ser utilizado inclúsive para la operación de motores de combustión interna para lo cual el carbón es previamente gasificado y de esta forma utilizado como combustible en los motores; también el

carbón sirve como combustible doméstico; para la cocción de los alimentos, dejando así una brecha entre los combustibles derivados del petróleo como la gasolina y el gas liquado de petróleo (G L P) y los combustibles derivados de los vegetales.

C A P I T U L O I

GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo radica en determinar analítica y teóricamente el incremento de la eficiencia de la retorta pirolítica que se encuentra en la E.S.P.O.L. si se utilizara la recirculación de los gases (volátiles) producto de la pirolización de la madera.

1.2 ALCANCE

El alcance pretendido en este trabajo es el de llegar a predecir teóricamente, en qué porcentaje se incrementaría la eficiencia del sistema si se utilizaran los volátiles; producidos durante la pirolización de la madera, como fuente externa de calor.

Se trata de lograr que el sistema sea autosuficiente

y, que una vez que haya adquirido autonomía, no requiera de ninguna fuente externa de calor para poder completar el

proceso de pirolización.

1.3 JUSTIFICACION

Este trabajo se justifica, en tratar que el Ecuador se prepare hacia el futuro y se "Independice" del petróleo, utilizando para ello equipos altamente eficientes que operan con materias primas que son productos de recursos naturales renovables como la madera; para esto se debe comenzar con el desarrollo de proyectos como el del presente trabajo para poder desarrollarlos en gran escala.

C A P I T U L O I I

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 SITUACION DEL CARBON EN EL ECUADOR

En la actualidad el carbón a dejado de ser un combustible de primer orden como lo era hasta hace dos décadas aproximadamente; todo esto se debe a que se pudo explotar en el Ecuador el Petróleo, desde ese momento se prefirió derivar combustibles de este elemento no renovable; lo que nos puso en un plano de superdependencia de este elemento, el cual se va agotando día a día debido a la desmesurada explotación; lo que nos hace preveer que en un tiempo a un no determinado se agotarán los reservas y el País pasará, de ser un exportador, a un importador de este producto lo que acarreará un gravísimo problema; tanto social como económico debido a que todo el sistema de generación de energía, dependan de los derivados del petróleo; no teniendo hasta el momento un substituto del petróleo, el país volverá a generar su energía a partir del carbón o leña, en

la actualidad la industria de carbonización de la madera está en decadencia siendo la Península de Santa Elena en la Provincia del Guayas, la que mayor cantidad de carbón produce y consume en los pueblitos aledaños; no existen en la actualidad en el Ministerio de Agricultura y Ganadería una estadística completa acerca de la cantidad de carbón que producen ya que este elemento es traído hacia la ciudad en cantidades que para el Ministerio no son significativas lo que no amerita una contabilización exacta de la cantidad de carbón que se produce y dejando de lado la idea de que conforme se produce el carbón a partir de la leña que se obtiene de los árboles, estos deberían de ser reforestados para evitar en el futuro una deforestación como la que existe actualmente, lo que ocasiona serios problemas en la tierra la cual se va erosionando y por consiguiente llega a convertirse en terrenos áridos y no aptos para cultivos.

En los actuales momentos la gente de recursos económicos muy bajos son los que utilizan el carbón vegetal como combustible para cocer sus alimentos, ya que la gran mayoría de la población han sustituido este combustible por el (G.L.P.) (gas licuado de

petróleo), el cual es de fácil adquisición pero en la realidad, producir un kilo de G.L.P., es mucho mas costoso y requiere de una tecnología mas avanzada, en relación a la producción de un kilo de carbón aunque sus poderes caloríficos sean diferentes.

En restaurantes donde se expende alimentos en grandes cantidades, es mucho mas rentable utilizar carbón que gas y es en estos lugares en donde se les dá mayor utilidad a este combustible.

Una de las Provincias ricas en frondosos bosques es la llamada "Provincia Verde", que se la denomina Esmeraldas; la cual posee un total de 1'126.068 hectáreas; en estas tierras se encuentran sembrados un sin número de árboles de diferente tipos de maderas como: Jigua, Guayacán, Fernán Sánchez, Chillalde, Macharé, Guión, Tillo, Colorado, etc.

En este rincón de la Patria se está prpcediendo a la tala de estos recursos para adaptarlos al uso de ganaderías, polleras y en especial de camaroneras las cuales para poder funcionar necesitan talar una gran extensión de terreno lo que conlleva a la deforestación de estos bosques los cuales no vuelven

a ser regenerados y por consiguiente este recurso se va extinguiendo.

En esta Provincia también el uso del carbón ha sido reemplazado por otros combustibles mas aún cuando en esta provincia se encuentra localizada la refinería de petróleo, lo que hace menos rentable la utilización de carbón.

2.2 ECONOMIA Y EFICIENCIA DEL CARBON

La producción de carbón es un proceso en el cual se aplica calor a la materia orgánica contenido dentro de un recipiente relativamente hermético, también llamado horno; el carbón resultante de este proceso tiene el doble de energía potencial por unidad de peso que la leña secada al aire. Sin embargo al carbonizar 1 Kg de leña obtenemos 0,3 Kg de carbón aproximadamente.

Como puede un combustible que requiere tanta energía para su producción encajarse en un plan que tiene como propósito la conservación de la energía y salvar los recursos naturales .

Para absolver esta pregunta comenzaremos diciendo que

la mayoría de la gente en el mundo cocina y calienta con lena o carbón, a medida que se ha incrementado la población mundial, así también la demanda de leña con la creciente necesidad de tierra para producir alimentos y proveer un espacio para vivir, ha habido una disminución en el area de la tierra disponible para sembrar árboles. El corte indiscriminado de nuestros recursos forestales ha empeorado el problema en muchas áreas. En el pasado, la producción de carbón se ha basado comunmente en prácticas productivas de bajo rendimiento, no reguladas, que a menudo dan como resultado una rápida destrucción forestal.

El carbón obtenido contiene un poder calorífico superior al de la leña razon esta la que lo hace de mayor utilidad en relación a la leña.

2.3 VENTAJAS DEL CARBON

Estas ventajas son con relación a la leña frente a la cual se obtienen los siguientes resultados:

1.- Necesita menor lugar para almacenamiento.

2.- Puede ser usado en estufas pequenas, eficientes y baratas

3.- No se deteriora al almacenarlo.

4.- Contiene mas energía por el mismo peso.

5.- Es mas barato para transportarlo.

6.- Se quema limpiamente, resultando en escaso o ningún humo en la cocina, como también menos contaminación del ambiente.

Las ventajas del carbón como combustible doméstico, resultarán en una demanda incrementada en muchas regiones del país, y una sustitución del carbón por kerex o G.L.P., no es REALISTA en relación a la situación del bajo ingreso de la población; así que todo esfuerzo debe de hacerse para mejorar la eficiencia de la producción y uso del carbón .

2.4 CARBONIZACION

El carbón es madera carbonizada en ausencia de aire; en términos un poco mas técnicos, el proceso real es la destilación destructiva de materia orgánica en un ambiente casi libre de oxígeno; durante este proceso, agua, alquitranes y otras sustancias son expulsadas a medida que se aplica calor; lo que se produce es una sustancia compuesta principalmente de carbono (80%) pero que también puede contener hidrocarburos

(10-20%) cenizas (0,5-10%) y trozos de varios minerales como azufre y fósforo.

Debido a su falta de humedad y al alto contenido de carbono, el carbón contiene grandes cantidades de energía.

Tiene el DOBLE en cantidad de energía que una cantidad igual de lena secada al aire. El proceso por el cual el material orgánico se convierte en carbón se llama carbonización y puede ser desglosado en cuatro etapas distintas: Combustión, deshidratación, exotermia y enfriamiento; todas estas etapas pueden llevarse a cabo en el horno al mismo tiempo. (Ref.#3, Pág.#18)

2.5 ETAPAS DE LA CARBONIZACION

COMBUSTION

En esta etapa es el único momento durante el proceso de carbonización cuando se requieren grandes cantidades de oxígeno; en esta fase se inicia el fuego en alguna parte de la carga hasta que esa sección esté quemándose bien, durante esta etapa, el horno se calienta desde la temperatura ambiente hasta

mas de 500 C , después de que se complete la combustión, el oxígeno es reducido drásticamente y la temperatura del. horno desciende tanto como a 120 C. (Fig,#1)

DESHIDRATACION

El calor proporcionado por la combustión expulsa la humedad hacia afuera de la carga en forma de vapor; a medida que se seca la carga, la temperatura aumenta lentamente hasta casi 270 C. , la deshidratación continúa hasta que toda la humedad libre es expulsad?, el vapor es blanco, denso y húmedo. (Fig.#2)

EXOTERMIA

Una vez completada la deshidratación, la misma lena empieza a descomponerse debido a la influencia del calor, produciendo aún mas calor por medio de reacciones exotérmicas.

En este punto se cnrta completamente el aire para prevenir la combustión, los principales productos gaseosos de esta descomposición térmica (PIROLISIS)

son: Acido acético, alcohol, metílico y alquitrán, el material sólido permanente es el carbón, durante esta fase exotérmica, la temperatura sube hasta 700 C, el humo es amarillo, caliente y aceitoso. (Fig.#3)

ENFHIAMIENTO

La etapa de enfriamiento en el horno permite que la temperatura del carbón descienda aún punto donde pueda ser extraído del horno. (Fig.#4)

2.6 FASES DE LA CARBONIZACION

FASE GASEOSA

Es una mezcla gaseosa combustible, conteniendo dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, metano, etileno etc.

FASE ACUOSA 0 PIHOLENOSA

Es una solución acuosa de color castaño amarillenta; está compuesta por: Acido Acético, Metanol, Acetona y Alquitran soluble disuelto en agua.

FASE ACEITOSA

Consiste en una mezclade color negro, densa y viscosa, con decenas de compuestos; se separa por decantación de la fracción acuosa. Se la llama también alquitran insoluble.

FASE SOLIDA

Residuo sólido carbonoso permanente, el carbón vegetal en los procesos usuales, es el producto de mayor interés comercial.

2.7 ZONAS PRODUCIDAS DURANTE EL PROCESO DE CARBONIZACION

PRIMERA ZONA

Existe solamente madera en su estado original.

SEGUNDA ZONA

Se comienza a descomponer la madera con la formación de una interfase llamada "Frente de Pirólisis", la transferencia de calor es por conducción.

TERCERA ZONA

Coexisten tres zonas diferentes:

Zona Interna: Donde hay madera sin transformación

Zona Intermedia: Llamada capa de Pirólisis

Zona de Carbón: Donde se encuentra ya el carbón.

La transferencia de calor es por conducción y convección.

CUARTA ZONA

Desaparece la madera en su estado natural, siendo la capa de carbón la predominante.

QUINTA ZONA

El frente de carbonización alcanza toda la pieza formándose una única capa, la capa de carbón.

2.8 TRANSFORMACION DE LA MADERA A DIFERENTES TEMPERATURAS DURANTE LA CARBONIZACION

Las principales transformaciones ocurren a partir de aproximadamente 105 C antes de llegar a esta temperatura la madera absorve calor para poder sufrir

las siguientes transformaciones:

105 C : Hay pérdida de agua ligada higroscópicamente a la madera.

Entre 105 - 170 C : Se produce la vaporización del agua.

De 170 - 270 C : Se desprenden dióxido de car-bono (CO2) . y monóx i do de car-bono (CO) junto con ácido acético y metanol en forma d e vapores.

Estas transformaci ones menci onadas son producto d e reacciones endotérmicas.

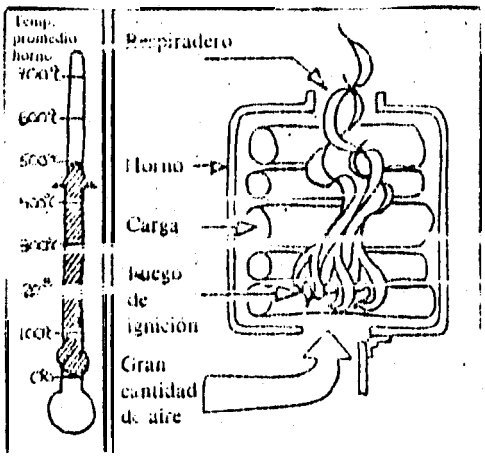
Desde 270 C : Se producen reacciones d e descomposi ci ón vi gorosamente con 1 i bcraci ón de cal or. Est.3 transformación es producto d e una reacción exotérmica.

2.9 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LOS PRODUCTOS DE LA CARBONIZACION

La temperatura a parte de alterar los productos de la madera, provoca cambios sustanciales en la composición del carbón; cuando se incrementa la temperatura de carbonización trae como resul tado un aumento en el rendi mi ento del 1 íquido y gas, con la consecuente disminución en el rendimiento del carbón, 0 sea, el carbón produci do, a menos temperatura t i ene

un mayor contenido de materias volátiles y poco contenido de carbono fijo.

La formación del gas no condensado depende sensihlemente de la temperatura, inicialmente los gases son oxigenados representados por CO, cm, a medida que la temperatura aumenta hay una variación en la naturaleza de los gases: se inicia la formación de los gases combustibles hidrogenados, representados principalmente por CH4 y C2H6; entonçes, es de esperar un aumento en el poder calorífico de los gases, a medida en que aumenta la temperatura.



Fig# 1
Combustión

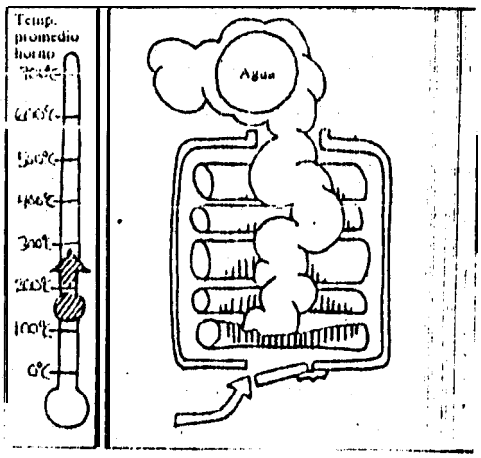


Fig #2
Deshidratación

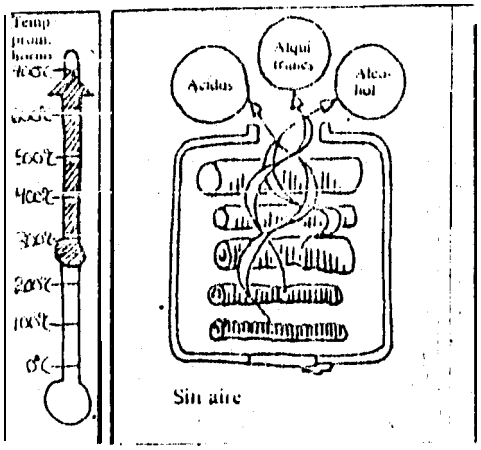


Fig #3
Exotermia

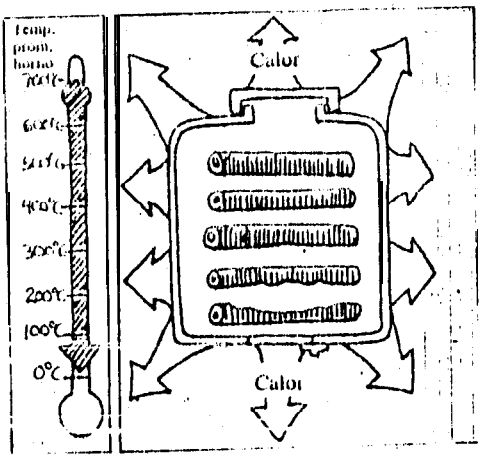


Fig # 4
Enfriamicnto

CAPITULO III

EQUIPOS PARA CARBONIZAR MADERA

3.1. EQUIPOS CON FUENTE INTERNA DE CALOR

En estos sistemas parte de la leña es quemada en el interior del horno para proporcionarle secado e introducción a la carbonizacidn de la leña restante, dentro de esta clasificación tenemos:

a) Hornos de ti erra: Dentro de los cuales tenemos a los de tipo "Pila" y tipo "Hoyo"

b) Hornos 1 adri 11 eros.

c) t-tar-no missouri

d) Hornos metálicos.

3.2 EQUIPOS CON FUENTE EXTERNA DE CALOR

En estos sistemas la fuente de calor es esterna al depósi to donde se carboniza la wader-a dentro de esta clasificacidn tenemos:

a) Hot-no de albanileri'a con cámara externa.

b) Retortas Pirolíticas.

3.3. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LA RETORTA PIROLITICA DE LA E.S.P.O.L.

La retorta de la E.S.P.O.L. (Fig.#5), presenta las siguientes caracteristicas:

1) Base construída de ladrillo y piedra pomez con asiento para la chiminea central de 0,15 x 0,15m.

2) Una cámara cilindrica (TANQUE) con un volúmen de 0,25 m3 (65 galones).

3) Condensador de aqua.

4) Dúcto y chiminea del condensador (De sección 0,10 x 0,10 m).

5) Accesori os:

   a) Soportes de la cámara y condensador

   b) P a r r i l l a

   c) Cubierta, para aislante superior de la cámara

   d) Tapa de la Cámara, condensador y hogar.

3.4. OPERACION DE LA RETORTA

Su operacidn es sencil la debido a que se aseme ja mucho a las técni cas que se emplean en los hornos de tierra.

Se considera un ciclo de operación la realización de los siguientes pasos:

1.- Preparación de la madera

2.- Cargada de la retorta, (Ubicación radial de los leños).

3.- Colocación de la tapa.

4.- Encendido y alimentación del lecho.

5.- Proceso da carbonización

6.- Enfriamientu

7.- Descarga de la retorta.

El proceso de carboización por transferencia de calor en la retorta progresa o avanza de abajo hacia arriba y en condiciones normal es el proceso demora aproximadamente de 5 a 7 hot-as.

Debido a la forma como se transf iere calor es necesar i 0 real izar un arreglo de los leños en el interior de la retorta de tal suerte que este arregl o sea en forma radial para un mejor aprovechamiento del calor; por esta misma circunstancia es necesar i o colocar los leños mas grandes en la parte inferior y 1 os mas pequeños en l a parte superior.

Una vez que l a retorta es cargada y colocada su tapa herméticamente, se procede a encender el 1 echo o lugar e n el cualse combust i onará leña como f uente de calor externa para l a generación del calornecesari0 para producir l a pirólizis, a l ocurrir esto los gases o materias volátiles producto de la pirolización de

la madera; que salen a temperaturas altas, son enfriadna en un condensador para luego poder recoger los productos condensables; y los no condensables emanarlos al ambiente por media de la chiminea.

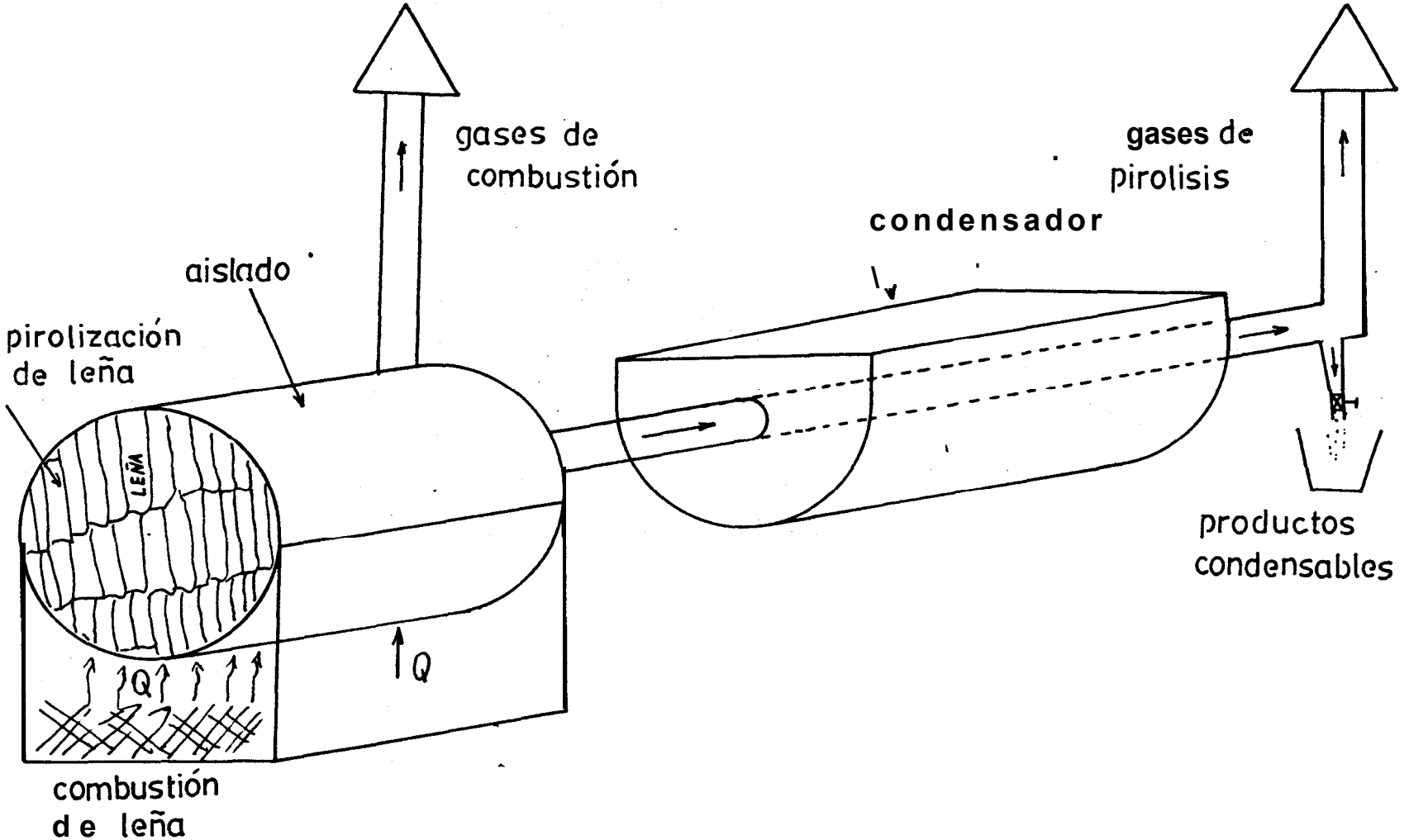


Fig # 5 OPERACIÓN DEL SISTEMA

C A P I T U L O **I V**

ANALISIS TERMICO DEL SISTEMA

4.1. INTHODUCCION

Para pader realizar un "Seguimiento" de algunas de 'la; propiedades que varian durante' el proceso de carbonización se consideró que la cámara de pirolización est.aba tutalmente compacta de madera par-a carbonizar, esto se lo hizo en la práctica, que está carrelacionada con este análizis teórico, para de esta manera poder asumir con poco riesgo de error que en el interior de cámara la madera se asemejaría a una serie de placas o paredes planas paralelas ubicadas radialmente y de esta manera poder utilizar alguno de los principios transferencia de calor.

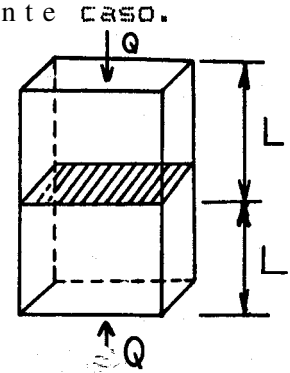
En este caso utilizaremos el análizis que realiza el libro de Kreith (Ref. #6), paraflujo transitorio de calor en una placa.

Basados en este análizis utilizaremos las gráficas de

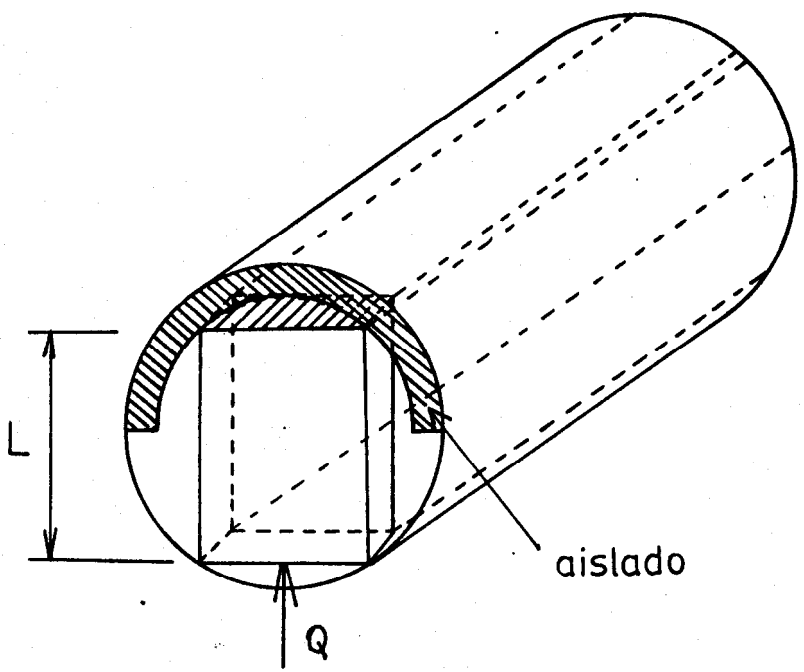
la temperatura en el plano media de una placa de espesor 2L del libro de Hollman (Ref. #5).

4.2. DESCRIPCION DEL ANALISIS

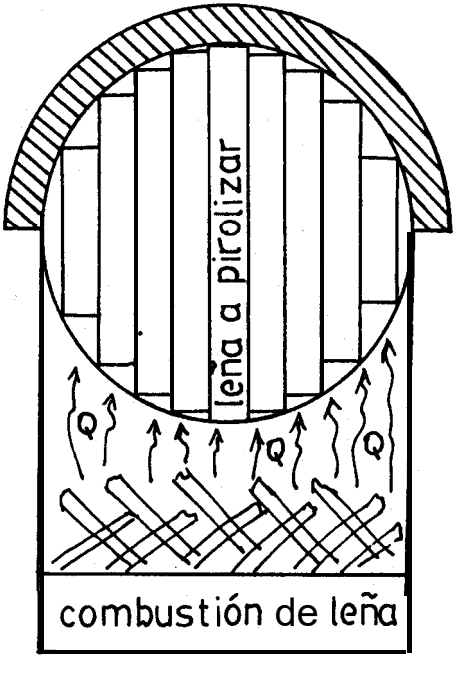
Como ya se mencionó en la introducción este análisis se lo hará de acuerdo con la referencia #6; con la diferencia de que la placa se encuentra en posición vertical y no horizontal como indica la referencia #6 O sea que es el siguiente caso.

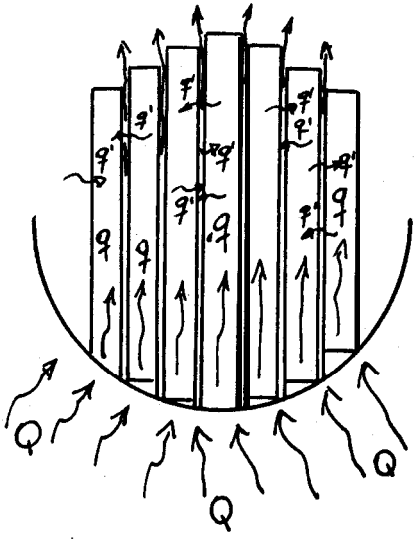


De acuerdo a este gráfico se puede asemejar el caso de la retorta de la siguiente manera:



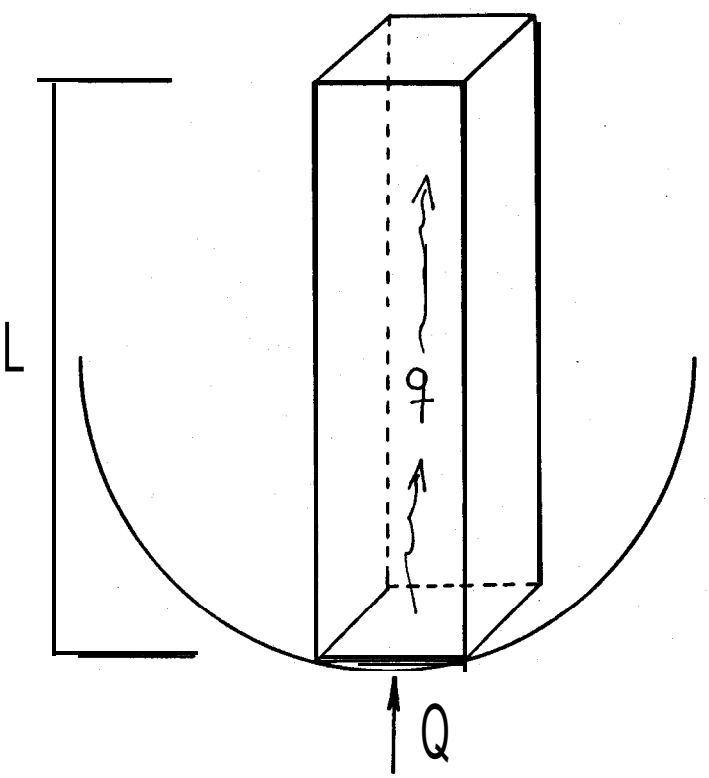
Como la retorta en su parte superior y lateral está totalmente aislada, y el calor fluye de abajo hacia arriba, el caso es muy semejante al indicado en el inicio del presente análisis, partiendo de esta hipótesis tenemos que las gráficas de la (Ref.#3) estan tabuladas en base al número de Biot, el número de Fourier y la temperatura del plano central; que para nuestro caso será el plano correspondiente a la parte superior del leño; con lo cual garantizaremos que, cuando la temperatura de este plano sea la temperatura de carbonización todo el leño estará totalmente carbonizado; así como también se involucra la temperatura del interior del horno.





proceso de pirolizacion

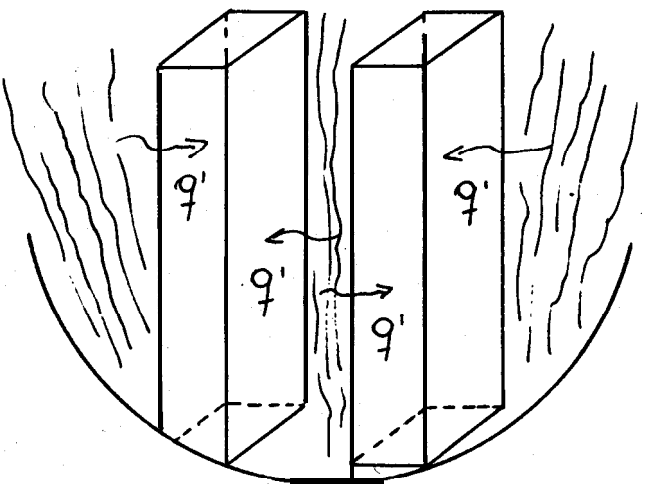
El calor Q transmitido es producto de la combustión de leña en la parrilla de la retorta; este calor calienta la base de la retorta y comienza a pirolizar la madera el mismo calor de pirolización se transmite primero por CONDUCCION tomo es el caso del calor (q) y esto se debe a que la parte inferior de los leños estan en contacto directo con la base de la retorta, esta transmisión de calor se la puede observar de la siguiente forma:



q = Calor trasmitido por conduccidn

Durante este proceso de calentamiento, la madera comienza a emanar su materia volAtil, la cual posee una alta temperatura, asi como una densidad baja (razón por la cual asciende) y va calentando los leños a su paso por convección esquemáticamente así :

q'= Calor trasmitido por conveccion desde los volátiles hacia los leños



Para lograr obtener resultados de esta "Superposición" de formas de transferencia de calor en los leños, (ver apéndice "A"), se realizó una práctica en la retorta, con todas las especificaciones anotadas en este capítulo, y ademas se colocaron dos termocuplas en dos leños (Fig.#2) ubicados en diferentes posiciones del eje longitudinal de la retorta para poder tener datos de la variación de la temperatura de los leños conforme pasaba el tiempo. Estos resultados se hallan en la tabla #1.

Como las gráficas de la Ref. #5 también involucran la temperatura Too que en en este caso set-la la temperatura promedio a la cual se encuentra el hurno conforme pasa el tiempo; se colocarnn 2 termocuplas en la parte interior de la returta:
Una termocupla en la parte inferior de la cámara y otra en la parte superior, para de esta manera poder promediarlas y obtener la temperatura Too involucrada en las curvas de la Ref. #5.

Todos estos parámetros obtenidos, durante el proceso experimental realizado en la retorta, nos servirán par-a elaborar la Tabla #1; y a partir de esta abtener el gráfico #1; en donde se muestra la curva resultante del proceso experimental de pirolización de la madera; con este gráfico #1, como patrón de referencia, trataremos de obtener una curva muy semejante pero partiendo de la variación o tanteo de ciertas porpiedades como la conductividad t&r-mica (K), el coeficiente convectivo (h); la densidad (ρ), etc., para lo cual utilizaremos las gráficas de la Ref.#5.

4.3 FORMULAS A UTILIZARSE

$$\text{Número de Biot } Bi = \frac{h\,L}{K}$$

$$\text{Número de Fourier } Fo = \frac{\alpha \times t}{L2}$$

$$\text{Difusividad Térmica} = \alpha = \frac{K}{\rho\ Cp}$$

Donde:

h = Coeficiente convectivo Interior $\left(\frac{W}{m2\ C}\right)$

L = Longitud del leño (m)

K = Conductividad Térmica $\left(\frac{W}{m\ C}\right)$

ρ = Densidad del leño (Kg/m3) (Ref.#3)

Cp = Calor especifico (J/Kg C) (Ref.#4)

4.4. CALCULOS REPRESENTATIVOS

$$Bi = \frac{0{,}13 \ \frac{W}{m2\ c} \times 0{,}58\ m}{\frac{0{,}134}{\frac{w}{m\ c}}} = 0{,}5626$$

$$Bi' = 1{,}777$$

$$\alpha = \frac{K}{\rho\ Cp} = \frac{0{,}134\ \frac{w}{m\ c}}{777{,}821\ \frac{Kg}{m3} \times 1{,}324\ \frac{J}{Kg\ C}} = 0{,}000130\ \frac{m2}{seg}$$

$$Fo = \frac{\alpha \cdot t}{L^2} = \frac{0{,}000130\ \frac{m2}{seg} \times 300\ seg}{(0{,}58)^2\ m2} = 0{,}116$$

Con Bi= 1,777 y Fo= 0,116 vamos a las gráficas de la referencia #5 y obtenemos:

$$\frac{Tex - Too}{Ti\ \ Too} \Rightarrow 1 \quad Tex - Too = 1\ (Ti - Too) \Rightarrow Tex = 1\ (Ti - Too) + Too$$

$$Tex = Ti - Too + Tow \qquad Tex = Ti = 27{,}75\ C$$

El resto de los cálculos se encuentran tabulados en la Tabla #2 y cuya gráfica es la #2

4.5 **BALANCE** TERMICO DEL SISTEMA

Para considerar las energías involucradas en el balance térmico consideraremos la figura #7 en la cual se fija un volúmen de control, de acuerdo al cual describiremos las energías que atraviezan dicho volúmen de control.

De acuerdo con esta figura podemos plantear la siguiente ecuación:

$$E_{in} = E_{out} + \text{Pérdidas Totales}$$

Como componentes de la Ecuación del balance tenemos:

$$E_{in} = M_{leña} \times PC_{leña} + M_{leña\ combustionar} PC_{leña} + M_{agua\ en\ la\ leña} \times h$$

$$E_{out} = M_{volátiles} C_p \Delta T + M_{volátiles} \overline{PC}_{volátiles} + \dot{M}_{gases\ combustión} C_p \Delta T + M_{agua\ Combustión} C_{pagua} \Delta T_{leña} + M_{madera\ en\ suspensión} \overline{Pc}_{madera} + M_{carbón} \overline{PC}_{carbón}$$

PERDIDAS TOTALES = Qtapa + Qparedes + E almacenada en ductos y chimineas

4.6 DESARROLLO DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN LA ENERGIA QUE ENTRA, AL SISTEMA EN LA ECUACION DEL BALANCE

MASA DE LA LEÑA A PIROLIZAR

Esta masa es de la leña que va a ser pirolizada previo a lo cual se la pesó y posteriormente se la introdujo en la cámara, cabe indicar que dicho peso se lo midió considerando la madera en base seca y con aproximadamente un 15% de humedad

dicha masa es:

$M_{leña\ pirolizar} = 79,795$ Kg

PODER CALORIFICO PROMEDIO DE LA LEÑA

Este es tomado de la referencia #5 el cual es de:

18.000 $\frac{KJ}{Kg}$ base seca

MASA DE LA LEÑA A COMBUSTIONAR

Esta masa es de la leña a quemarse la cual servirá como fuente de calor externa; se la pesó antes de quemarla y se consideró con un 15% de humedad

$$M_{leña\ Combustionar} = 55Kg$$

PODER CALORIFICO PROMEDIO DE LA LEÑA A COMBUSTIONARSE

Es igual al de la sección 4.6.2.

MASA DE AGUA CONTENIDA EN LA LEÑA

Como ya se indicó la leña contenía un 15% de humedad por consiguiente esta masa es:

$$M_{agua\ leña} = 0,15 \times 55\ Kg = 8,25\ Kg$$

ENTALPIA DEL AGUA EN LA LEÑA

Fue tomada a 30 C de las tablas de vapor y es igual a:

$$h_f = 125,79\ \frac{Joules}{gr}$$

CALCULO **NUMERICO DE LA ENERGIA QUE ENTRA**

$$E_{in} = 79{,}795\ Kg \times 18.000\ \frac{KJ}{Kg} + 55\ Kg \times 18.000\ \frac{KJ}{Kg} +$$

$$+ 0{,}15\ (55)\ Kg \times 125\ \frac{Kj}{Kg}$$

$$E_{in} = 2'427.341{,}25\ KJ$$

4.7 DESARROLLO DE CADA UNO DE LOS ELEMENTOS INVOLUCHADOS EN LA ENERGIA QUE SALE, DEL SISTEMA EN LA ECUACION DEL BALANCE

MASA DE LOS VOLATILES

Esta masa se la intentó obtener utilizando un tubo de Pitot que se encuentra en el C.E.T.E. (Centro Experimental de Tecnologia Energética), de la E.S.P.O.L., pero debido a que los volátiles contienen alquitranes en su composición este tubo al querérselo usar se tapó por lo cual hubo de buscar otro método aunque sea teórico para calcular esta masa; y lo que se hizo fue pesar el carbón resultante de la pirólizis y se obtuvo que era aproximadamente el 30% de la masa que se introdujo como leña, por consiguiente la masa de los volátiles es el 70% de la

masa de la leña que se introdujo para carbonizarla.

$$M_{volátiles} = 0,7\ (79,795)\ Kg = 55,8565\ Kg$$

CALCULO DEL **CALOR** ESPECIFICO **(Cp)** DE LOS VOLATILES

Para lograr este objetivo se tomaron varias muestras del gas durante el proceso de pirolización, para luego proceder a analizarlas en un equipo de Orsat y así lograr obtener la composición del gas y los porcentajes de cada uno de los componentes en el mismo, de esta experiencia se obtuvieron los siguientes resultados :

C O2 = 5,2 %

C O = 21,3%

O2 = 0,9%

H2 = 4,08%

N2 = 100% - ΣT = 100 - 31,48 = 68,52%

CH4 = 2,51%

Luego se obtiene del libro de Hollman tablas A.4 los Cp de cada uno de los elementos componentes del gas a la temperatura a la cual se obtuvo la muestra que es: 210 C aproximadamente, 483 k. y se obtiene el Cp de ese componente que sumados entre sí da como resultado el Cp de la muestra total.

Esto se lo realizó así:

$$CO2 = 0,052 \times 1,00178 \times 10^{3} = 52,093 \text{ J/Kg}$$

$$CO = 0,213 \times 1,06064 \times 10^{3} = 225,916 \text{ "}$$

$$O2 = 0,009 \times 0,96693 \times 10^{2} = 0,8702 \text{ "}$$

$$H2 = 0,0408 \times 14,5043 \times 10^{3} = 591;775 \text{ "}$$

$$N2 = 0,6852 \times 1,053868 \times 10^{3} = 722,1103 \text{ "}$$

$$1.592,764 \ \frac{J}{Kg \ C}$$

$$\text{Covolátiles} = 1;592,764 \ \frac{J}{Kg \ C} \times$$

$$Cp = 1.592,764 \ \frac{J}{Kg \ C}$$

PODER CALORIFICO DE GAS (VOLATILES)

Este valor se lo tomó de los análizis en el C.E.T.E., de la **E. S.P. 0.1 .**, y cuyo valor aproximadamente es:

$$Pc_{Gas} = 4.360 \ \frac{K \ J}{Kg}$$

MASA DE GASES DE COMBUSTION

Para obtener este valor se hizo la siguiente relación

Masa total de madera a combustionarse = Magua en la madera + M gases de combustión

De donde: M gases de combustión = M total demad. a combustionarse - M agua en la madera

M gases = 55 Kg - 0,15 (55) = 55 Kg - 8,25 Kg =

M gases = 46,75 Kg

CALOR ESF'ECIFICO DE LOS GASES DE COMBUSTION

tomando una muestra de este gas se pudo obtener el siguiente valor:

Cp = 1051 J/kg a una temperatura promedio de 600 C, 873 K

CALOR ESF'ECIFICO DEL AGUA

Se lo obtuvo de acuerdo con la tabla A. 4 del libro de Hollman a una temperatura promedio de 320 C y el valor es:

CpH2O = 4.177 J/Kg C

MASA DE PARTICULAS EN SUSPENSION EN LOS VOLATILES

Este valor se lo trató de obtener pero la técnica a utilizarse no funcionó por consiguiente no quedó otro camino que dejar sin poder cuantificar este valor.

MASA DE CARBON

La masa de carbón resultantes después del proceso de pirolización fue de aproximadamente el 30% del total de la masa de leña que se introdujo en la retorta para carbonizar, esto es:

M carbón = 0,3 x 79,795 Kg = 23,9385 Kg

PODER CALORIFICO DEL CARBON

Tomando de la referencia #6 y cuyo valor es de:

PC carbón = 28.000 KJ/Kg.

CALCULO NUMERICO DE LA ENERGIA QUE SALE

$$E_{out} = 0,7\ (79,795)Kg \times \frac{1.592,76\ KJ}{1.000\ Kg} \times \frac{(210-30)\ C}{C} +$$

$$+ 0,7\ (79.795)Kg \times \frac{4.360\ KJ}{Kg} + 46,75 \times$$

$$\times \frac{1.051}{1.000} \frac{KJ}{Kg\ .C} (610-30\ C + 8,25\ Kg \times \frac{4.177}{1.000} \frac{KJ}{Kg\ C} \times$$

$$\times (610-30)\ C + 0,3\ (79,795)\ Kg \times 28.000 \frac{KJ}{Kg} =$$

$E_{out} = 978.311,029$ Kj

4.8 PERDIDAS TERMICAS DEL SISTEMA

PERDIDA DE **CALOR POR LA TAPA**

Para poder obtener este valor debemos recurrir a la referencia #7 de la cual tomamos el coeficiente convectivo exterior; cuyo valor es de $2,6 \frac{K\ cal}{Hr\ m2\ C}$

$Q_{tapa} = h\ A \Delta T = h\ A\ (\bar{T}_{horno} - \bar{T}_{ambiente})$

$$Q\ tapa = 2{,}6\ \frac{K\ cal}{Hr\ m2\ C} \times \frac{\pi\ D^2}{4}\ m2 \times (437{,}5 - 30)\ C$$

$$\emptyset\ tapa = 0{,}59\ m + 0{,}09\ m = 0{,}68\ m$$

$$Q\ tapa = 2{,}6\ \frac{K\ cal}{Hr\ m2\ C} \times \frac{\pi (0{,}68)^2\ m2}{4} \times (437{,}5 - 30)\ C$$

$$Q\ tapa = 384{,}776\ \frac{K\ Cal}{Hr} \times \frac{4{,}1868\ KJ}{1\ K\ cal} \times \frac{1Hr}{3600\ seg} \times 15.000\ seg$$

$$Q\ tapa = 6.712{,}42\ KJ$$

CALOR PERDIDO POR LAS PAREDES HACIA EL EXTERIOR

Este valor esta calculado ya en la referencia #7 y su valor es:

$$Q\ paredes = 2{,}3\ K\ cal/\ hr \times \frac{4.1868 \times 15.000}{3600} =$$

$$= 40{,}124\ KJ$$

FERDIDAS DE ENERGIA DEBIDO A OTROS **FACTORES**

En este grupo de pérdidas se encuentran las

ocasionadas debido a la ineficiencia de combustión, energía almacenadas en las paredes de la retorta, ductos, chimineas, etc., los cuales se los ha cuantificado en un solo valor que se lo obtuvo de la resta de la energía que sale mas el calor perdido por la tapa y paredes; del valor de la energía que entra al sistema, este valor es de:

$$\Delta E = E\,in - (Eout + Qtapa + Qparedes) =$$

$$2'427.341,25 - (978.311,029 + 6712,42 + 40,124)$$

$$\Delta E = 1'442.277,68\ KJ$$

4.9 CALCULO DE LA ENERGIA MINIMA NECESARIA PARA QUE EL SISTEMA ADQUIERA AUTONOMIA.

Este valor se lo obtiene aplicando la ecuación:

$Q = M\ Cp\ \Delta T$

Donde M es la masa de madera que se ha pirolizado

Cp = Calor especifico de la madera

ΔT = Temperatura del leño - temperatura promedio de la cámara.

- La masa de madera es aproximadamente 1/5 de la masa total; esto se lo obtuvo debido a que el proceso de carbonización duro aproximadamente 5 horas; y al cabo

de una hora el sitema comienza a emanar gran cantidad de volátiles, esto implica que durante este tiempo se carbonizó el 1/5 del total de la madera que está carbonizándose.

- El calor especifico es tomado de la referencia #4.
- La temperatura del lefto es obtenida de acuerdo al gráfico temp. vs tiempo (Gráfico #1) en el punto en el cual la pendiente de la curva cambia bruscamente de inclinación y esta temperatura es aproximadamente 160 C.
- La temperatura promedio del horno es de : 309 C

$$Q = \frac{1}{5}\ (79{,}795)\ Kg \times 1{,}324 \times 10^{3}\ \frac{J}{Kg\ C}\ (309-160)\ C \times$$

$$\times\ \frac{KJ}{1.000\ J} =$$

$$Q = 3.148{,}33\ KJ$$

4.10 CALCULO TEORICO DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA SIN RECIRCULACION DE VOLATILES

La eficiencia está dada en base a la Energía aprovechada sobre la energía suministrada esto es:

$$\eta = \frac{M_{carbón}\ PC_{carbón}}{M_{leña}\ PC_{leña}) + M_{leña}\ PC_{leña}) + M_{agua}\ h} \times$$

combustionar pirolizar

100 =

$$\eta = \frac{0{,}3\ (79{,}795)\text{Kg} \times 28.000\ \text{KJ/Kg}}{55\text{Kg} \times 18.000\ \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 79{,}795\text{Kg} \times 18.000\ \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} +}$$

$$\frac{}{+\ 0{,}15\ (55)\ \text{Kg} \times 125{,}79\ \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} \times 100 =$$

$$\eta = \frac{670.278}{2/427.347{,}77} \times 100 = 27{,}61\%$$

$$\eta = 27{,}61\ \%$$

4.11 **CALCULO TEORICO** DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA SI SE **USARA RECIRCULACION** DE LOS **VOLATILES**

En el presente cálculo de eficiencia se incrementa el numerador debido a que no solo tenemos como energía aprovechada la producción de carbón sino también la generación de volátiles, con toda la energía intrínsica que ellos poseen, ademas este CALCULO DE

EFICIENCIA FUNCIONA UNA VEZ QUE EL SISTEMA DE ADQUIRIDO AUTONOMIA, debido a esta razón el denominador de la ecuación de la eficiencia se ve reducido ya que no tenemos energía externa suministrada lo que nos da como resultado lo siguiente:

$$\eta = \frac{Mcarbón \times PCcarbón + Mvolátiles \times PCvolátiles + (Mleña \times PCleña) + Mvolátiles \times Cp \times T\ volátiles}{} \times 100 =$$

$$\eta = \frac{0{,}3(79{,}795)\,Kg \times 28.000\ \frac{kJ}{Kg} + (1-0{,}7)(79{,}795)\,Kg \times 79.795\ Kg \times 18.000\ \frac{KJ}{Kg}}{}$$

$$\times \quad 4.360\ \frac{KJ}{Kg} - 4 \quad 0{,}7\ (79{,}795)\ Kg \times \frac{1592{,}76}{1000}\ \frac{KJ}{Kg \cdot C} \times$$

$$\frac{\times\ 180\ C}{} =$$

$$\eta = \frac{929.826,22}{1'436.310,0} \times 100 = 64,73\%$$

$$\eta = 64,73\%$$

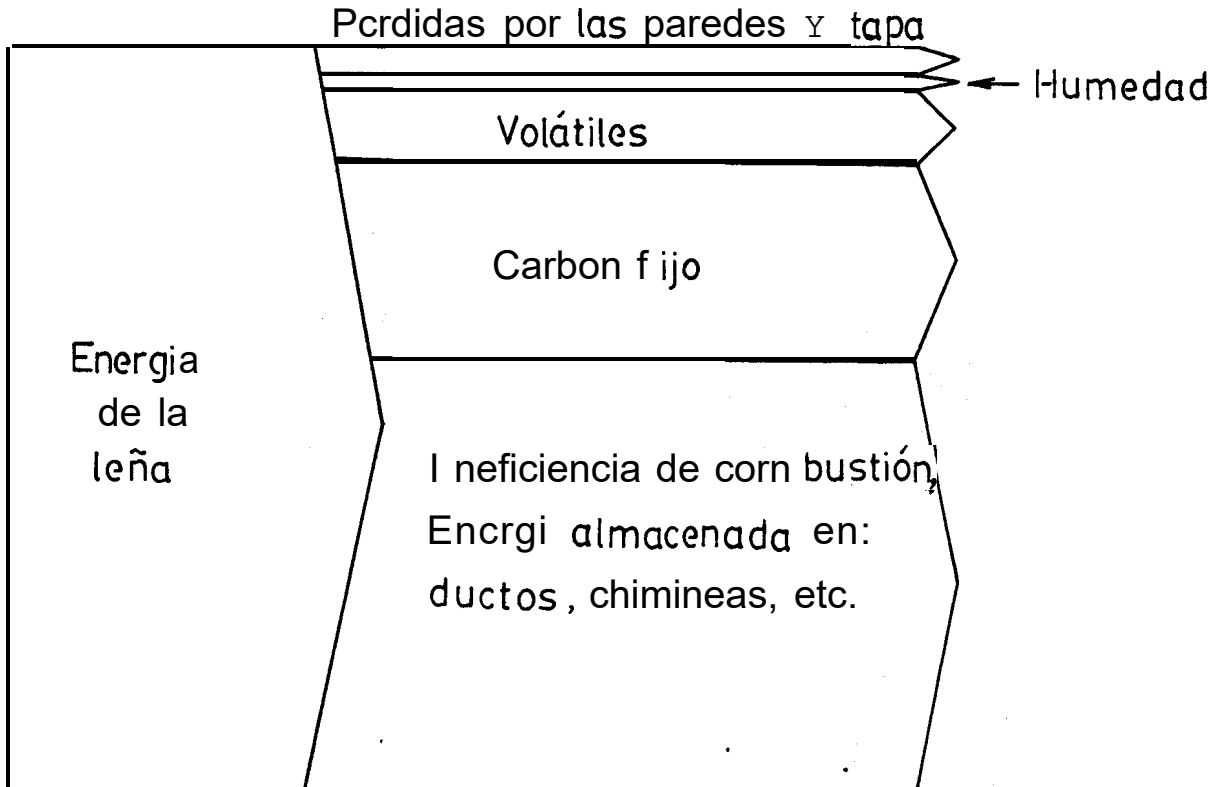


Diagrama d e Sankey

4.12 ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez realizada la tabulación y graficación de los valores obtenidos tanto en la práctica realizada como en el seguimiento teórico, vemos que los parámetros de conductividad y coeficiente convectivo se comportan aparentemente de una forma " Lineal "; es decir que conforme aumenta la temperatura del leño estos valores también lo hacen; la realidad de estos valores obtenidos no son seguros al 100 % ; ya que como se indicó al comienzo estamos " Asumiendo " valores para relacionarlos entre sí y tratar de obtener lo mas cercano a la realidad, cosa que es difícil de comprobar; pero sin embargo a pesar de no haber variado el calor específico y luego de haber hecho variar los otros factores arbitrariamente observamos que la curva resultante es aproximadamente similar a la obtenida en la parte experimental lo que nos hace ver que si de alguna manera cometimos errores, también es cierto que por este método se pudo aproximar la temperatura experimental con la temperatura teórica, cosa que en algunos casos eran muy cercanas y en otros se distanciaban entre sí, pero en todo caso se recomienda la utilización de un método número para poder tener una variación mas real

de los factores que dependen del tiempo.

Como se pudo apreciar en el cálculo de las eficiencias, observamos que se se recirculara los volátiles se obtendría un incremento del 37,12% mas en relación a la eficiencia calculada sin recirculación; esto tiene su explicación en que los gases volátiles emanados como son producto d e pirolización y no de combustión poseen elementos combustionables como el Co, 02, H2, CH4, los cuales si no se los recircula son desperdiciados; en cambio si se recirculase, su energía intrínsica se liberaría al combustionarse por medio de un quemador, sabiendo de antemano que la relación aire - combustible para este tipo de gases volátiles es de **1 A 1**, es decir para una determinada cantidad de gas se requiere igual cantidad de aire para que se pueda combustionar.

De esta manera vemos que la energía que llevan los volátiles es alta lo que nos hace aseverar que el sistema sería autosuficiente con recirculación una vez que el mismo ha adquirido autonomía.

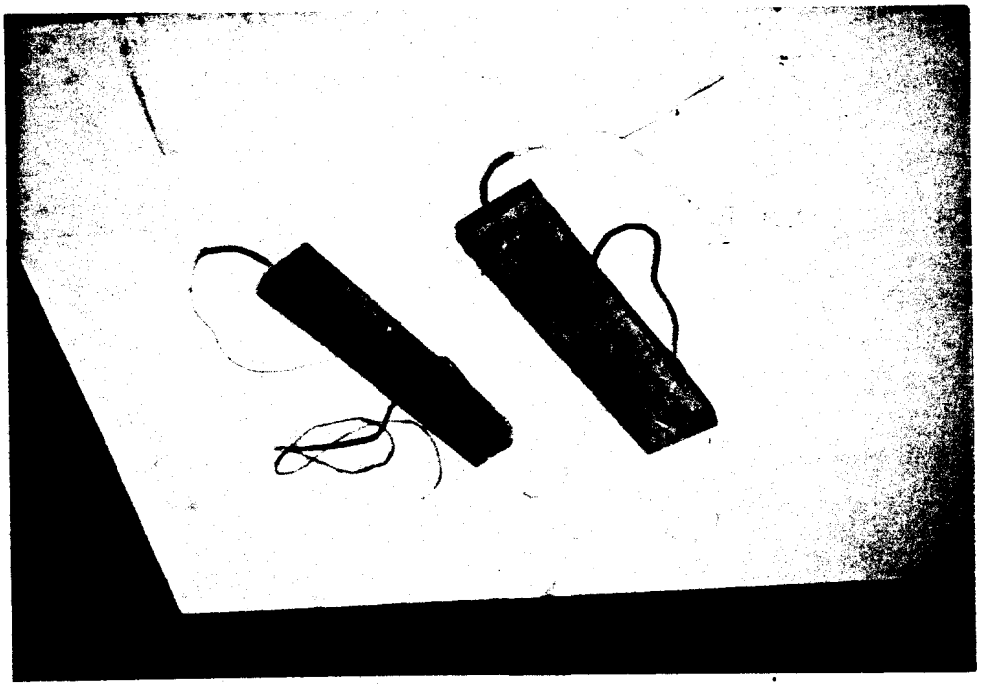


Figura # 6

TIEMPO (MINUTOS)	TEMPERATURA DE LA SUP. INTERIOR (C)	TEMPERATURA DE LA BASE INTERIOR (C)	TEMPERATURA INF. DEL LENO (C)	TEMPERATURA SUP. DEL LENO (C)
0	29,5	26	27,2	23,6
5	34	295	31	25
10	58	342	49	37
25	Lb	336	59	52
36	86	409	80	BB
,40	95	381	98	96
45	97	449	109	100
50	125	413	120	128
55	120	380	124	125
60	125	438	127	115
65	132	475	109	112
73	143	451	114	114
75	150	448	117	117
80	158	465	123	122
85	167	460	127	123
90	181	470	129	126
95	191	488	136	127
100	200	422	146	127
105	206	337	154	128
110	211	407	171	129
115	217	437	188	131
120	226	432	191	133
125	233	396	202	135
130	243	433	215	136
135	251	400	216	140
140	257	434	228	145

Tabla #1.- Resultados de la Prueba Experimental

TIEMPO (MINUTOS)	TEMPERATURA DE LA SUP. INTERIOR (C)	TEMPERATURA DE LA BASE INTERIOR (C)	TEMPERATURA INF. DEL LEND (C)	TEMPERATURA SUP. DEL LEND (C)
145	261	409	225	148
150	262	425	233	148
155	267	470	251	150
160	213	460	260	152
165	216	452	263	154
170	278	455	272	158
175	280	413	276	162
180	282	478	278	164
185	286	506	216	166
196	294	586	276	172
195	295	437	281	172
200	293	502	281	172
205	291	488	282	171
210	287	451	281	110
215	283	390	280	169
220	278	312	219	170
225	265	389	274	174
230	262	363	211	173
235	256	361	268	171
240	251	329	265	169
245	241	276	250	166
250	231	250	251	161
255	223	236	246	158

Continuación de la Tabla #1.-

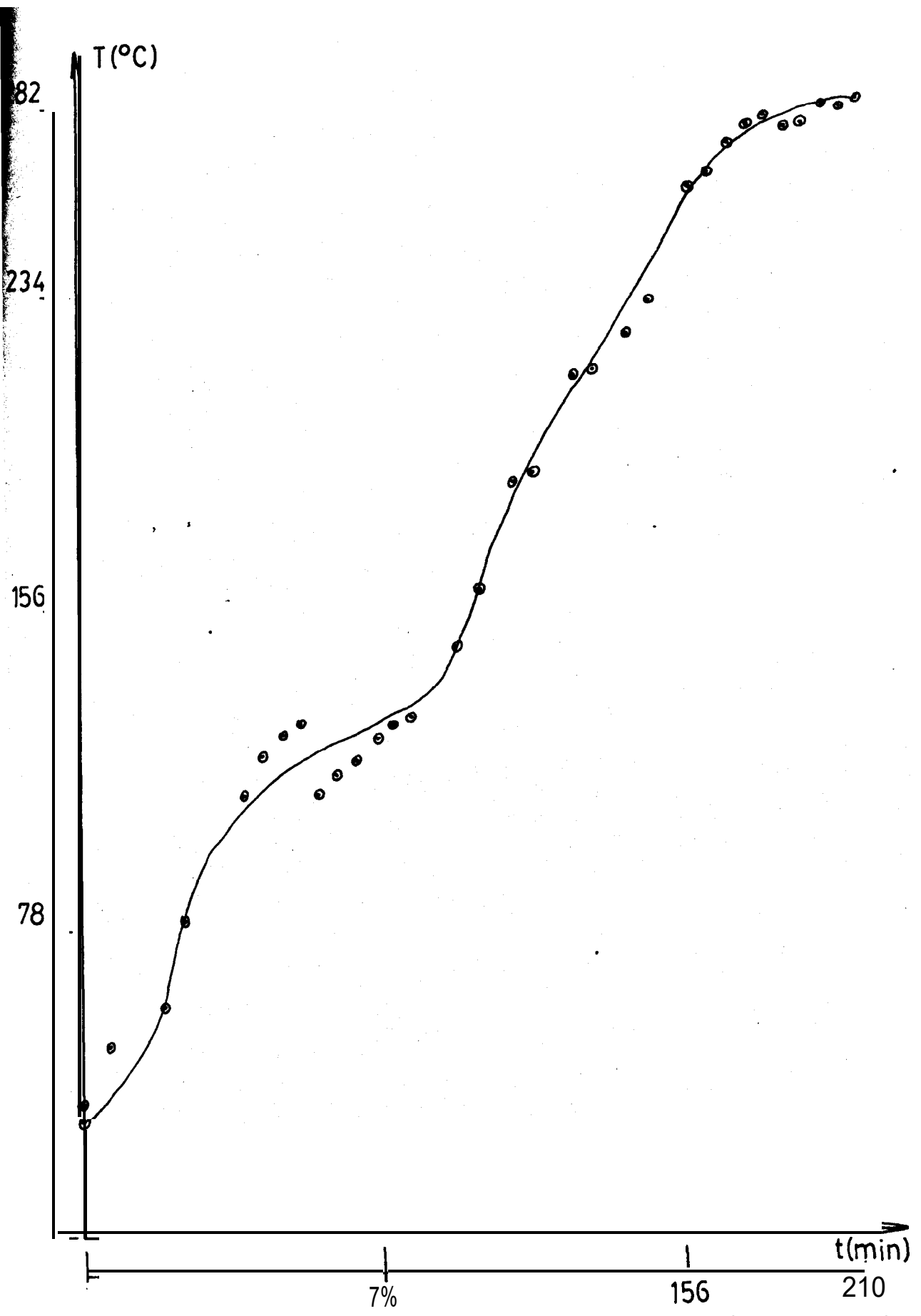


Grafico # 1 Temperatura VS tiempo (experimental)

K (w/m c)	h (w/m2 C)	Bi	Bi	Fo (m2 / seg	Fo	TEMP. OBTENIDA (C)
0,13400	0,1300	0,56260	1,7770	0,00013012	0,1160	27,750
0,13430	0,1320	0,57000	1,7500	0,00013041	0,2325	29,470
0,13470	0,1330	0,57390	1,7400	0,00013213	0,5890	58,900
0,13470	0,1350	0,58129	1,7200	0,00013215	0,7060	71,700
0,13500	0,1370	0,58800	1,6980	0,00013123	0,8100	80,310
0,13510	0,1390	0,59670	1,6757	0,00013250	0,9450	101,330
0,13530	0,1410	0,60400	1,6500	0,00013270	1,0650	112,187
0,13550	0,1430	0,61210	1,6330	0,00013290	1,1800	116,650
0,13580	0,1450	0,61930	1,6100	0,00013320	1,3060	131,780
0,13610	0,1470	0,62650	1,5900	0,00013440	2,0300	158,760
0,14000	0,1490	0,61700	1,6190	0'00013730	2,2000	174,270
0,14000	0,1550	0,64000	1,5570	0,00013300	2,3000	169,370
0,14500	0,1510	0,60000	1,6060	0,00014220	2,5000	183,430
0,14500	0,1520	0,60000	1,6600	0,00014230	2,6000	213,900
0,14520	0,1520	0,59900	1,6680	0,00014240	2,7900	213,260
0,14530	0,1520	0,59870	1,6700	0,00014250	2,9000	229,580
0,14540	0,1510	0,59830	1,6700	0,00014260	3,0500	228,470
0,14550	0,1600	0,63780	1,5678	0,00014272	3,1000	254,230
0,14600	0,1650	0,65500	1,5250	0,00014320	3,3200	*260,000*
0,14700	0,1650	0,65000	1,5360	0,00014419	3,4700	262,320
0,14800	0,1650	0,64000	1,5460	0,00014517	3,6200	*263,280*
0,14900	0,1660	0,64600	1,5470	0,00014615	3,7700	264,190
0,15000	0,1660	0,64100	1,5500	0,00014710	3,9300	*266,240*
0,16000	0,1670	0,60500	1,6500	0,00015694	4,3300	*269,310*
0,17000	0,1690	0,57650	1,7300	0,00016675	4,7500	271,240
0,17100	0,1690	0,57320	1,7445	0,00016773	4,9300	279,180
0,17200	0,1700	0,57330	1,7444	0,00016871	5,1100	275,430
0,17300	0,1710	0,57320	1,7440	0,00016960	5,2900	277,340
0,17400	0,1710	0,57000	1,7500	0,00017060	5,4700	278,850
0,17500	0,1720	0,57050	1,7540	0,00017166	5,6600	*283,220*
0,17550	0,1720	0,56840	1,7592	0,00017215	5,8300	286,170
0,17600	0,1730	0,57010	1,7540	0,00017264	6,0000	*288,090*
0,17680	0,1735	0,56910	1,7569	0,00017342	6,1800	289,450
0,17800	0,1750	0,57000	1,7500	0,00017460	6,3800	*292,620*
0,17800	0,1760	0,57300	1,7430	0,000174623	6,5300	*298,760*
0,17900	0,1770	0,57352	1,7436	0,00017558	6,7300	303,250

Tabla #2.- Temperatura Teórica Obtenida.

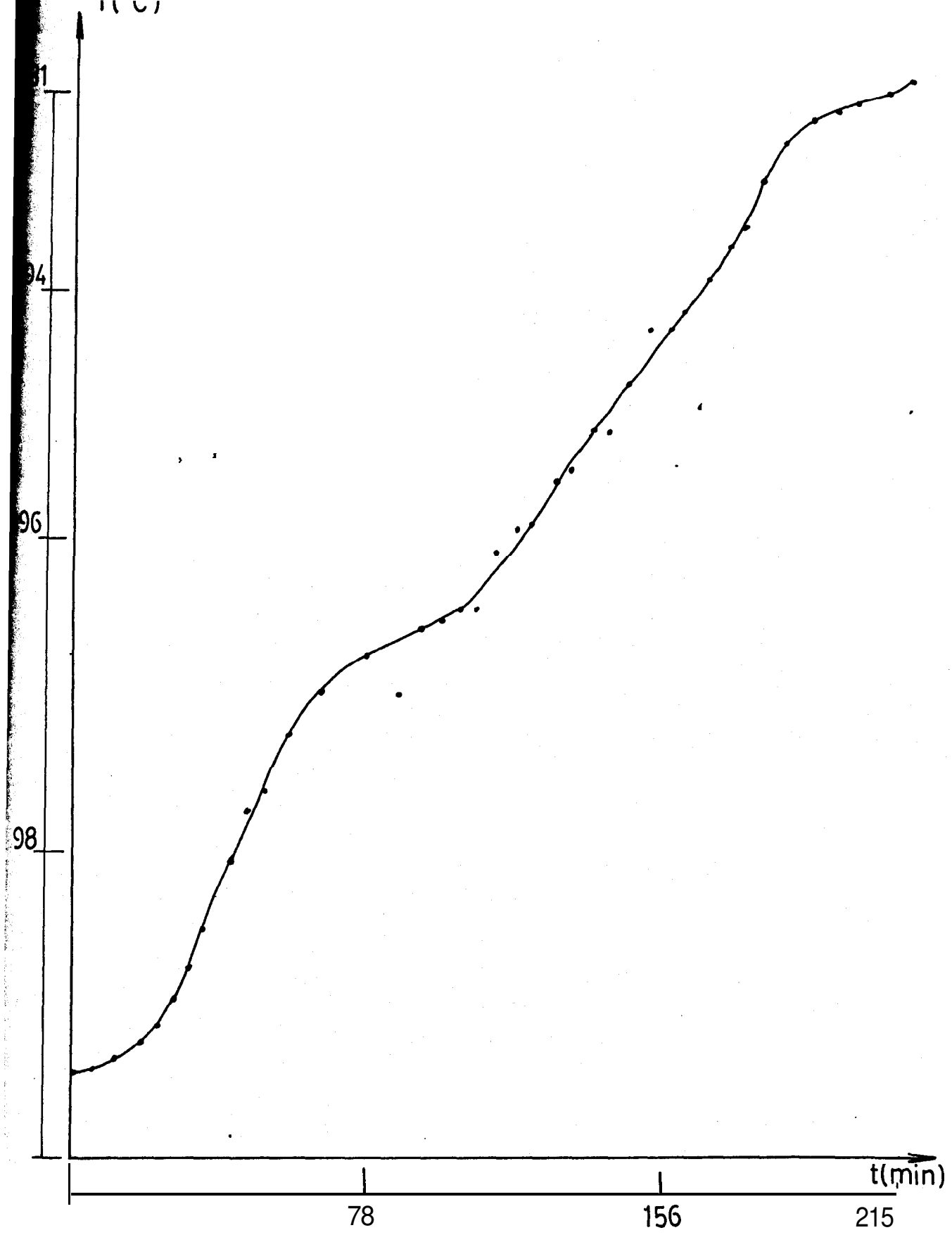


Grafico # 2 Temperutum VS tiempo (teorica)

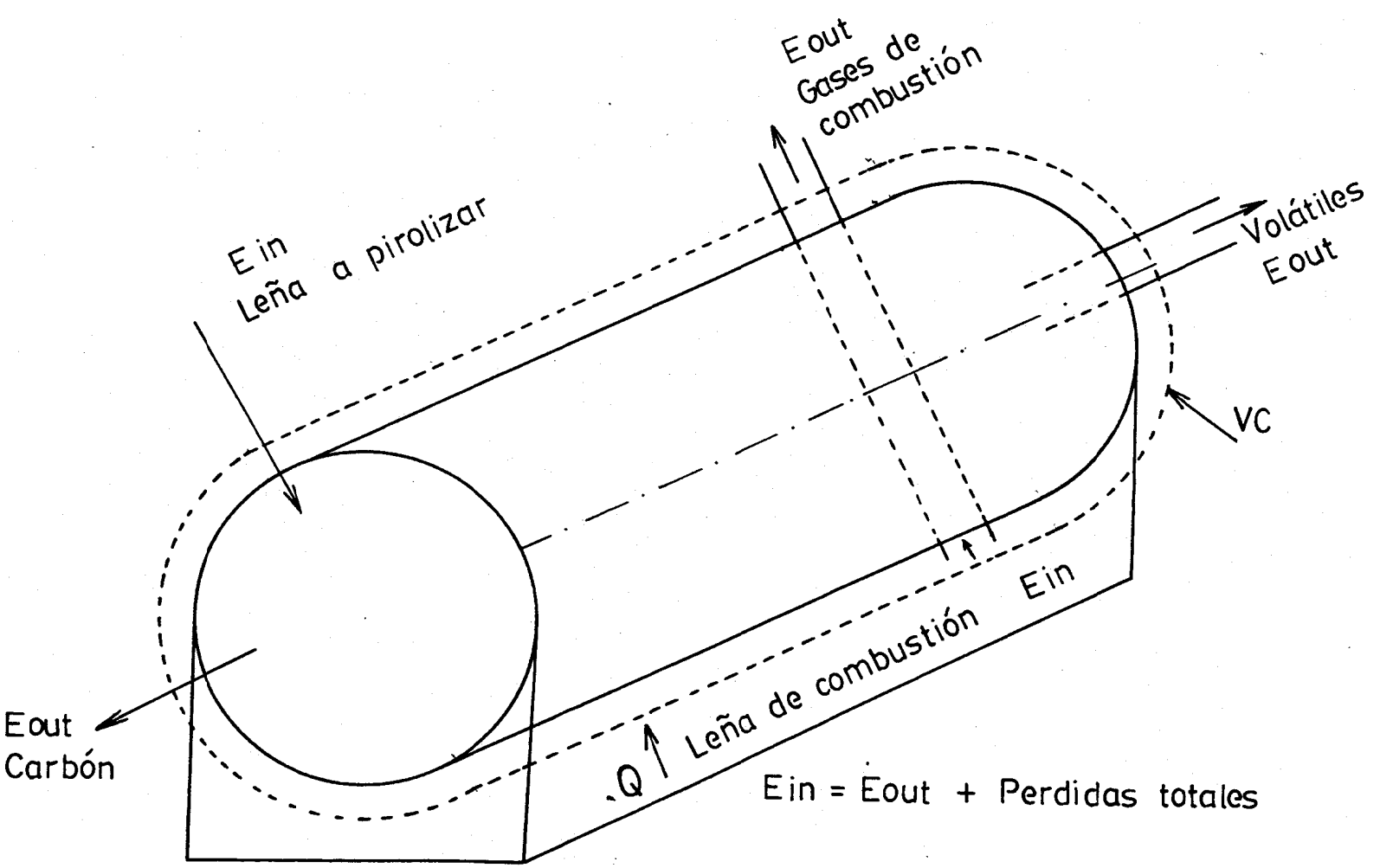


Fig # 7 Balance termico del sistema

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se enunció al comienzo del presente trabajo, se trató de predecir, aunque teóricamente el cambio que sufriría la eficiencia del sistema si se recircularan los gases (Volátiles) producto de la Pirolización esto se lo obtuvo y notamos que este tipo de equipos pueden llegar a tener una eficiencia de alrededor del 64% lo que comparado con la eficiencia del sistema sin recirculación que es del 27% nos demuestra el desaprovechamiento de energía recuperable que posee el sistema.

Esto se lo podría evitar haciendo recircular los volátiles y por medio de un quemador encenderlos y de esta manera transferir calor hacia la retorta pero utilizando gases que antes eran rechazados; lo que nos hace ver que el sistema puede llegar a ser autosuficiente es decir autoabastecerse de energía debido al incremento en la eficiencia en casi un 37% mas: y este valor podría aumentarse si se aislara totalmente el sistema de modo de que las pérdidas exteriores sean despreciables.

Cabe indicar que para producción en serie pueden ubicarse contínuamente varios de estos hornos cada uno con su propia recirculación lo que ocasionaría una producción de carbón a nivel " Industrial " ; estos hornos también podrían ser adoptados a nivel de viviendas campesinas en donde cada familia comunera podría producir su propio carbón de una forma mas técnica como mayores ventajas en el carbón que el que se obtiene de un horno tipo " Pila " en donde la eficiencia de estos hornos es muy baja y por consiguiente la calidad del carbón producido, también lo es.

En cambio el carbón obtenido en retorta es de muy baja densidad, posee un alto contenido de carbono fijo; es de muy fácil encendido; no posee contaminante alguno ya que todas las materias volátiles ya fueron sacadas, lo que hace que este carbón sea excelente para la cocción de alimentos, ya que no dejaría residuos producto de la combustión en el sabor de los alimentos, con él calentados; como es el caso del Kerex en donde debido a la ineficiencia de la combustión se queda impregnado en la comida el sabor a kerex.

Hay que resaltar también que este carbón producido en retortas pirolíticas es excelente para utilizarse en

proceso de gasificación; a partir de lo cual se pueden operar hasta motores de cambustión interna con excelentes resultados, y esto es debido al alto porcentaje de carbono fijo que posee dicho carbón.

Como ya indicamos anteriormente, si estos hornos fuesen operados en forma continua el costo de producción del carbón sería bajo y por consiguiente este negocio sería rentable.

Así como hemos hecho resaltar los beneficios del carbón no podemos dejar de hacer énfasis en la necesidad de reforestar los bosques que son cortados no solamente para producir carbón sino también para otros fines, lo que nos llevaría a un futuro peligroso si no se realiza la reposición de los árboles cortados.

También debemos señalar que en el "seguimiento" que se trató de realizar de la carbonización, no se pudo obtener los resultados que hubiésemos querido; y esto es debido a que hay mucho por investigar a nivel de carbonización, así como también hay muchas variables que intervienen en dicho proceso como; la conductividad, térmica del material, el coeficiente convectivo, la densidad del material, el calor específico; todo lo cual originan los

errores cometidos; para evitar esto se debería plantear otro modelo matemático para que a su vez este sea resuelto por medio de un método numérico y de esta forma, utilizando un computador poder resolver dicho modelo matemático lo que arrojaría resultados positivos porque si se podría hallar la forma como varían los parámetros antes indicados; esto no se lo realizó en el presente tópico porque la finalidad básica estaba encaminada hacia la determinación de la eficiencia y no hacia el proceso de carbonización específicamente.

Al finalizar esta investigación quiero hacer énfasis en la necesidad de desarrollar fogones con excelente aprovechamiento de la energía que genera la quema del carbón para de esta manera poder utilizar a nivel doméstico "Hornillas" y "Combustible" altamente eficiente usando carbón.

APENDICE " A "

ANALISIS DE LAS FORMAS DE CALENTAMIENTO PARA LOGRAR LA PIROLIZACION DE LA MADERA DENTRO DEL HORNO.

Como ya se explicó en el capitulo #4 durante elproceso de Pirolización de la madera en la retorta existen dos formas de calentamiento mediante las cuales se carboniza la madera, estas formas son:

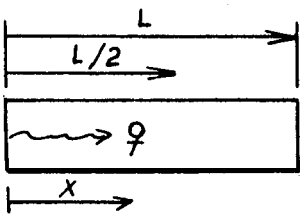
1.- Por Conducción

2.- Por Convección

Estos procesos de transferencia de calor se " SUPERPONEN" es decir que los dos ayudan al proceso de carbonización pero se está interesado en analizar ambos métodos por separado para predecir cual de ellos es mas influyente durante el proceso; para esto se analizará durante un tiempo de 60 minutos, por cual de los dosmétodos la madera incrementa su temperatura con mayor velocidad y de esta manera sabremos cual es el mas predominante.

ANALISIS DE CALENTAMIENTO POR CONDUCCION

Para realizar este análisis se tomará el leño de la siguiente manera:



Usando la Fig. #4-15 de la Ref. #6; tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{T - Too}{To - Too} = G\left(\frac{X}{2\sqrt{\alpha\theta}}\right) \quad \text{ec \#1}$$

Donde : T = Temperatura A una distancia X cualquiera.

Too = Temperatura De la base del leño.

To = Temperatura inicial del leño.

G = Nombre de la función.

X = Distancia a la cual deseamos saber la temperatura.

$\alpha = \frac{k}{Cp}$ = Difusibidad térmica, que involucra la conductividad del material, la densidad y el Cp.

θ = Variable de tiempo.

Usando el gráfico #4-15 de la Ref.#6 en las abcisas tenemos $\frac{X}{2\sqrt{\alpha\theta}}$ y en las ordenadas $G\left(\frac{X}{2\sqrt{\alpha\theta}}\right)$ con lo cual calculando la abcisa para diferentes valores de tiempo k, , Cp. obtenemos el valor de la función G y podemos aplicando la ecuación #1 de este apéndice determinar el valor requerido de la temperatura, para lo cual haremos el cálculo representantivo siguiente:

θ = 10 minutos $\quad \alpha$ = 0,00013041 (valor tomado de la Tabla #2)

$$X = \frac{L}{2} = \frac{0,58\ m}{2} = 0,29\ m$$

To = 30 C
Too= 4.9

$$\frac{X}{2\sqrt{\alpha\,\theta}} = \frac{0,29\ m}{2\sqrt{0,00013041\ \frac{m2}{seg} \times 10\ minut. \times 60\ \frac{seg}{1minut}}} = 0,51$$

Con este valor de 0,51 se entra al gráfico 4-15 antes indicado y obtenemos el valor de la función G que es = 0,51 tenemos:

$$\frac{T - Too}{T - Too} = 0,5 \qquad T_{1/2}\ ,10\ m = 0,5\ (30-49) + 49 = 39,5\ C$$

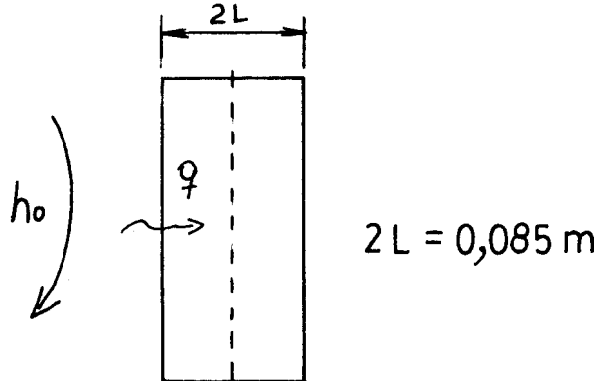
La temperatura del centro del leño al cabo de 10 minutos es de " 39,5 C " Realizando un análisis parecido hasta el tiempo de una hora obtenemos la siguiente tabla:

θ minutos	Tcentro (C)	$\frac{k}{Cp}$	$\frac{X}{2\sqrt{\alpha\theta}}$	Too (C)	To (C)
10	39,5	0,00013041	0,51	49	30
25	48,27	0,00013213	0,3257	59 C	30
30	62,5	0,00013215	0,2973	80	30
40	77,6	0,0001325	0,257	98	30
45	86,09	0,0001327	0,2422	109	30
50	95,70	0,0001329	0,2296	120	30
55	100,5	0,0001332	0,21	124	30
60	105,66	0,0001344	0,20	127	30

Donde observamos que al cabo de 1 hora de tiempo la temperatura del centro del leño es: **105,6 C**

ANALISIS DE CALENTAMIENTO POR CONVECCION

Para realizar este análisis tomaremos el leño de la siguiente manera:



Para este análisis utilizaremos la Fig.#4-9 de la Ref.#5 la cual involucra en la abcisa el número de Fourier = $\frac{\alpha \cdot t}{L^2}$ y en la ordenada el valor de $\frac{T - Too}{T - Too}$ y como parámetro el número de Biot (Bi).

Para obtener los valores de Fourier, Biot, et. utilizaremos los valores de la Tabla #2 para un tiempo de una hora que son:

$$\alpha = 0,0001344 \ \frac{m2}{sg} \qquad k = 0,1361 \ \frac{W}{m \ C}$$

$$h = 0,147 \ \frac{W}{m2 \ C} \qquad L = 0,0425$$

Too = 281,5 C (temp.del interior del horno)

$$\text{De Donde: } Fo = \frac{\alpha \cdot t}{L2} = \frac{0,0001344 \ \frac{m}{seg} \times 60 \ miut^2 \times \frac{60seg}{1minut}}{(0,0425)2}$$

$$Fo = 267,86$$

$$Bi^{-1} = \frac{K}{h \ L} = \frac{0,1361 \ \frac{W}{m \ C}}{0,147 \ \frac{W}{m2 \ C} \times 0,0425 \ m} = 21,78$$

Con estos valores vamos al gráfico 4-9 y obtenemos como ordenada:

$$\frac{T - Too}{To - Too} = 0,001 \qquad T_{o,o425;60} = 0,001\ (To - Too) + Too$$

$$To,o425;60 = 0,001\ (30 - 281,5\ ) + 281,5 = 281,24\ C$$

Al ver esta temperatura al cabo de una hora notamos que en el proceso de Pirolización de la madera la transferencia de calor por convección lateral desde los volátiles hacia el leño acelera mas el incremento de temperatura que la conducción de abajo hacia arriba.

B I B L I O G R A F I A

1.- ARORA R : CHARCOAL PRODUCT ION AND **CUGENERAT** ION (FACULTY OF PHYSICS EINDHOVEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY E I NDHOVEN , THE' NETHERLANDS)

2.- ASHRAE: AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR CONDITION ENGINEERS. HAND BOOK FUNDAMENTALS 1981 TABLA #3 CAP. #3

3.- BOUTETTE M: CARBON VEGETAL : USO Y PRODUCCION E N F'EWUENA ESCALA POR APROVECHO INT I TUTE (G. T. Z.)

4.- C.E.T.E.: CENTRO EXPERIMENTAL DE TECNOLOGIA ENERGETICA (ESPOL) TABLAS D E PODERES CALORIFICOS.

5.- HOLLMAN J . P.: HEAT TRANSFER F I FTH ED I T I ON 138 1

6. - KREITH F.: PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA D E CALOR, HERRERO HERMANOS SUCESORES S A , MEX ICO, NOVIEMBRE 1970.

7.- REYES: TESIS DE GRADO ESPOL, APENDICE D, PAG.#270 ANO 1985

8.- SERIE INFORMATIVA TECNOLOGIA APROPIADA. PRODUCCION Y CARACTERISTICAS DEL CARBON VEGETAL #4 Y #5