

LA PRODUCCIÓN DEL CARBÓN VEGETAL

Paulo César da Costa Pinheiro¹

RESUMEN

Brasil es el mayor productor de carbón vegetal del mundo, con la producción de 6,1 millones de toneladas métricas (24 millones de m³), 13 % de la producción mundial. La importante producción de carbón vegetal es la consecuencia de un gran parque de fabricación de acero, que consume el 80 % de este carbón vegetal. Para este uso intensivo del carbón, ha sido necesario desarrollar una tecnología moderna de producción industrial. Este trabajo muestra una revisión de la teoría de la carbonización, y un análisis de los factores que influyen en la producción de carbón vegetal y en la operación de los hornos de carbonización. Muestra también un comparativo de los varios hornos de carbonización utilizados en Brasil.

Palabras clave: Carbón vegetal, Carbonización, Pirólisis, Energía.

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Minas Gerais - UFMG.

INTRODUCCIÓN

La producción de carbón vegetal data desde la pre-historia, en todas las partes del mundo. Los hallazgos arqueológicos de 600.000 años, mostraron puntas de flecha pegadas a los tallos de los árboles con alquitrán, un material que solo puede obtenerse a través de la carbonización de la madera. Hace más de 30.000 años ya fue utilizado por el hombre primitivo en algunas de las pinturas más antiguas, como en Perigord, Francia. En el valle de Neandertal (Alemania) fueron descubiertos los sitios de producción de carbón que datan de 20.000 AC.

El final de la Edad de Piedra y el inicio de la metalurgia, hace más de 5500 años, solo fue posible con la producción del carbón vegetal. La combustión de la madera no llega a temperaturas lo suficientemente altas para fundir los metales. La combustión del carbón vegetal, produce altas temperaturas (> 1100 °C), que permiten fusionar el mineral y por lo tanto separar el metal de la roca. El primer metal reducido fue el cobre, en alrededor de 3000 AC, iniciando la Era del Bronce. El hierro, debido a la necesidad de temperaturas más altas y una mayor corriente de aire y se obtuvo en cerca 1200 AC, marcando el comienzo de la Edad del Hierro. Sin el carbón vegetal las Edades de Bronce y Hierro no habrían ocurrido y el hombre hubiera seguido en la Edad de Piedra. El uso de carbón vegetal permitió la aparición de la primera tecnología desarrollada por el hombre: la fundición y forja de metales.

Hasta 1700 toda la producción de hierro en el mundo se había obtenido a partir de carbón vegetal. En 1709 el inglés Abraham Darby I logró producir arrabio fundido a partir de coque de carbón bituminoso. Como resultado de esta innovación, y debido a la abundancia de carbón y la escasez de madera en Europa, se disminuyó la demanda de carbón vegetal en la industria.

La FAO estimó la producción mundial de carbón vegetal en 47 millones de toneladas (2009), un aumento de 7,7 % en la década. Es utilizado principalmente para cocinar. El precio del carbón vegetal en los países en desarrollo es de entre US\$ 90 a US\$ 400/ton. Tomando un precio promedio de US\$ 150/ton, el mercado mundial de carbón vegetal se estima en US\$ 7 mil millones.

Brasil es el mayor productor de carbón vegetal del mundo. En 2015 el país produjo 6,1 millones de toneladas (24 millones de m³) [1], aproximadamente 13 % de la producción

mundial. La madera de reforestación es utilizada en aproximadamente 88 % de la producción de carbón vegetal [2], y el eucalipto es utilizado en 77 % de los bosques plantados en Brasil. Alrededor del 86 % del carbón vegetal producido en Brasil es utilizado en el sector industrial en la producción de arrabio o de acero (4,3 Mton), ferro aleaciones (0,61 Mton) y cemento (0,2 Mton) [1]. El sector residencial consume 12 % y el sector comercial (pizzerías, panaderías y asadores) alrededor del 2 %. Brasil es el único país en condiciones de mantener una siderurgia a carbón vegetal, produciendo hierro y acero de alta calidad, debido al bajo nivel de impurezas de este reductor. El carbón vegetal se utiliza en la producción nacional de 33 % de arrabio y 98 % de las de ferro aleaciones.

CARBÓN VEGETAL

Nombre científico: Carbo lignis, Carbo vegetalis.

Nombre vulgar: Carbón Vegetal

El carbón vegetal es el resultado de la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de aire (pirólisis) a una temperatura por encima de 300 °C. Todos los tipos de biomasa se pueden utilizar en la producción de carbón vegetal, pero se utiliza principalmente la madera. El carbón vegetal es un combustible con un poder calorífico y reactividad mucho más altos que la madera. Sin embargo, el proceso de carbonización tiene baja eficiencia energética (< 50 %), y su uso disminuye la eficiencia global de los procesos que utilizan el carbón vegetal como fuente de energía.

La pirólisis es el proceso de conversión térmica a temperaturas entre 300-800 °C, en la ausencia total de aire (o con una pequeña cantidad de aire, que no causa una combustión significativa). La pirólisis es un proceso llamado por lo general carbonización, destilación destructiva, o destilación de la madera. Por lo general, es llamado de carbonización el proceso en que el carbón vegetal es el principal producto de interés, de destilación de la madera cuando se desea para producir líquido, de destilación destructiva para producir tanto líquido como carbón, y de gasificación para producir gas. El calor necesario en el proceso puede ser introducido indirectamente, o generado por una combustión parcial de la biomasa (calentamiento directo). La pirólisis realizada a altas

temperaturas (1000 °C) maximiza la producción de gas (gasificación), mientras que la pirólisis a temperaturas más bajas (< 500 °C) maximiza la producción de carbón vegetal (carbonización) (figura n.º 1, tabla n.º 1).

La pirólisis puede ser clasificada en:

Pirólisis lenta: utiliza bajas temperaturas y mucho tiempo de reacción. Maximiza la producción de carbón vegetal (alrededor de 35 % en peso, que contiene aproximadamente 50 % del contenido de energía de la biomasa que se utiliza).

Pirólisis rápida: El calentamiento rápido de pequeñas partículas de biomasa de bajo contenido de humedad, a una temperatura entre 450-550 °C. Las velocidades de reacción son altas y el tiempo de residencia de típicamente menos de 1 segundo. Maximiza la producción de alquitrán, 65 a 80 % del peso seco inicial.

Pirólisis flash: Similar a la pirólisis rápida. Utiliza temperaturas más altas (> 700 °C). Maximiza la producción de líquido y gas (más de 80 % en masa).

Pirólisis convencional: Utiliza temperaturas moderadas (< 600 °C) y velocidades de reacción moderadas. Se producen cantidades casi iguales de líquido, de gas y de carbón.

Tabla n.º 1. Métodos de pirolisis y sus variantes

Metodo de pirolisis	Tiempo de residencia	Tasa de calefacción	Presión (Atm)	Temperatura max. (°C)	Producto principal
Carbonización	Horas – días	Muy bajas	1	450	Carbón vegetal
Convencional	5-30 min.	Baja	1	600	Sólidos, líquidos, gases
Fast	0,5-5 s.	Promedio	1	650	Bio-aceite
Flash-Líquido ^a	< 1 s	Alta	1	< 650	Bio-aceite
Flash-Gas ^b	< 1 s	Alta	1	< 650	Gas, líquidos
Hidropirólisis ^c	< 10 s	Alta	~ 20	< 500	Bio-aceite
Metanopirólisis ^d	0,5-1,5 s	Alta	~ 3	>750	Químicos
Ultra pirolisis ^e	< 0,5 s	Muy alta	1	1000	Gas, químicos
Vacuo	2-30 s	promedio	< 0,1	400	Bio-aceite

^a Flash-líquido: líquido obtenido de la pirólisis flash que se lleva a cabo en un tiempo < 1seg.

^b Flash-gas: gas producto obtenido a partir del tiempo de pirolisis de inflamación < 1 seg.

^c Hidropirólisis: pirolisis con agua.

^d Metanopirólisis: pirolisis con metanol.

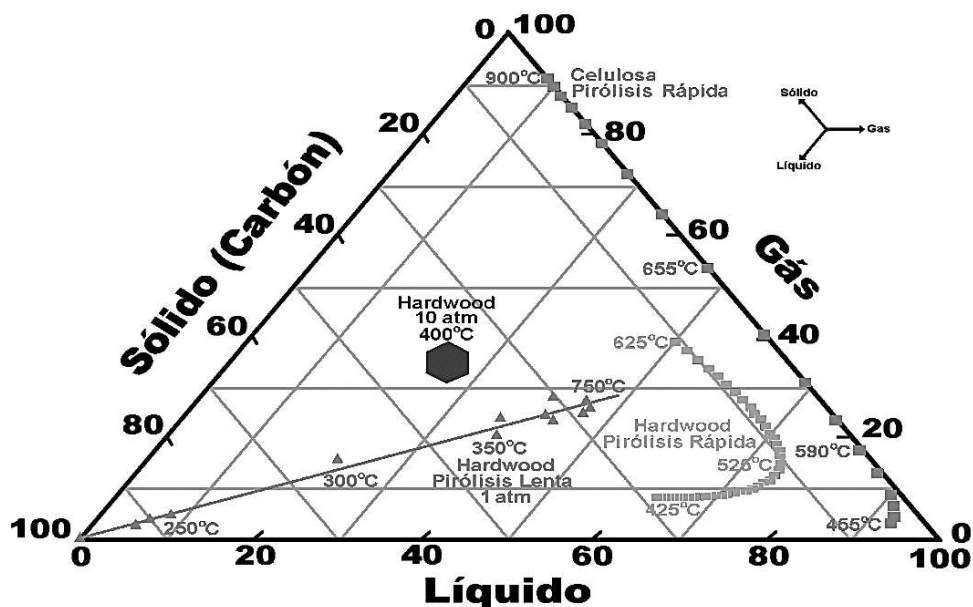
^e Ultra pirolisis: pirolisis con velocidad de degradación muy alta.

Fuente: Bridgewater, 1989 [3].

Las temperaturas empleadas en la carbonización son típicamente entre 350 y 500 °C. Mientras que la madera tiene un gran peso y su combustión produce una gran cantidad de humo, el carbón vegetal tiene un alto valor calórico, bajo peso y se quema sin humo. El carbón vegetal producido en 400 °C contiene aproximadamente 80 % de carbono fijo, 12-15 % de materia volátil, y 0,5-3 % de cenizas. Las cenizas presentes en el carbón vegetal proceden de la madera, y su contenido depende del tipo de madera, la cantidad de corteza, la contaminación con tierra o arena, etc. Además del carbón, son liberadas una fracción volátil que consiste en gases, vapores orgánicos y componentes de alquitrán. Estos componentes volátiles se pueden condensar en la forma de un aceite líquido (aceite piroleñoso). Los gases no condensables pueden ser quemados para producir energía térmica. La proporción de estos productos depende del tipo de biomasa, de la temperatura de carbonización, presión, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia en la zona de reacción.

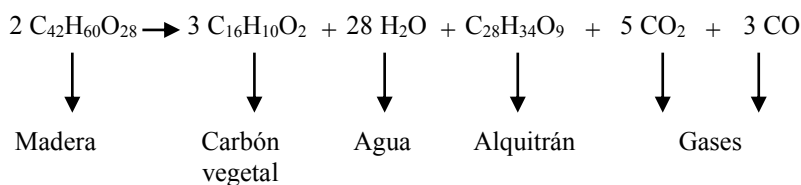
Muchos fenómenos físicos y reacciones químicas que ocurren durante el proceso de carbonización son una función de la temperatura del proceso. El proceso de pirólisis es un proceso químico bastante complicado que consiste en una serie compleja de reacciones paralelas y consecutivas que implican la formación de radicales intermedios, lo que resulta en la destrucción de la materia orgánica de la biomasa, la polimerización, condensación y aromatización de los productos. Hay una fuerte evidencia de que la mayor parte del carbono de la biomasa restante en el carbón proviene de las reacciones de descomposición de los productos secundarios formados durante la descomposición térmica de la madera. Otros factores que influyen en los productos de descomposición primaria y reacciones secundarias son: propiedades físicas y químicas de la madera, las dimensiones y la forma, el contenido de humedad, la velocidad de calentamiento, la presión externa, etc. La carbonización es un proceso físico-químico, los cambios físicos más comunes son los cambios de color, la aparición de grietas, la reducción del volumen, el aumento de la porosidad, la disminución de la densidad, la disminución de la resistencia mecánica y los cambios en la estructura cristalográfica.

Figura n.º 1. Triángulo de pirólisis



Fuente: Elaboración propia.

El proceso de carbonización teórico a 400 °C puede ser representado por la siguiente ecuación [4], donde $C_{42}H_{60}O_{28}$ y $C_{16}H_{10}O_2$ son composiciones de madera y carbón vegetal.

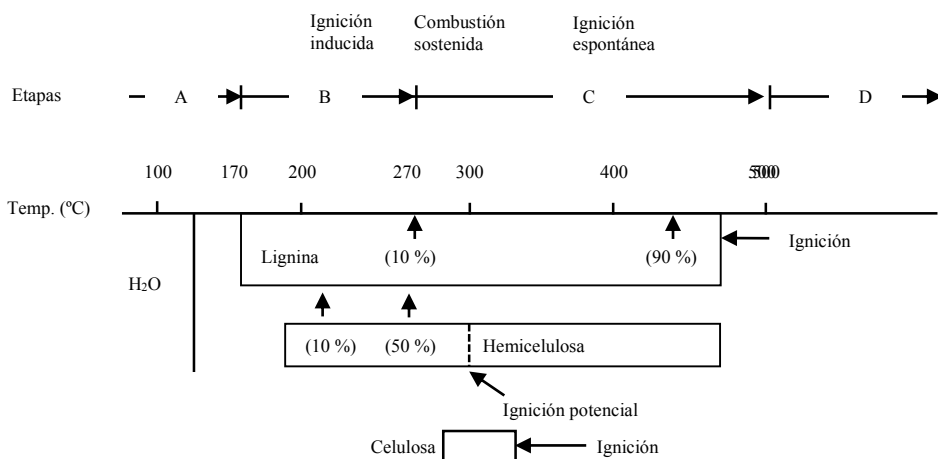


Esta ecuación es una simplificación del proceso de carbonización y no muestra todos los productos involucrados. El carbón producido a 400 °C tiene un contenido de carbono fijo de 82,1 %, y el rendimiento en masa es de aproximadamente 34,7 %. Se puede comprobar que la madera tiene 49,5 % de carbono, 44,0 % de oxígeno y el carbón vegetal 82,1 % y 13,7 %. Por lo tanto, la carbonización es sobre todo un proceso de concentración de carbono (1,7x) y de liberación de oxígeno. El carbón vegetal contiene alrededor del 57 % del carbono de la madera, siendo el resto se encuentra en el condensado y gas de

carbonización. 89 % del oxígeno de la madera es incorporado en los condensados y en los gases que son liberados.

De hecho, el proceso de carbonización es mucho más complejo que la que se muestra en la ecuación anterior. La biomasa contiene hemicelulosa, celulosa y lignina. La celulosa y la hemicelulosa son los azúcares que se descomponen generando componentes volátiles durante la carbonización. Una vez iniciada la pirólisis, la celulosa y la hemicelulosa son casi completamente descompuestas (volatilizadas) a 400 °C. La lignina es el componente más estable y se descompone más lentamente, siendo el principal contribuyente a la formación del carbono (carbono fijo) (figura n.º 2, tabla n.º 2).

Figura n.º 2. Etapas de la carbonización



Fuente: Elaboración propia.

La celulosa y la semicelulosa se separan inicialmente en forma de compuestos de bajo peso molecular denominada “celulosa activada”. La celulosa y la semicelulosa activada se descomponen térmicamente por reacciones concorrentes, consecutivas y bastante complejas que forman los volátiles (anhidro-azúcares), carbón y gases.

A pesar de que la carbonización a baja temperatura produce una mayor cantidad de carbón vegetal, este carbón tiene un alto contenido de materia volátil produciendo una combustión con llama y humo. Con la carbonización a temperaturas más altas, a pesar

de aumentar el contenido de carbono fijo del carbón, más hidrocarburos son liberados en los gases. Por encima de 500 °C comienza a la gasificación y la disociación del carbón producido, lo que disminuye el rendimiento en masa y energético de la producción de carbón, y disminuye la vida útil del equipo. Por lo tanto, la temperatura ideal de la carbonización debe estar dentro del rango de 380-450 °C, porque el carbón producido tiene buen carbono fijo ($\approx 84\%$) y el contenido de hidrocarburos en los gases es de alrededor de 49 %, con cantidades apreciables de alquitranes.

Tabla n.º 2. Etapas del proceso de carbonización de la biomasa

Fase	Temperatura	Energía
I Secado	20 a 110 °C	Endotérmico
La madera absorbe calor y se seca, liberando la humedad en forma de vapor de agua. La temperatura se mantiene alrededor de 100 °C hasta que la madera esté completamente seca. Una madera verde contiene de 50 a 70 % de agua que debe ser evaporado antes de que la temperatura de la madera se pueda aumentar.		
II	110 a 170 °C	Endotérmico
El contenido final de agua se libera, pocas reacciones importantes. Reacciones de deshidratación que implican los grupos -OH presentes en las moléculas de los polisacáridos.		
III Pre-Carbonización	170 a 270 °C	Endotérmico
Torrefacción. Aumento de la velocidad de reacción e inicio de la liberación de los volátiles. Pequeña eliminación de gases. La madera comienza a descomponerse, liberando CO, CO ₂ , ácido acético y metanol.		
IV Transición	270 a 290 °C	
Las reacciones de descomposición se mantienen y se convierten en reacciones exotérmicas.		
V Carbonización	290 a 380 °C	Exotérmica
La reacción se hace exotérmica (desprendimiento de calor). La reacción se convierte en auto-sostenible y la temperatura del medio aumenta debido a la liberación de calor a hasta 380-450 °C. El proceso de descomposición térmica acelera, liberando más calor, por lo que la temperatura no baja de ese valor mientras que la carbonización continúa. Es una etapa importante de reacciones de descomposición y gran eliminación de gases. La composición del gas cambia, disminuyendo los gases oxigenados y surgiendo un gas combustible que contiene CO, H ₂ , CH ₄ , CO ₂ y vapores condensables. La velocidad de descomposición alcanza su máximo a 360 °C (pico en la curva DTG). El residuo final de esta fase es el carbón vegetal con alto contenido de volátiles.		
VI Carbonización	380 a 500 °C	Exotérmica
Elevando la temperatura a 380 °C la transformación de la madera es casi completa, reduciendo la salida de gases. El carbon a esta temperatura contiene alto contenido volátil, alrededor de 30 % (masa). Para reducir el contenido de volátiles y aumentar el contenido de carbono fijo a aproximadamente 75 %, que es estándar para los carbones de buena calidad es necesario, un calentamiento adicional a cerca de 500 °C para completar la carbonización.		
VII Gasificación	> 500 °C	Exotérmica
Con el calentamiento del carbón por encima de 500 °C se inicia la gasificación y la degradación de carbón.		

Fuente: Elaboración propia.

EL PROCESO DE CARBONIZACIÓN EN LOS HORNOS USUALES

En la práctica usual la pirólisis es realizada en hornos con combustión interna. En tales hornos se introduce una cantidad controlada de aire para quemar una porción de la carga de madera (combustión), para calentar el horno y proporcionar energía para el secado, calentamiento y carbonización del resto de la madera. Este principio de funcionamiento se utiliza en los hornos más comunes: hornos de tierra y hornos de cerámica. Este proceso se denomina comúnmente la carbonización. En estos hornos se puede separar el proceso de producción de carbón en 4 etapas: combustión, secado, carbonización (pirólisis) y enfriamiento.

La carbonización comienza con la combustión parcial de la madera existente dentro del horno. Esta etapa proporciona calor para iniciar la carbonización de la madera. Los productos de combustión llevan el calor de la combustión para dentro del horno, calentando la madera, secándola y llevándola a la temperatura de carbonización. En estos hornos aproximadamente 10 a 20 % (masa) de la madera es consumida en la combustión.

La segunda etapa es el secado, cuando la madera comienza a calentarse y se libera el agua de la madera. Un calentamiento posterior libera el agua residual y lleva la madera a la temperatura de carbonización.

La tercera etapa es cuando se produce la carbonización. La carbonización se inicia a aproximadamente 270 °C, después que la humedad de la madera llega a cerca de cero, y es una reacción exotérmica resultante de la descomposición de la celulosa y la lignina. Como esta etapa es exotérmica, ya no es necesaria una la fuente de calefacción para continuar el proceso. La entrada de aire es parcialmente cerrada y el proceso de carbonización procede hasta que toda la madera se ha transformado en carbón. Los gases y compuestos volátiles producidos en la carbonización (ácido acético, agua, alcohol metílico, alquitrán, CO, CO₂, CH₄, H₂ y N₂) se liberan a la atmósfera, restando en el horno el carbón vegetal.

La etapa final, el enfriamiento se alcanza cuando la temperatura del carbón vuelve a la temperatura ambiente.

En los hornos de carbonización por lote, la carbonización y el enfriamiento se llevan a cabo en diferentes instantes, de forma que la energía liberada durante la carbonización

y el enfriamiento no se puede utilizar para el calentamiento y el secado. Además, como los compuestos volátiles no se recuperan, se utiliza menos de 50 % del contenido energético de la biomasa. El valor energético del gas es de aproximadamente 40 % de la energía de la madera original seca.

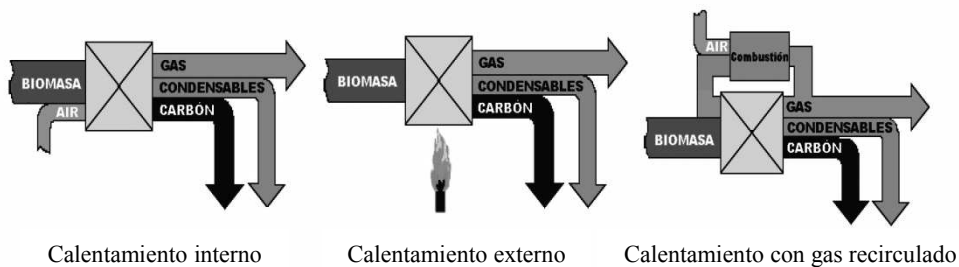
HORNOS Y TECNOLOGÍAS DE CARBONIZACIÓN

El uso generalizado de carbón vegetal a lo largo de la historia, ha permitido el desarrollo de diversos tipos de hornos de carbonización, y muchos todavía se utilizan en la actualidad. El primer método de producción de carbón vegetal fue probablemente el horno de tierra, que todavía se utiliza hoy en día, donde se coloca la madera en un agujero, cubierto con tierra y se quema lentamente.

En cuanto al método de generación de calor los hornos de carbonización pueden ser clasificados en (ver figura n.º 3):

- a) Calentamiento interno (combustión controlada del material);
- b) Calentamiento externo (cámara de combustión externa);
- c) Retorta (gases de recirculación o de calentamiento indirecto).

Figura n.º 3. Tipos de calentamiento del horno de carbonización



Fuente: Elaboración propia.

Los hornos de carbonización de calentamiento interno son los más comunes. La carbonización comienza con la introducción controlada de aire en el horno para quemar parte de la biomasa contenida y calentar el horno hasta que alcanza la temperatura de

carbonización. Una vez iniciada la carbonización, la entrada de aire es parcialmente cerrada y el proceso de carbonización continúa hasta que todo el combustible se ha transformado en carbón vegetal. Los gases y los volátiles producidos en la carbonización se liberan a la atmósfera. En estos hornos aproximadamente 10 a 20 % (masa) de la madera que se pone en el horno se consume en la combustión. Este es uno de los métodos más antiguos para hacer carbón vegetal y los hornos que funcionan sobre este principio son los hornos de tierra, hornos de ladrillos y hornos metálicos.

En los hornos de calentamiento externo, la combustión se realiza en una cámara de combustión externa al horno de carbonización. Los gases calientes de los productos de combustión se introducen en el horno para secar la madera y para la realización de la carbonización. Pueden ser quemados en esta cámara: corteza, ramas, alquitrán, aceite combustible o gas natural. Este sistema es de construcción un poco más cara y más complicada, pero tiene un mejor control de la operación, consume menos madera para iniciar el proceso de carbonización, y produce un carbón de mejor calidad y mayor rendimiento.

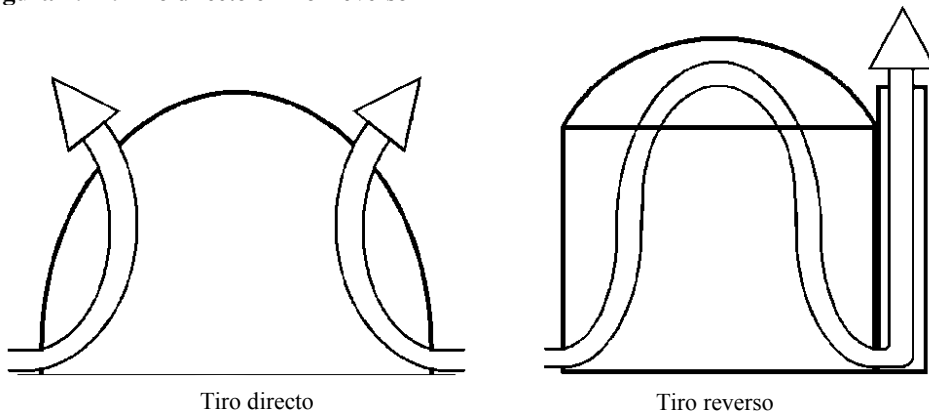
Las retortas son hornos que utilizan una fuente de calor externa para calentar la biomasa contenida en una cámara cerrada. Pueden ser de proceso continuo o por lotes. Permiten la recuperación de aceites volátiles y gases que son co-productos de la pirólisis, y también permiten un mejor control del proceso, y la producción de carbón de alta calidad con un alto rendimiento con un mínimo de emisiones. Las retortas continuas tienen la ventaja de reducir la mano de obra y aumentar de la producción de carbón vegetal y las desventajas de los altos costos de implementación, la velocidad de carbonización, la complejidad operativa, y la necesidad de una fuente de alimentación externa para mantener el proceso. Debido a la gran inversión en instalaciones a gran escala, no son económicamente viables si el único objetivo es la producción de carbón vegetal.

Los hornos de carbonización pueden tener 2 tipos de tiro natural (ver figura n.º 4):

Tiro directo: El aire entra a través de aberturas en el piso del horno y los gases son liberados por los agujeros en la parte superior. Como los humos producidos no pasan a través del lecho de pirólisis, no pueden ser craqueados o quemados. Como los condensables no se queman en el horno, este tipo de dibujo facilita la producción de condensables. Este tipo de dibujo facilita la ignición, pero no permite un fácil control

de la carbonización, que puede causar la quema de la carga. Cuanto mayor sea la temperatura dentro del horno, mayor es el tiro, lo que aumenta la entrada de aire, que a su vez aumenta la combustión y aumenta la temperatura del horno. Debido a este control inestable, si el horno no está supervisado de forma continua, en pocas horas se quema gran parte de la carga de madera en el horno. En general, ya que no se supervisa el horno de forma continua, especialmente a la noche, hay una quema de madera importante que resulta en un bajo rendimiento de carbonización.

Figura n.º 4. Tiro directo e Tiro Reverso



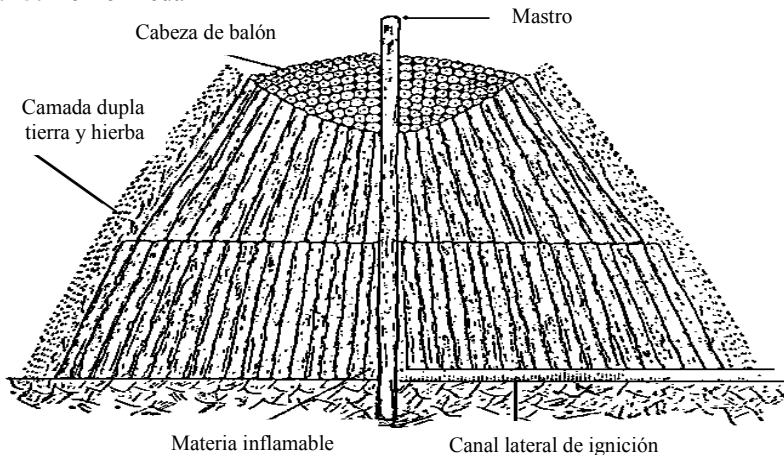
Fuente: Elaboración propia.

Tiro reverso: La toma de aire y extracción del humo se lleva a cabo en el nivel del piso del horno. Por lo tanto, los humos productos de la combustión (y carbonización) deben bajar antes de salir por la chimenea, y pasar a través de la carga del horno. Como el humo pasa en la camada de pirólisis antes de ser evacuado, los humos son parcialmente carbonizados, lo que aumenta el rendimiento de la carbonización. Este tipo de tiro produce un cierto grado de auto-control de la operación del horno. Si aumenta la combustión, mayor volumen de humo producido tiende a volver hacia las aberturas de entrada, lo que impide la entrada de más aire. Si la combustión disminuye, se produce una depresión en el interior del horno, causando más entrada de aire.

HORNOS DE TIERRA

El horno de tierra es el método más antiguo de producción de carbón vegetal, y probablemente el más extendido en todo el mundo. En este horno la madera a ser carbonizada se apila o se colocan en zanjias cavadas en el suelo y es completamente cubierta con tierra, dejando algunas aberturas para entrada de aire. No requiere inversión de capital y se construye en el sitio de la extracción de la madera. Sin embargo, requiere gran incorporación de mano de obra para cubrir las pilas de madera con la tierra y para limpiar el carbón de la tierra que cae sobre él durante la carbonización. El control de la carbonización de este horno es difícil y la eficiencia es muy baja, alrededor del 10 %. La evaluación de cientos de hornos tradicionales en África, encontró una la eficiencia de carbonización de 8-9 % [5], además de la contaminación del carbón por la tierra.

Figura n.º 5. Horno Meda



Fuente: Elaboración propia.

La versión brasileña del horno de tierra es el horno meda (figura n.º 5), que actualmente se encuentra en desuso. La construcción del horno meda comienza con el armado de una estructura de madera en forma circular de 40 a 50 m³ (balón) en una superficie plana y limpia. Entonces, se cubre la pila de madera con una cobertura de hierba, y sobre esta se coloca otra capa de 10-25 cm de tierra, dejando el frente abierto para iniciar el fuego. El tiempo de carbonización es de 8 a 12 días; el rendimiento en masa es 20 %, y la productividad 30 m³/hombre/mes [6].

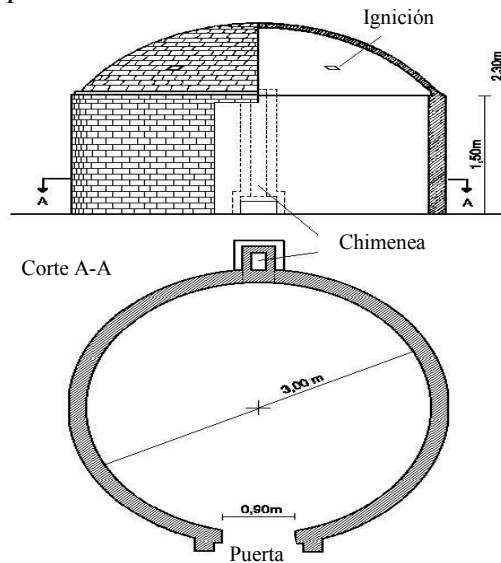
Los hornos meda utilizan gran cantidad de mano de obra, y requieren de atención y de reparaciones especialmente durante las primeras 24 horas, debido al peligro de que la camada de tierra se rompa y caiga, lo que permite la entrada de aire y la combustión de la madera, y la pérdida total de la misma. Los hornos de tierra son generalmente utilizados en las zonas pobres y sin recursos, y aún se emplean en los estados de Maranhão y Para.

HORNOS DE LADRILLOS

Los hornos de ladrillos pueden variar en forma, tamaño, número de chimeneas, etc. Los ladrillos se asientan sin cemento, con una mezcla de marga de arcilla y suelo arenoso. A menudo, los ladrillos se fabrican en el sitio de carbonización. El costo de la construcción es pequeño, el rendimiento es razonable y son fáciles de operar, lo que extendió su uso.

Más del 60 % de carbón vegetal de Brasil los producen pequeños productores en hornos de ladrillos del tipo Rabo-Quente (cola caliente). Este tipo es un simple horno semiesférico, construido con ladrillos cocidos y fijados con arcilla. Tiene una puerta de acceso, donde es hecha la carga de madera y descarga del carbón. La carga del horno es manual, la madera se corta en piezas entre 1,0 y 1,8 m de longitud y diámetro de 3 a 30 cm.

Como los hornos Rabo-Quente son de tiro directo, de difícil control, y semiesféricos de difícil carga, están siendo reemplazados por los hornos del tipo PP (figura n.º 6). El horno PP es un horno cilíndrico parabólico con una bóveda, construido con ladrillos cocidos y con lechada de arcilla, con una puerta, una entrada de aire y una chimenea (tiro reverso). El diámetro de la base es 3,00 m y una altura máxima de 2,30 m. La carga del horno es manual, la madera es cortada en piezas de 1,2 a 1,5 m de longitud y diámetro de 3 a 30 cm.

Figura n.º 6. Horno PP

Fuente: Elaboración propia.

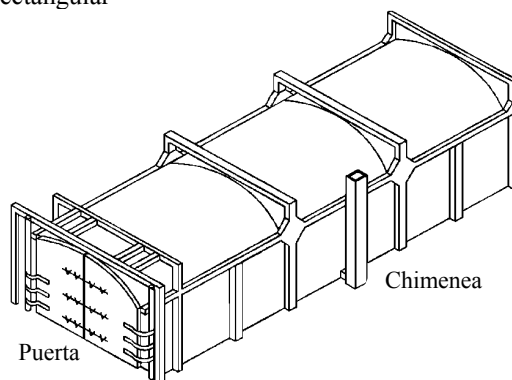
El encendido es realizado por las 4 aberturas de la bóveda, que son cerradas cuando comienza la carbonización. La operación de control es realizada por el cierre progresivo de la entrada de aire o de la chimenea. El progreso de la carbonización se mide por el color de los humos. Esta configuración permite una mejor carga del horno, facilidad de control y mayor rendimiento de carbonización. El ciclo de carbonización es de 6 días. Un operador maneja 12 hornos, y un horno (14 m^3) produce 22 m^3 carbón/mes.

HORNOS RECTANGULARES

Los hornos rectangulares fueron introducidos en Brasil en 1990 por Acesita. Su principal ventaja son las grandes dimensiones que permiten los camiones y tractores entrar en el horno para cargar la madera y descargar el carbón (figura n.º 7). Estos hornos son construidos con ladrillos y tienen una estructura de hormigón para apoyar la cúpula. Tienen varias entradas de aire y 1 chimenea. La puerta del horno es de metal recubierto con lana de cerámica o arcilla expandida. La carga de madera del horno puede ser llevada por un tractor. La descarga del carbón vegetal se realiza mediante tractores cargadores de ruedas directamente en un camión jaula de 100 m^3 . La carga se

realiza en 1 día, la carbonización y el secado en 5-6 días y el enfriamiento en 12-14 días. Algunos de estos hornos tienen un sistema de nebulización de agua (15.000 litros), lo que permite reducir el tiempo de enfriamiento a 6-7 días, pero el carbón se torna más frágil. Alrededor del 20 % de la madera puesta en el horno se consume para calentar la madera e iniciar el proceso de carbonización. Un sistema de instrumentación permite controlar el progreso de carbonización y la entrada de aire falso. Estos hornos tienen un sistema de recuperación de alquitrán y aceite piroléñoso.

Figura n.º 7. Horno rectangular



Fuente: Elaboración propia.

La gran ventaja de estos hornos en relación con los hornos de ladrillos es la producción de hasta 70 toneladas de carbón/mes, y el menor empleo de mano de obra. Sin embargo, debido a las grandes dimensiones, la carbonización no es homogénea, y el carbón vegetal tiene diferente calidad de acuerdo con la posición en el horno: desde madera no carbonizada en el piso, hasta carbón con carbono fijo de 80 % en la parte superior. En promedio, el horno rectangular produce carbón con carbono fijo 78 %, rendimiento en masa de 30 a 35 % y se recuperan 84 kg alquitrán por tonelada de carbón. El coste medio de construcción es US\$ 25.000.

COMPARACIÓN DE LOS VARIOS TIPOS DE HORNOS DE CARBONIZACIÓN

Una comparación de los varios tipos de hornos de carbonización (tabla n.º 3) reveló algunos resultados interesantes. Los hornos de tierra son la tecnología más rudimentaria;

de-mandan una menor inversión inicial, pero tienen menor rendimiento de carbonización, y son mano de obra intensivos.

Los hornos de ladrillos son simples, de fácil construcción y operación, además de la baja inversión que suponen. Pueden ser construidos y operados cerca de la operación forestal, lo que permite la reducción de los costos de transporte. Pueden ser desmantelados y los ladrillos utilizados en la construcción de un nuevo horno. Producen un carbón con rendimiento y calidad comparables a los producidos por las grandes retortas. La carga de la madera y descarga de carbón se realizan de forma manual, lo que implica un trabajo intensivo de mano de obra no calificada. Como no hay recuperación de alquitrán, hay una gran emisión de contaminantes.

Tabla n.º 3. Comparación de los Procesos de Producción Carbón Vegetal [7]

Proceso	Costo u\$s	Producción m ³ /mes	Rendimiento % masa	Tiempo días	Vida útil años
Horno de tierra	0	30	10-22	30	0,1
Horno de ladrillos	130	18-22	22-28	5-7	3
Horno rectangular	2500	220	28-30	12-14	10
Retorta Lambiotte	9.000.000	650	30-35	continuo	30

Fuente: Elaboración propia.

Los hornos rectangulares permiten la mecanización de la carga y descarga, lo que minimiza el uso de mano de obra. La instalación de un sistema de recuperación de alquitrán y aceite piroleñoso permite una mayor eficiencia energética y generan un menor impacto ambiental.

CONCLUSIONES

En Brasil, los hornos de ladrillos con calentamiento interno son los más comunes. La eficiencia del proceso y la calidad del carbón dependen de las condiciones locales, del tipo de biomasa, condiciones climáticas y sobre todo de la experiencia del operador. Los hornos de ladrillos utilizados en Brasil tienen un rendimiento en masa de 25-30 %, mucho mayor que los utilizados en otras partes del mundo, el 10-15 %.

El control de la carbonización en los hornos depende exclusivamente de la experiencia del operador. Estos hornos no tienen ningún control de presión o temperatura, ni siquiera una simple medición. La operación de carbonización se realiza sin base científica, y se vincula directamente al conocimiento empírico del operador. Hay una dificultad en la normalización de la rutina de operación en los hornos de ladrillos, debido al gran número de variables que intervienen. Las bajas eficiencias logradas en la práctica pueden ser aumentadas considerablemente mediante la mejora de los hornos existentes y la mejor formación de los operarios.

La mejora de la eficiencia de los hornos no requiere gran inversión de capital; pero, es necesario garantizar una mejor comprensión y control del proceso de carbonización. Sin embargo, hay una dificultad en la aplicación de nuevas tecnologías debido al costo para mejorar el horno, el empirismo con la que se lleva la carbonización (el color del humo, la temperatura de la pared externa, la apariencia de las entradas de aire, etc). El secado de la madera, la instrumentación de mejores métodos de tiro, y un mejor control del proceso, combinados con el uso de chimenea para forzar el tiro reverso, pueden aumentar la eficiencia de la carbonización de 20 a 30 %.

La industria del carbón vegetal ofrece muchos puestos de trabajo no calificados en Brasil. Se estiman 186.000 puestos de trabajo directos e indirectos, de los cuales 127.000 corresponden a la producción y el transporte de carbón, cantidad comparable al empleo generado en los sectores de la industria y la minería.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EPE Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional BEN 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro, Empresa de Pesquisa Energética EPE, 2016, 292 págs.
- [2] IBGE. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2015. IBGE, 2016.
- [3] Bridgewater, A. V. "Pyrolysis Technologies and Cost". In: Energy from Biomass. Proceedings of 3th Contractor's Meeting Paestum, 25-27 May 1988, Elsevier, 1989, pp. 620-627, v.4.

- [4] Klason, P.; Heidenstam, G. y Norlin, E. Untersuchungen zur Holzverkohlung. I. Die trockene Destillation der Cellulose. *Z. Angewandte Chemie*, v.22, n.º 25, 1909, p.1205-1214.
- [5] Van der Plas, Robert. “Burning Charcoal Issues”. *FPD Energy Note*, n.º 1, Abril 1995.
- [6] Baêta, Galileu Pereira. “Produção de Carvão de Madeira em Minas Gerais”. *Boletim da Associação Brasileira de Metais*, v.2, n.º 2, pp. 101-116, Janeiro 1946.
- [7] Pinheiro, Paulo César da Costa. *A Produção de Carvão Vegetal: Teoria e Prática*. Belo Horizonte: Edição do Autor, 2010, 120 p.

Paulo Cesar da Costa Pinheiro

Se graduó de Ingeniero Mecánico en el Instituto de Tecnología de Governador Valadares, Brasil, en 1979, recibió el título de Master en Ingeniería Térmica en la Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil, en 1982 y recibió el título de Doctor en Ingeniería de Procesos Industriales en la Université de Technologie de Compiègne, Francia en 1987. Realizó estadía académica en China, Israel y Japon. Desde 1982 es profesor Titular en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, Belo Horizonte, Brasil, en las cátedras de Termodinámica, Transmisión de Calor, Instrumentación y Energías Renovables. Tiene más de 100 trabajos científicos publicados en conferencias internacionales y revistas. Sus principales intereses incluyen Carbonización y Combustión de la Biomasa, Simulación computacional de equipos térmicos y Enseñanza de Ingeniería.

<http://lattes.cnpq.br/483543963873198>