



PLANTA DEMOSTRATIVA DE COQUIZACION CON UTILIZACION DE LA ENERGIA DE LOS GASES Y MINIMA CONTAMINACION

Miguel Armando Briceño Guerrero.
 Profesor Asociado, Departamento de
 Diseño Mecánico, Materiales y Procesos
 Universidad Francisco de Paula Santander.

EQUIPO DE TRABAJO:

CARLOS CASADIEGO (Director), PEDRO ANTONIO PEREZ ANAYA, PEDRO ROJAS GUALDRON, SEGUNDO RUGE RONCANCIO, JORGE MEDINA ESCOBAR, MIGUEL ARMANDO BRICEÑO GUERRERO, Tecnóloga ANSELMA YAÑEZ - Investigadores U.F.P.S.

INTRODUCCION

El coque es un material sólido, combustible y poroso, producto de la calcinación en ausencia de oxígeno de algunos tipos de carbón mineral. Se utiliza en la producción de fundición, arrabio, acero y carburo de calcio, también sirve como material de empaque en la producción de ánodos y conductor para descargas eléctricas.

La producción de Coque en Colombia se realiza principalmente en hornos tipo colmena debido a los bajos costos de inversión. (Ver tabla 1)

Esta tecnología de producción es altamente contaminante, y no utiliza la enorme cantidad de energía que se produce durante el proceso de coquización.

Las nuevas disposiciones ambientales y el interés de la Empresa Colombiana del Carbón (ECCO) por presentar a los Industriales del país alternativas de solución que permitan disponer de una tecnología limpia en la producción de Coque con baja inversión, utilización de la energía de los gases y mejoramiento de la competitividad, hicieron posible a la Universidad Francisco de Paula Santander desarrollar este proyecto.

Se construyó una Planta Demostrativa de Producción de Coque que genera mínima contaminación y utiliza la energía de los gases en la producción de ladrillo, con el fin de mostrar a los productores de coque del país la tecnología apropiada para descontaminar las plantas productoras de coque en hornos tipo colmena.

TABLA 1. Comparación de características y rendimientos de diferentes tipos de hornos.

HORNO	t /h	t / k	T / k	Inv.	Cont.	Rel
Pampa	2	15	700	\$ 1,6	muy alto	2/1
Colmena	4	2	1.000 - 1.200	\$ 19	alto	1.5/1
Solera	10	1	1.000 - 1.100	\$ 53	alto	1.45/1
Vertical	50	1	900 - 1.100	\$ 225	bajo	1.4/1

t/h : Tonelada de coque/hombre día

t/k : Tiempo de coquización (días)

T/k : Temperatura de coquización (°C)

Inv. : Inversión por ton/día (Dólares)

Cont.: Grado de contaminación comparativo

Rel : Tonelada de carbón/Tonelada de Coque

Al mismo tiempo se utilizó la Planta para ensayar métodos y procesos de producción más económicos y eficientes, tales como: Sistemas de transporte de carbón, Cargue y descargue de hornos, Mezcla de carbones, y utilización de la energía aprovechable de los gases.

METODOLOGIA

El equipo de trabajo diseñó la Planta de Coquización de acuerdo al esquema que se muestra en la Figura 1.

Batería de hornos colmena: Se utilizó el diseño convencional de forma cilíndrica con un diámetro de 3 mts. y bóveda semiesférica. El diámetro en la boca de salida de gases es de 0.3 mts. Cada horno tiene capacidad de producir 2 toneladas de coque por cada 3 toneladas de carbón, en un proceso que dura de 46 - 48 horas; la disposición por parejas conforma una batería de 6 hornos.

Ductos de recolección de Gases: Se tomaron como parámetros de diseño los resultados del estudio adelantado por el Instituto de Higiene Ambiental y Salud Ltda. en la empresa INCOLMINE Ltda.,

la cual cuenta con hornos de características similares a los construidos en la planta. (Ver tabla 2). Con base en estas mediciones se calculó el flujo promedio de gases en cada horno ($0.483 \text{ m}^3/\text{seg}$).

"Se construyó una Planta Demostrativa de Producción de Coque que genera mínima contaminación y utiliza la energía de los gases en la producción de ladrillo".

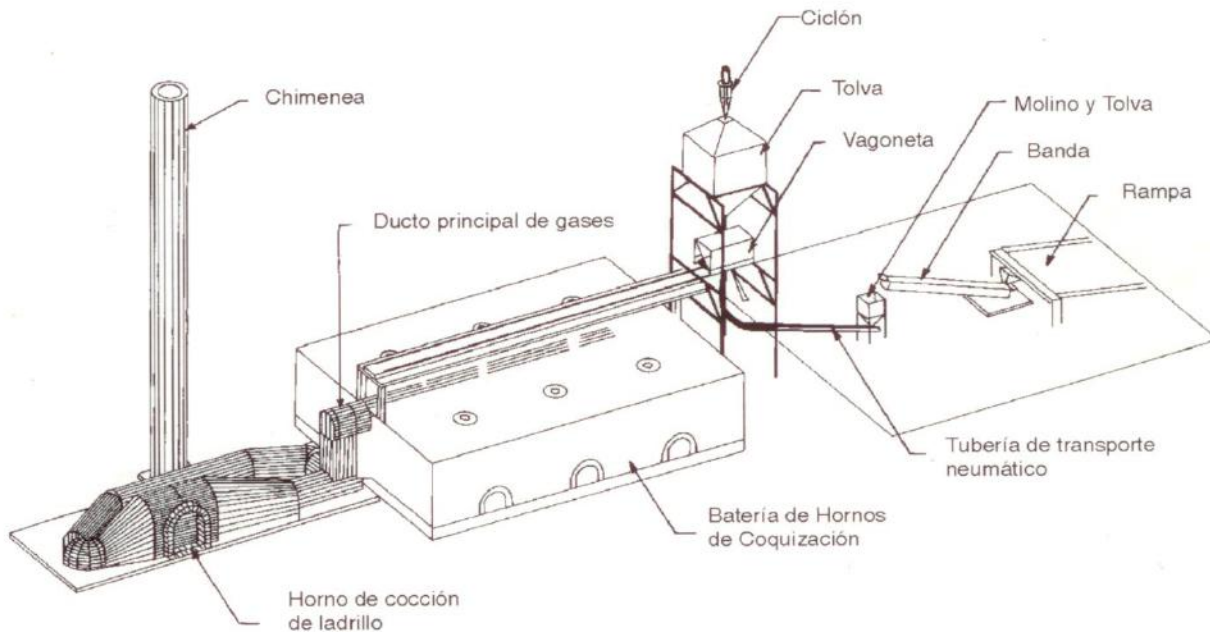


FIGURA 1. ESQUEMA PLANTA DE COQUIZACION

TABLA 2. Flujo de Gases de los hornos (Pie^3/min)

HORNO 1		HORNO 2		H1 + H2
HORA	FLUJO	HORA	FLUJO	
8 A.M.	932.83	9 A.M.	1035.17	1968.00
10 A.M.	736.52			
12 M	884.37	12 M	876.50	1760.87
2 P.M.	946.71			
4 P.M.	1171.70	3 P.M.	838.87	1898.07
6 P.M.	1176.13	6 P.M.	864.94	2041.07
8 P.M.	1095.44			
10 P.M.	1088.30	9 P.M.	843.29	1935.16
12 A.M.	984.74	12 P.M.	790.89	1775.63
2 A.M.	1078.70			
4 A.M.	1029.26	3 A.M.	821.89	1875.87
6 A.M.	1184.74	6 A.M.	867.35	2052.09

Ductos Primarios: Van desde la boca de cada horno al ducto principal, con una inclinación de 30° respecto al eje del Ducto Principal; tienen una longitud de 3 mts., área transversal de 0.706 m^2 , la cual permite mantener una velocidad de los gases de 6.84 m/sg reduciendo al mínimo el enfriamiento. El área de paso del gas tiene la forma que se muestra en la Figura 2. La transmisión de calor es de $821.43 \text{ KCal/m}^2\text{h}$ aproximadamente, con una variación de temperatura de 4.14° C/m y un cambio de presión de 1.39 Lb/pie^2 .

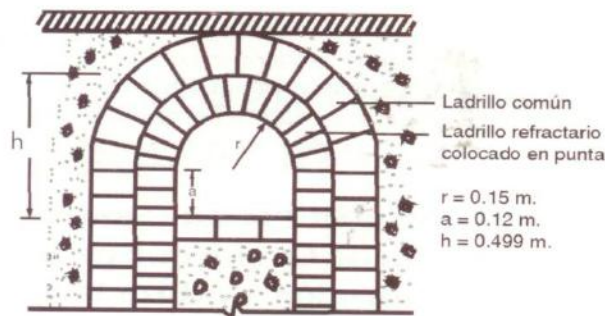


Figura 2. Corte ducto primario

Ducto Principal: Recoge los gases provenientes de los hornos a través de los ductos primarios. Se consideró que allí se alcanzan temperaturas del orden de 1000°C produciéndose una postcombustión de los gases de combustión del carbón. La tabla 3 muestra el porcentaje volumétrico, calor específico y densidad de los gases presentes.

TABLA 3. Composición de los gases (Ducto Principal)

	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O
Vol (%)	6.54	6.05	72.4	16.68
Cp (Kcal / Kg°C)	0.270	0.247	0.266	0.510
ρ (Kg / m ³)	0.8938	0.6504	0.2851	0.2579

El área del ducto varía en la medida en que se incorporan, al flujo del ducto principal, los gases provenientes de los ductos primarios, está variación permite mantener la velocidad en 6.84m/sg; para efectos de construcción se mantiene la parte cilíndrica constante y el área rectangular se modifica bajando la base del ducto (Figura 3). Se calculó una transmisión de calor aproximada de 2138 KCal/m²h, una variación de temperatura de 3.9°C/m, un cambio de presión de 25,5 mm H₂O para una longitud de 10 mts., asumiendo una temperatura externa de 100°C y una interna de 1000°C.

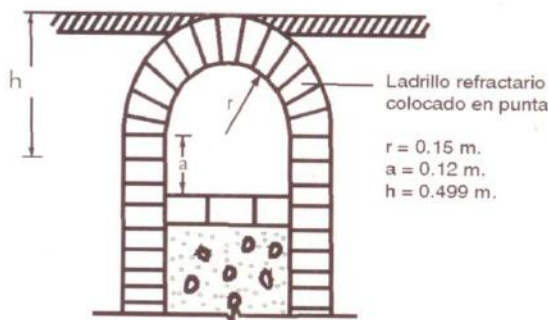


Figura 3. Corte ducto principal

Sistema de procesamiento y manipulación del carbón: Consta de un patio de almacenamiento de carbón crudo, una rampa de cargue, banda transportadora, un molino de martillos y un sistema neumático de transporte de carbón molido.

El transportador neumático consta de una pequeña tolva (600 Kg), un dosificador que regula el paso de carbón molido (granulometría en un 90% menor de 3 mm), un ventilador que impulsa el carbón molido a través de una tubería de 9" de diámetro hasta un ciclón. En el ciclón se separa el aire del carbón y este cae en una tolva, situada a 13 mts. de altura y con capacidad de 12 toneladas, la cual provee a una vagoneta y de 800 Kg de capacidad, de la materia prima requerida para el cargue de los hornos; la vagoneta se desliza sobre rieles a lo largo de la batería y suministra el carbón mediante un ducto que se acopla a la boca de cada horno.

Horno de cocción de ladrillo: Se adaptó el diseño del Horno vagón utilizando un túnel rectangular en su base y cilíndrico en la cúpula, con una inclinación que permite la expansión de los gases; se debe cuidar que el área libre entre los ladrillos encarrados sea aproximadamente igual al área del ducto principal, para mantener la velocidad de los gases que llegan al horno con una temperatura promedio de 1100°C. El horno está provisto de un by-pass que permite el paso de los gases calientes hacia la chimenea cuando se hace la operación de cargue y descargue a través de una puerta lateral. El horno tiene una capacidad de 3000 ladrillos (25.2 x 12.1 x 6.45 cms.) para un tiempo de cocción de 72 horas de acuerdo a la curva de cocción (Figura 4).

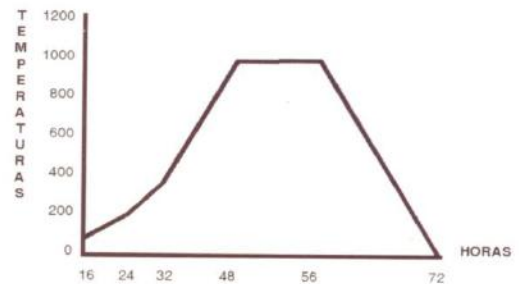


Figura 4. Curva de Cocción del ladrillo.

El horno construido con una doble hilera de ladrillo tiene las dimensiones siguientes: ancho de 1.5 m., altura de 1.90 m y longitud de 3 m., el radio de la bóveda cilíndrica es de 0.75 mts. Para garantizar la obtención de la curva de cocción, el ducto de gases está provisto de una compuerta que regula la entrada de los mismos al horno; además se construyó un ducto de entrada de aire, el cuál atraviesa longitudinalmente la batería de hornos, en su parte baja, y suministra por la parte inferior del horno de cocción, aire precalentado.

Chimenea: La altura de chimenea, según el manual de HUTTE esta dada por:



$$Z = H (\rho_a - \rho_g) - 1/100 (\rho_g / 2g) (HK^{0.341} / d_i^{1.314}) Vg^2 - \rho_g (Vg^2 / 2g) \text{ mm H}_2\text{O} \quad (a)$$

- donde:
- Z = Tiro de la chimenea (mm H₂O).
 - H = Altura de la chimenea en (m).
 - d_i = Diámetro interno de la chimenea (m).
 - Vg = Velocidad del gas en la chimenea (m/s).
 - K = Constante, 10 para paredes de ladrillo sin revestir.
 - ρ_a = Densidad del aire a condiciones de la planta (1.15 Kg/m³ - 1 atm - 30°C).
 - ρ_g = Densidad del gas a condiciones de la planta (0.4531 Kg/m³ - 1 atm - 30°C).

El cálculo de las pérdidas, desde el horno más lejano hasta la chimenea, correspondiente a fricción, aditamentos y empuje ascensional de los gases alcanza un valor de 12.108 mm H₂O, la pérdida de energía a través del horno de ladrillo es de 1.94 mm H₂O. El cálculo de la temperatura de gases en la base de la chimenea tiene en cuenta las transferencias de calor por conducción, convección y radiación en el ducto, las cuales suman 2445.08 Kcal/h m².

Manteniendo la velocidad del gas Vg = 6.84 m/s y conservando el área de salida del ducto principal igual a 0.396 m² se obtiene la variación de temperatura con relación a la longitud mediante la ecuación:

$$\frac{dT}{dX} = \frac{4q}{U_o r \rho C_p} \quad (b)$$

- donde:
- q = Transmisión de calor (Kcal/h m²).
 - U_o = Velocidad del gas en el centro del ducto (2Vg = 13.68 m/s).
 - r = Radio equivalente del cilindro al ducto (0.355 m).
 - ρ = Densidad promedio (0.3041 Kg/m³)
 - C_p = Calor específico promedio (0.310 Kcal/Kg°C)

Los valores de ρ y C_p se calculan con base en la tabla 3; de la ecuación (b) se obtiene una variación de temperatura de 6.17°C/m, esto hace que al finalizar el recorrido de 18 mts., la temperatura en la base de la chimenea sea de 850°C.

Lo anterior solo tiene en cuenta el manejo del gas, pero la chimenea también debe succionar aire caliente de precalentamiento del horno y aire frío cuando se descarga el horno de cocción; se calculó este flujo adicional de masa de aire. Se

obtiene finalmente una temperatura de chimenea (base) de 660°C y una velocidad de gases de 2.99 m/s para un diámetro interno de 1 metro.

Reemplazando en la ecuación (a) tenemos:

$$H (1.15 - 0.4531) - (1/100) (0.4531/2g) (H (10)^{0.341} / (1.0)^{1.314}) (3)^2 - 0.4531 (3)^2 / 2g = 12.108 + 1.940.6934 H = 14.248 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$H = 20 \text{ m.}$$

La chimenea, recubierta con lámina, se construyó hasta una altura de 15 mts. por razones económicas, obteniéndose un tiraje adecuado para los gases manejados.

Obras complementarias. Se diseñó una pequeña planta de tratamiento de agua, utilizando finos de coque con muy buenos resultados; es de anotar que el agua se bombea desde el río Pamplonita en un tramo donde la contaminación es máxima. Se construyó una vía de acceso de unos 50 Mts. que permite la entrada y salida de vehículos de carga. Se dotó a la Planta de la energía eléctrica necesaria para el manejo de equipos, e iluminación, instalándose un transformador trifásico de 30 KVA.

La Planta también cuenta con oficinas para la administración y las obras sanitarias adecuadas.

Operación. La planta inició operaciones en noviembre de 1995 manteniendo una continua producción. De acuerdo al flujograma (Figura 5), las operaciones principales son:

- Recepción, molienda y homogenización del carbón.
- Transporte neumático de carbón molido.
- Cargue de hornos mediante vagoneta.
- Proceso de coquización (Recolección y conducción de gases).
- Cocción de ladrillos.
- Descargue de hornos de coquización y de horno de cocción de ladrillos.
- Expulsión de gases por la chimenea.

RESULTADOS

Disminución de la contaminación ambiental: El ducto construido cumple satisfactoriamente su objetivo de realizar una postcombustión de los gases de coquización, el resultado es una mínima emisión de humos, con niveles de contaminación por debajo de los permitidos y ausencia de monóxido de carbono.

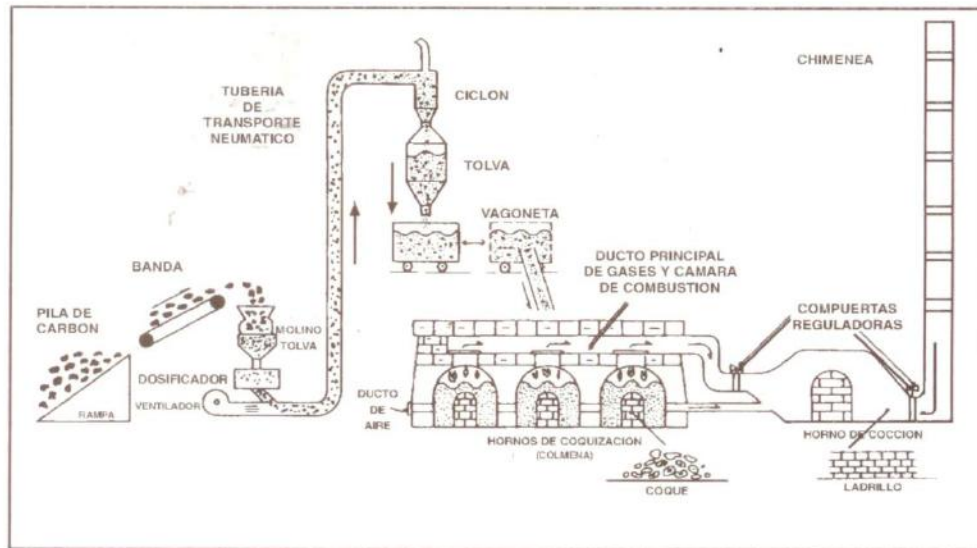


Figura 5. Planta Demostrativa de Producción de Coque

La utilización de transporte neumático de carbón, elimina en gran parte la contaminación por arrastre de finos e impalpables; se espera completar un sistema cerrado (hidrociclón-mangas), mejorar el sistema de cargue (Tolva-Vagoneta-Hornos) e implementar campanas para recolectar el vapor de agua, durante el apagado de los hornos, y así garantizar una planta completamente limpia.

Los productos obtenidos en el horno de cocción presentan un color más uniforme que los cocidos en horno de llama invertida, esto se debe a la pureza de los gases utilizados. Las características físicas del material cocido se presentan en la tabla 5.

UTILIZACION DE LA ENERGIA DE LOS GASES

Las temperaturas alcanzadas superan las expectativas más optimistas y garantizan una disponibilidad de gases con temperaturas entre 1000°C - 1200°C, a la salida del ducto principal, asegurando la cocción de ladrillos. (Tabla 4).

La combustión de los gases de coquización es casi completa y los ductos permanecen limpios; las altas temperaturas hacen conveniente realizar ajustes de construcción para mejorar el aislamiento térmico y utilizar adecuadamente el calor de radiación.

TABLA 4. Temperatura a la salida del ducto principal

Med.	T _{em} (°X)	Med.	T _{em} (°X)	Med.	T _{em} (°X)	Med.	T _{em} (°X)
1	995	6	1043	11	1165	16	1072
2	1030	7	1035	12	1051	17	1089
3	1099	8	1037	13	1043	18	1075
4	1076	9	1103	14	1054	19	1062
5	1065	10	1162	15	1068	20	962

* Las mediciones se hicieron cada dos horas (Temp. promedio = 1064.3°C).

TABLA 5. Características físicas del material cocido.

ENSAYO	LADRILLO DE OBRA	TABLETA COLONIAL
ABSORCION	118%	9.9%
MEDIDAS (cms)	25.2 X 12.1 X 6.45	25.3 x 25.5
PESO	3.662 gr.	3.193 gr
CARGA A LA FLEXION	270 Kg f	220 Kg f

La energía liberada en el proceso de combustión y postcombustión de los gases de coquización (CO₂, CO, O₂, H₂O, N₂, CH₄, H₂, SO₂, HC, NO₂), por horno, se muestra en la tabla 6 indicando la hora de operación y la temperatura de los gases en la boca del horno.

Los resultados de la tabla 6 indican la gran cantidad de energía que puede aprovecharse para diversidad de usos industriales, más aún si se tiene en cuenta que una batería normal se compone de 26 hornos.

Producción del Coque. El carbón utilizado en la planta proviene de minas de la región, en cuanto a su granulometría el 90.3% pasa Tamiz de 2.00 mm.

TABLA 6. Energía liberada en el proceso de coquización por un horno.

HORA DE OPERACION																		
H2	H4	H6	H8	H10	H12	H14	H16	H18	H20	H22	H25	H28	H31	H33	H37	H40	H43	
TEMPERATURA DE LOS GASES EN LA BOCA DEL HORNO																	PRO	
690	890	1181	1174	1245	1190	1198	1110	1062	1025	1001	937	940	831	749	613	545	502	937.9
ENERGIA DE LOS GASES DE COQUIZACION (Miles de Kcal)																	SUM	
134	233	358	351	395	407	396	319	294	314	312	448	397	317	267	226	199	185	5.552
ENERGIA PRODUCIDA EN LA POST-COMBUSTION DE LOS GASES (Miles de Kcal)																	SUM	
454	423	671	443	359	422	313	135	104	87	57	37	11	0	0	0	0	0	3516
ENERGIA TOTAL LIBERADA EN EL PROCESO DE COQUIZACION POR UN HORNO (Miles de Kcal)																	SUM	
588	656	1029	794	754	829	709	454	398	401	369	485	408	317	267	226	199	185	9.068

El análisis del carbón molido es el siguiente:

Humedad residual	=	0.80%
Cenizas BS	=	6.39%
Materia Volátil BS	=	36.7%
Carbono Fijo BS	=	56.91%
Índice de Hinchamiento (FSI)	=	7 1/2
Poder Calórico	=	7993 cal / gr.
Azufre	=	0.77%

Con carbón de las características señaladas anteriormente se produce un coque común y un coque especial (procedimiento en prueba) que arrojan las características de la tabla 7.

La utilización de carbón molido con tamaños de grano inferiores a 2mm favorece notablemente la calidad del coque y mejora sustancialmente su resistencia.

ANALISIS ECONOMICO

Para realizar una aproximación a las ventajas económicas que resultan de utilizar el diseño de la planta se presenta el costo de producción de una tonelada de coque en una planta convencional:

Preparación del carbón	\$ 3.805
Operación de Hornos	\$ 6.403
Materia prima	\$ 30.000
Transporte interno	\$ 961
Suministro de agua	\$ 419
Control de calidad	\$ 840
Herramientas y equipo	\$ 48
Mantenimiento	\$ 899
Administración (Producción)	\$ 181
Administración General	\$ 2.493
Subtotal	\$ 46.049
Imprevistos (5%)	\$ 2.302
Total	\$ 48.351

TABLA 7. Análisis de coque producido en la planta.

	HUMEDAD RESIDUAL %	% CENIZAS B.S.	% M. VOLATIL B.S.	% CARBONO FIJO B.S.	MICUM
COQUE COMUN	0.29	9.07	1.16	89.77	M + 40 = 41.5 % M - 10 = 9.7 %
COQUE ESPECIAL	0.32	9.85	1.09	89.06	M + 40 = 52.6% M - 10 = 6.4%



Si la energía recuperada diariamente por horno de coquización es de 3.516.000 Kcal podemos fácilmente hacer la equivalencia a Kg de carbón utilizables, basados en el poder calorífico del carbón (8000 Kcal/Kg). El resultado es una disponibilidad equivalente a 439.5 Kg de carbón diarios por horno, lo cual representaría un ahorro de \$8.790 por tonelada de coque producida.

Con la energía disponible en esta cantidad de carbón se podrían calcinar teóricamente 2930 Kg de arcilla (se requieren 1200 Kcal para calcinar 1 Kg de arcilla), lo cual equivaldría a la cocción de 800 ladrillos de 3.66 Kg de peso cada uno.

Lo anterior muestra claramente que los costos para la producción de ladrillo en un horno de cocción como el propuesto, no incluirían la materia prima necesaria para la producción de energía lo cual significa una economía verdaderamente importante.

"La Energía recuperada diariamente por horno de coquización es de 3'516.000 Kcal".

GENERACION DE NUEVOS PROYECTOS

La planta piloto construida, ha generado el desarrollo de múltiples proyectos, y se ha convertido en un laboratorio a escala industrial para los empresarios del carbón. Actualmente se optimizan los procesos, se ensayan mezclas de carbón y se miden las emisiones; así mismo se preparan proyectos para generación de energía eléctrica y recuperación de subproductos. El desarrollo Tecnológico alcanzado ha sido patentado por ECOCARBON y ya se están construyendo plantas con este nuevo diseño.

BIBLIOGRAFIA

- INSTITUTO HIGIENE AMBIENTE Y SALUD LTDA. Evaluación Isocinética de Gases en Hornos de Coquización (INCOLMINE). Cúcuta 1994.
- CAMARGO ELIZABETH. Evaluación Isocinética de Gases en Hornos de Coquización (CARBOEXCO). Cúcuta 1994.
- ERECOS. Manual de ladrillos refractarios. Medellín. 1993.
- KLAUS URBANEK. Mediciones realizadas por LGA de Baniera. Bogotá 1995.
- KARLEKAR B.V. Transferencia de calor. Editorial Interamericana.
- TRINKS. W. Hornos Industriales. Vol I. Editorial URMO.
- HÜTTE. Manual del Ingeniero. Editorial Gustavo Gili. 1986.
- ECOCARBON. Coquización con utilización de la energía de los gases y mínima contaminación. 1996. Revista.
- CASADIEGO, PEREZ, BRICEÑO, MEDINA, RUGE, ROJAS, YAÑEZ. Planta de Coquización con utilización de Energía de los Gases Cúcuta. 1994. INFORMES