

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO MEDIANTE ACTIVACIÓN FÍSICA A PARTIR DE CUESCO DE COCO (*Cocos nucifera* L.)

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

FAUSTO GIOVANNY MOSCOSO PINTO

fmoscospinto@gmail.com

DIRECTOR: ING. ERNESTO DE LA TORRE

ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Quito, agosto del 2013

© Escuela Politécnica Nacional (2013)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Fausto Giovanni Moscoso Pinto, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Fausto Giovanni Moscoso Pinto

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Fausto Giovanni Moscoso Pinto, bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre Chauvín
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto (DEMEX-PIS 01-10), que se ejecutó en el Departamento de Metalurgia Extractiva.

AGRADECIMIENTO

A Dios, motor de mi vida, por estar a cada momento y en cada paso que he dado. Por apoyarme en los momentos difíciles y nunca dejarme rendir para alcanzar mis sueños.

A mi familia, apoyo incondicional siempre, por enseñarme que el cielo es el límite. Que no hay nada imposible en la vida y por aprender junto a ellos las cosas más importantes: responsabilidad, fe, unión pero más importante que todo, amor.

A todas las personas que de alguna u otra manera han formado por estos 6 años parte de mi vida: mis compañeros de clases, mis amigos IBEQUIS, los históricos, los amigos del cole que han estado ahí a pesar de mi ingratitud y falta de tiempo.

A mi familia DEMEX, que en este corto periodo de tiempo han demostrado un mito que hasta ahora nunca he creído, la universidad es como el segundo hogar, gracias por ayudarme, soportar mi modo de ser. Ustedes comprueban que la familia que ora unida, permanece unida.

Un agradecimiento especial a Ernesto, que me ayudó de manera maratónica para realizar este proyecto. Pero más que nada se convirtió en un padre para mí, porque siempre me daba consejos de los pasos siguientes de mi vida y alguna que otra insultada merecida.

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos, tíos, abuelitos que forman parte de mi vida, que me han enseñado a cumplir mis sueños y objetivos de vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xvii
INTRODUCCIÓN	xix
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Propiedades químicas del cuesco de coco (<i>Cocos nucifera</i> L.)	1
1.1.1 La planta de coco: características botánicas	1
1.1.1.1 Raíz	1
1.1.1.2 Tallo	2
1.1.1.3 Fruto	2
1.1.2 Hábitat	3
1.1.3 Importancia y usos	3
1.1.4 Futuro	4
1.1.5 Composición química del cuesco de coco	4
1.1.5.1 Celulosa	6
1.1.5.2 Hemicelulosa	7
1.1.5.3 Lignina	7
1.1.6 Producción de coco en el Ecuador	9
1.2 Carbonización de materiales lignocelulósicos	11
1.2.1 Características físicas y químicas de la biomasa	11
1.2.1.1 Análisis Termogravimétrico (TGA)	12
1.2.1.2 Contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo	15
1.2.2 Termodinámica de pirolisis	15
1.2.3 Modelos cinéticos de pirolisis	17
1.2.3.1 Modelos de una reacción global sencilla	18
1.2.3.2 Modelos de reacciones múltiples	19
1.2.3.3 Modelos semi-globales de reacción	20
1.2.3.4 Modelos centrados en la formación de los productos	21
1.2.4 Velocidad de reacción y cinética de reacción de pirólisis	21
1.3 Activación de carbón con CO ₂ y H ₂ O	25
1.3.1 Carbón activado	25
1.3.1.1 Composición química del carbón activado	25
1.3.1.2 Estructura física del carbón activado	26
1.3.1.3 Porosidad	27
1.3.2 Producción de carbón activado	28
1.3.2.1 Activación Química	29
1.3.2.2 Activación Física	30
1.3.2.3 Diferencias entre Activación Física y Activación Química	31
1.3.3 Activación Física con Dióxido de Carbono y vapor de agua	32
1.3.3.1 Termodinámica de las reacciones de gasificación	34
1.3.3.2 Cinética de Activación. Modelo de conversión continua	34
1.3.4 Velocidad de reacción de la activación de carbón con dióxido de carbono y vapor de agua	36

2. PARTE EXPERIMENTAL	37
2.1 Caracterización física y química del cuesco de coco, proveniente de San Lorenzo, Esmeraldas	39
2.1.1 Caracterización química de la materia prima	39
2.1.1.1 Determinación de Humedad	40
2.1.1.2 Determinación del contenido de ceras, grasas y resinas solubles en alcohol-benceno	41
2.1.1.3 Determinación del contenido de celulosa	42
2.1.1.4 Determinación del contenido de lignina	42
2.1.1.5 Contenido de volátiles, cenizas y Carbón fijo	43
2.1.2 Reducción de tamaño y determinación del tamaño de partícula	44
2.1.3 Caracterización Física de la materia prima	45
2.1.3.1 Densidad Real	45
2.1.3.2 Determinación de la dureza y densidad aparente	46
2.1.4 Análisis termogravimétrico de la materia prima	46
2.1.5 caracterización de la estructura de la materia prima	47
2.2 Evaluación de la influencia de la temperatura y el tiempo sobre la carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	47
2.2.1 Pruebas a nivel de laboratorio	47
2.2.2 Pruebas a escala piloto en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	48
2.2.2.1 Determinación de la temperatura de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	49
2.2.2.2 Determinación del tiempo de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	50
2.2.2.3 Determinación del rendimiento de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	50
2.3 Evaluación de la influencia del tiempo de activación física con vapor de agua en la producción de carbón activado de cuesco de coco en el horno piloto	51
2.3.1 Activación física con vapor de agua en el horno Nichols Herreshoff mono solera	51
2.3.2 Determinación de la superficie específica del carbón activado, por medio del Índice de yodo	52
2.3.3 Caracterización del carbón activado	53
2.3.3.1 Índice de Azul de metileno	53
2.3.3.2 Índice de decoloración de azúcar	54
2.3.3.3 Titulación Boehm	55
2.3.3.4 Caracterización de la morfología del carbón activado	56

2.4	Definición del diagrama de flujo y dimensionamiento de los equipos principales para la producción de 10 t/mes de carbón de cuesco de coco	56
2.5	Evaluación de la pre-factibilidad económica de la planta para una producción de 10 t/mes	59
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
3.1	Caracterización física y química del cuesco de coco, proveniente de San Lorenzo, Esmeraldas	60
3.1.1	Muestreo de la materia Prima	60
3.1.2	Determinación del tamaño de partícula obtenido luego de la molienda con molino de martillos	61
3.1.3	Caracterización Química	62
3.1.3.1	Determinación de humedad, contenido de ceras, grasas y aceites, celulosa y lignina del cuesco de coco	62
3.1.3.2	Determinación del contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo	63
3.1.4	Caracterización Física	64
3.1.5	Análisis termogravimétrico de la materia prima	65
3.1.6	Caracterización de la Estructura de la materia prima	67
3.2	Evaluación de la influencia de la temperatura y el tiempo sobre la carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	68
3.2.1	Pruebas a nivel de laboratorio	68
3.2.1.1	Análisis de la densidad aparente y densidad real del carbón de cuesco de coco producido a nivel de laboratorio	69
3.2.1.2	Análisis de dureza del carbón de cuesco de coco producido a nivel de laboratorio	70
3.2.1.3	Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón de cuesco de coco producido a nivel de laboratorio	71
3.2.1.4	Relación entre el carbón fijo y la dureza del carbón de cuesco de coco producido a nivel de laboratorio	73
3.2.1.5	Rendimiento de la carbonización del cuesco de coco a diferentes temperaturas y tiempos a nivel de laboratorio	75
3.2.2	Pruebas a escala piloto en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	76
3.2.2.1	Determinación de la temperatura de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	76
3.2.2.2	Determinación del tiempo de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	80
3.2.2.3	Determinación del rendimiento de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	85

3.3	Evaluación del tiempo para producir un carbón activado de cuesco de coco que tenga el mayor índice de yodo y superficie específica, por medio de activación física con vapor de agua en el horno Nichols Herreshoff mono solera.	85
3.3.1	Determinación de la superficie específica del carbón activado, por medio del Índice de yodo	85
3.3.2	Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de cuesco de coco producido en el horno Nichols	88
3.3.3	Caracterización del carbón activado.	90
3.3.3.1	Índice de Azul de metileno	90
3.3.3.2	Índice de decoloración de azúcar	91
3.3.3.3	Titulación Boehm	93
3.3.3.4	Caracterización de la morfología del carbón activado	94
3.4	Definición del diagrama de flujo y dimensionamiento de los equipos principales para la producción de 10 t/mes de carbón de cuesco de coco	97
3.4.1	Cinética de los procesos de activación y carbonización	97
3.4.1.1	Cinética de carbonización	98
3.4.1.2	Cinética de activación	100
3.4.2	Diseño Conceptual y diseño de equipos	102
3.4.2.1	Estimación de la cantidad de cuesco de coco necesario para la producción de carbón activado	102
3.4.2.2	Dimensionamiento del horno rotatorio	104
3.4.2.3	Dimensionamiento de la sección de reducción y clasificación de tamaño de la materia prima	108
3.4.2.4	Dimensionamiento de la sección de reducción y clasificación de tamaño del carbón activado producido	110
3.4.2.5	Dimensionamiento de la cámara de enfriamiento	110
3.4.2.6	Dimensionamiento del caldero	111
3.4.2.7	Dimensionamiento de los tanques de reserva de combustible	112
3.4.2.8	Dimensionamiento de la cámara de post-combustión	113
3.4.2.9	Dimensionamiento del lavador de gases de combustión	114
3.5	Evaluación de la factibilidad económica de la planta para una producción de 10 t/mes	117
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
4.1	Conclusiones	120
4.2	Recomendaciones	122
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
	ANEXOS	133

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1	Composición química del cuesco de coco	5
Tabla 1.2	Composición química de celulosa, Hemicelulosa y lignina en el cuesco de coco, según varios autores	6
Tabla 1.3	Composición química de algunas fibras lignocelulósicas	9
Tabla 1.4	Producción de coco en el Ecuador durante los últimos 9 años	10
Tabla 1.5	Contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo del cuesco de coco según varios autores	15
Tabla 1.6	Composición química del carbón activado	26
Tabla 1.7	Tipos de poros según su radio	26
Tabla 1.8	Índice de yodo del carbón activado de cuesco de coco por activación física según varios autores	33
Tabla 2.1	Normas Tappi aplicadas a la caracterización química de la Materia Prima	40
Tabla 2.2	Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico de los materiales molido	45
Tabla 2.3	Reactivos que se usaron para la determinación del índice de yodo en carbón activado según la norma NTE INEN 1 988:94 (1995c)	52
Tabla 2.4	Datos para la elaboración de la curva de calibración de azul de metileno	54
Tabla 2.5	Reactivos que se usaron para la titulación Boehm de carbón activado según el procedimiento descrito por Goertzen, et al., (2010, p. 1 253)	55
Tabla 3.1	Datos promedios del muestreo realizado a las conchas de coco	60
Tabla 3.2	Tratamiento de datos para ensayo de granulometría de cuesco de coco después del proceso de reducción de tamaño con una trituradora de mandíbulas	61
Tabla 3.3	Composición química de la materia prima	63
Tabla 3.4	Contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo de la materia prima	64

Tabla 3.5	Propiedades Físicas del cuesco de coco	64
Tabla 3.6	Porcentaje de dureza de varias materia primas según Yusufu, et al., (2012, p. 128), modificado	72
Tabla 3.7	Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos. Pruebas de laboratorio	72
Tabla 3.8	Datos obtenidos del rendimiento del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos. Pruebas de laboratorio	75
Tabla 3.9	Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas. Pruebas piloto en el horno Nichols	77
Tabla 3.10	Índice de yodo y dureza del carbón activado de cuesco de coco con vapor de agua en el Horno Nichols a 850 °C	86
Tabla 3.11	Índice de yodo y dureza del carbón activado de cuesco de coco con vapor de agua en el Horno Nichols a 950 °C	86
Tabla 3.12	Índice de azul de metileno para los carbones activados producidos a 150 min	91
Tabla 3.13	Índice de decoloración de azúcar para los carbones activados producidos a 150 min	92
Tabla 3.14	Grupos funcionales oxigenados de las muestras de carbón activado durante 150 min, datos obtenidos mediante titulación Boehm	93
Tabla 3.15	Valores cinéticos de la reacción de pirolisis del cuesco de coco, obtenidos a partir de la Figura 3.27	99
Tabla 3.16	Valores cinéticos de la reacción de activación del carbón de cuesco de coco activado con vapor de agua obtenidos a partir de las Figuras 3.29 y 3.30	102
Tabla 3.17	Dimensiones del horno rotatorio para producir carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua	104
Tabla 3.18	Número de Froude y regímenes de movimiento de material sólido	105
Tabla 3.19	Requerimientos Energéticos del horno rotatorio para la producción de carbón activado de cuesco de coco	107

Tabla 3.20	Composición de los gases de salida del horno	108
Tabla 3.21	Especificaciones de la trituradora de mandíbulas usada para la reducción de tamaño del cuesco de coco	109
Tabla 3.22	Especificaciones de la trituradora de mandíbulas usada para la reducción de tamaño del cuesco de coco	110
Tabla 3.23	Dimensiones de la cámara de enfriamiento	111
Tabla 3.24	Dimensiones del caldero para el vapor de agua que activará el carbón de cuesco de coco	112
Tabla 3.25	Dimensiones de los tanques de reserva de combustible	112
Tabla 3.26	Dimensiones de la cámara de post-combustión	113
Tabla 3.27	Composición de los gases de salida del horno	114
Tabla 3.28	Composición de los gases de salida del horno	114
Tabla 3.29	Dimensiones del lavador de gases de combustión	114
Tabla 3.30	Resumen de los flujos que intervienen en el proceso de producción de carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua	115
Tabla 3.31	Distribución de la planta según la Figura 3.34	115
Tabla 3.32	Gastos de inversión	117
Tabla 3.33	Maquinaria y equipo usado en el proceso de implementación de la planta	118
Tabla 3.34	Costos de materia prima e insumos	118
Tabla 3.35	Costos anuales de producción	119
Tabla 3.36	Indicadores económicos obtenidos para la producción de carbón activado de cuesco de coco mediante activación física	119
Tabla AI.1	Dimensiones de la concha de coco tomadas en el muestreo	134
Tabla AII.1	Ensayo granulométrico del cuesco de coco triturado	135
Tabla AIII.1	Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo de la materia prima	136

Tabla AIII.2	Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos	137
Tabla AIII.3	Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos	138
Tabla AIII.4	Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 500 °C y diferentes tiempos en el horno Nichols	139
Tabla AIII.5	Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 600 °C y diferentes tiempos en el horno Nichols	140
Tabla AIV.1	Ensayo de determinación de la densidad real de la materia prima	141
Tabla AIV.2	Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza de la materia prima	141
Tabla AIV.3	Ensayo de determinación de la densidad real del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio	142
Tabla AIV.4	Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio	143
Tabla AIV.5	Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza del cuesco de coco carbonizado a 500 °C y diferentes tiempos en el horno Nichols	144
Tabla AIV.6	Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza del carbón activado de cuesco de coco a 850 y 950 °C a diferentes tiempos en el horno Nichols	145
Tabla AV.1	Ensayo de determinación del rendimiento del cuesco de coco carbonizado a 400, 500 y 600 °C	146
Tabla AV.2	Rendimiento de la carbonización del cuesco de coco a 500 °C y 30 min para el cuesco de coco	147
Tabla AVI.1	Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para determinar la temperatura de carbonización del cuesco de coco en un perfil de temperatura de 400 a 600 °C	148

Tabla AVI.2	Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para determinar el tiempo de carbonización de cuesco de coco para una temperatura constante de 500 °C	149
Tabla AVI.3	Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para determinar el tiempo de carbonización de cuesco de coco para una temperatura constante de 600 °C	150
Tabla AVI.4	Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para activar el carbón de cuesco de coco a 950 °C con un flujo constante de vapor de agua de 40 kg/h	151
Tabla AVI.5	Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para activar el carbón de cuesco de coco a 950 °C con un flujo constante de vapor de agua de 40 kg/h	152
Tabla AVII.1	Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a 850 °C mediante activación física con vapor de agua	153
Tabla AVII.2	Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a 950 °C mediante activación física con vapor de agua	154
Tabla AVIII.1	Determinación de la curva de calibración de la absorbancia para la determinación del índice de azul de metileno para carbón activado	155
Tabla AIX.1	Determinación del índice de decoloración de azúcar del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols	156
Tabla AIX.2	Titulación Boehm para determinar los grupos funcionales del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols	157
Tabla AX.1	Datos obtenidos para la elaboración de la curva TGA del cuesco de coco	158
Tabla AX.2	Datos obtenidos para la elaboración de la curva TGA del cuesco de coco	158
Tabla AX.3	Datos calculados para la obtención de la pirolisis de carbonización del cuesco de coco	159
Tabla AX.4	Datos obtenidos para la determinación de la constante cinética de activación a 850 y 950 °C	160
Tabla AXI.1	Datos obtenidos para la determinación del ángulo de reposo del cuesco de coco	161
Tabla AXI.2	Calores de formación estándar de los compuestos en la combustión del GLP	163

Tabla AXI.3	Calores de reacción de los compuestos que conforman el GLP	163
Tabla AXI.4	Condiciones iniciales del caldero	171
Tabla AXI.5	Pérdidas en los equipos	171
Tabla AXI.6	Composición del diésel II	171
Tabla AXI.7	Composición de los gases	175
Tabla AXI.8	Balance de energía de los gases de salida	180

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1	Partes de la fruta de coco, corte transversal de un coco de 6 meses	3
Figura 1.2	Estructura química de la celulosa	7
Figura 1.3	Estructura de una unidad fenilpropano	8
Figura 1.4	Corte transversal del cuesco de coco con el microscopio óptico a 20 grados de aumento F = fibra, L = laguna	10
Figura 1.5	Secuencia de reacciones de pirolisis de biomasa, esquema propuesto por Evans y Milne (1987, p. 136, modificado)	12
Figura 1.6	Curva TGA y DTGA de los biopolímeros presentes en el cuesco de coco	13
Figura 1.7	Curva TGA y DTGA de una muestra de cuesco de coco y de una mezcla artificial con los componentes puros	13
Figura 1.8	Estudio comparativo del TGA (a) y DTGA (b) de muestras de cuesco de coco (CcNS), cuesco de marañón (CNS) y pellets de madera (WP)	14
Figura 1.9	Pirolisis de lignina, celulosa y hemicelulosa tomadas con un DSC	16
Figura 1.10	Representación Esquemática de la estructura porosa del carbón activado, clasificación de los poros según su tamaño (w = dimensión característica del poro)	28
Figura 1.11	Diagrama general de la producción de carbón activado por activación física	31
Figura 1.12	Modelo de conversión progresiva	35
Figura 2.1	Metodología empleada para la obtención de carbón activado de alta dureza a partir de cuesco de coco	38
Figura 2.2	Fotografía del secado de las conchas de coco en la terraza a temperatura ambiente	39
Figura 2.3	Fotografía del cuesco de coco triturado hasta $d_{80} = 5$ cm	44
Figura 2.4	Esquema del crisol que fue llevado a la mufla SEPOR INC para carbonizar el cuesco de coco	48

Figura 2.5	Fotografía del Horno Nichols Herreshoff mono solera y su esquema	48
Figura 2.6	Composición de los gases de combustión del propano a 0,72 ATM (presión atmosférica de Quito)	49
Figura 3.1	Curva TGA y DTGA de la muestra de cuesco de coco	66
Figura 3.2	Fotografías MEB del cuesco de coco seco a diferentes grados de aumento: a) 500, b) 1 000, c) 2 000 y d) 3 000	67
Figura 3.3	Densidad aparente del cuesco de coco carbonizado en función del tiempo a diferentes temperaturas. Pruebas de laboratorio	69
Figura 3.4	Densidad real del cuesco de coco carbonizado en función del tiempo a diferentes temperaturas. Pruebas de laboratorio	70
Figura 3.5	Porcentaje de dureza del cuesco de coco carbonizado en función del tiempo a diferentes temperaturas. Pruebas de laboratorio	71
Figura 3.6	Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de coco en función del tiempo para 400 °C. Pruebas de laboratorio	73
Figura 3.7	Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de coco en función del tiempo para 500 °C. Pruebas de laboratorio	74
Figura 3.8	Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de coco en función del tiempo para 600 °C. Pruebas de laboratorio	74
Figura 3.9	Porcentaje de carbón fijo en función de la temperatura, comparación entre pruebas a nivel laboratorio y pruebas piloto en el horno Nichols para el cuesco de coco carbonizado	78
Figura 3.10	Porcentaje de cenizas en función de la temperatura, comparación entre pruebas de laboratorio y pruebas piloto en el horno Nichols para el cuesco de coco carbonizado	79
Figura 3.11	Porcentaje de volátiles en función de la temperatura, comparación entre pruebas de laboratorio y pruebas piloto en el horno Nichols para el cuesco de coco carbonizado	79
Figura 3.12	Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 500 °C en función del tiempo. Pruebas en el horno Nichols	80
Figura 3.13	Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 600 °C en función del tiempo. Pruebas en el horno Nichols	81

Figura 3.14	Contenido de carbón fijo en función del tiempo a las posibles temperaturas de carbonización del cuesco de coco. Pruebas en el horno Nichols	82
Figura 3.15	Porcentaje de dureza en función del tiempo a las posibles temperaturas de carbonización del cuesco de coco. Pruebas en el horno Nichols	82
Figura 3.16	Densidad aparente en función del tiempo a las posibles temperaturas de carbonización del cuesco de coco. Pruebas en el horno Nichols	83
Figura 3.17	Porcentaje de dureza en función del carbón fijo, del cuesco de coco carbonizado a 500 °C obtenido en las pruebas piloto en el horno Nichols a diferentes tiempos	84
Figura 3.18	Porcentaje de dureza en función del carbón fijo, del cuesco de coco carbonizado a 600 °C obtenido en las pruebas piloto en el horno Nichols a diferentes tiempos	84
Figura 3.19	Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo en función del tiempo para una temperatura de 850 °C. Pruebas en el horno Nichols	88
Figura 3.20	Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo en función del tiempo para una temperatura de 950 °C. Pruebas en el horno Nichols	89
Figura 3.21	Porcentaje de dureza e índice de yodo en función del carbón fijo para el carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua a 850 °C	89
Figura 3.22	Porcentaje de dureza e índice de yodo en función del carbón fijo para el carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua a 950 °C	90
Figura 3.23	Fotografía de las soluciones finales de azul de metileno a las cuales se midió la absorbancia	92
Figura 3.24	Fotografías MEB del cuesco de coco carbonizado diferentes grados de aumento: a) 350 y b) 750	94
Figura 3.25	Fotografías MEB del carbón activado de cuesco de coco a 850 °C y 150 min a diferentes grados de aumento: a) 2 000, b) 3 500 c) 4 000 y d) 8 000	95

Figura 3.26	Fotografías MEB del carbón activado de cuesco de coco a 950 °C y 150 min a diferentes grados de aumento: a) 2 000, b) 4 000 y c) 8 000	96
Figura 3.27	$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt \times (1-\alpha)}\right)$ en función de $-1/T$ para los datos obtenido de la curva TGA del cuesco de coco	98
Figura 3.28	$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt \times (1-\alpha^2)}\right)$ en función de $-1/T$ para los datos obtenido de la curva TGA del cuesco de coco	99
Figura 3.29	$d\alpha/dt$ en función de $1 - \alpha$ para los datos obtenido del porcentaje de carbón fijo en el carbón activado de cuesco de coco a 850 °C	100
Figura 3.30	$d\alpha/dt$ en función de $1 - \alpha$ para los datos obtenido del porcentaje de carbón fijo en el carbón activado de cuesco de coco a 950 °C	101
Figura 3.31	Diagrama de bloques del proceso de producción de carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua	103
Figura 3.32	Esquemas de los diferentes regímenes de movimiento de material sólido al interior de un horno, modificado	106
Figura 3.33	Esquema de las paletas presentes en el horno rotatorio para que se produzca la reacción de activación entre el carbón y el vapor de agua	106
Figura 3.34	Vista de la planta de producción de cuesco de coco	116
Figura AI.1	Dimensiones de la concha de coco tomadas en el muestreo	134
Figura AII.1	Curva granulométrica para procesadores plásticos molidos	135
Figura AVII.1	Índice de yodo del carbón activado producido a 850 °C mediante activación física con vapor de agua en función del tiempo de activación	153
Figura AVII.2	Índice de yodo del carbón activado producido a 950 °C mediante activación física con vapor de agua en función del tiempo de activación	154
Figura AVIII.1	Curva de calibración de la absorbancia para la determinación del índice de azul de metileno para carbón activado	155
Figura AXI.1	Datos obtenidos para la determinación del ángulo de reposo del cuesco de coco	161

Figura AX.2	Diagrama de bloques del proceso de reducción y clasificación	166
Figura AXI.3	Diagrama de la pila stock	167
Figura AXI.4	Diagrama de bloques del caldero	172
Figura AXI.5	Diagrama del tanque de reserva de GLP	177

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Muestreo de las conchas de coco	134
ANEXO II	
Determinación del d_{80} para la materia prima molida en la trituradora de mandíbulas	135
ANEXO III	
Fichas técnicas de densidad real, densidad aparente y dureza	136
ANEXO IV	
Fichas técnicas contenido de volátiles cenizas y carbón fijo	141
ANEXO V	
Fichas técnicas de rendimiento	146
ANEXO VI	
Fichas técnicas del uso del horno Nichols Herreshoff mono solera	148
ANEXO VII	
Fichas técnicas de determinación del índice de yodo del carbón activado producido	153
ANEXO VIII	
Curva de calibración de la absorbancia para la determinación del índice de azul de metileno para carbón activado	155
ANEXO IX	
Fichas técnicas de caracterización del carbón activado producido	156
ANEXO X	
Determinación de la cinética de carbonización y activación	158
ANEXO XI	
Dimensionamiento de equipos	161

RESUMEN

Se estudia la producción de carbón activado a partir de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua, para esto se realizaron pruebas a nivel de laboratorio en una mufla SEPOR INC y pruebas a nivel piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera bajo atmósfera reductora ($\lambda < 1$). Se caracterizó la materia prima para determinar las propiedades que favorecen la formación de carbón: contenido de celulosa, lignina, humedad, dureza y carbón fijo.

Se determinó el tiempo de carbonización y la temperatura de pirolisis a partir de la relación entre el porcentaje de carbón fijo y la dureza en función del tiempo y el tiempo de activación a partir de la superficie específica por medio del índice de yodo.

Se determinó que la temperatura de carbonización del cuesco de coco es de 500 °C y el tiempo de pirolisis de 30 min producidos en el horno Nichols Herreshoff mono solera debido al porcentaje de carbón fijo producido (72,72 %) y la alta dureza (92,89 %).

El carbón activado producido a 950 °C durante 150 min en el horno Nichols Herreshoff posee grandes propiedades adsorptivas, tiene un índice de yodo de 1 371 mg I₂/g CA, índice de azul de metileno de 20,41/100 g CA y un índice de decoloración de azúcar de 139 UBR, lo que significa que es un material extremadamente poroso.

Con los datos de la carbonización obtenidos en el equipo de termogravimetría se obtuvo la cinética de pirolisis. La constante cinética fue 1,60 min⁻¹ y un tiempo de conversión de 24,85 min.

La constante cinética de activación en el horno Nichos Herreshoff con un flujo constante de vapor de 40 kg/h fue de 62,18 cm³_{gas}·mol⁻¹·s⁻¹ para una temperatura de 850 °C y 56,53 cm³_{gas}·mol⁻¹·s⁻¹ para 950 °C.

Con estos parámetros definidos se diseñó una planta de producción de carbón activado para una producción de 10 t/mes. Se diseñó un horno rotatorio que carbonice y active el cuesco y el caldero que proporcione el vapor para la activación.

Se realizó un estudio económico preliminar de la implementación de la planta. Se determinó que con una inversión de 125 000 USD, se tendría una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 18 % con un Valor Actual Neto (VAN) de 22 000,26 USD, calculados a un horizonte de 10 años, lo que significa que el proceso es rentable.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, un problema de gran magnitud que afecta al planeta de forma directa es la alta generación de desechos y la carencia de tratamientos integrales que permitan aprovecharlos. El cuesco de coco es la parte dura del endocarpio de la fruta, representa del 80 al 85 % de ésta y actualmente es un desecho agroindustrial (Rosa, et al., p. 1).

Entre los principales usos que se pueden dar a estos desechos está la producción de carbón activado, el mismo que da un valor agregado a la materia prima, además de ayudar en la reutilización del cuesco, y lo más importante, da una alternativa de menor costo que le hace competitivo en el mercado (Muthulakshmi-Andal y Sakthi, 2010, p. 968).

Para la producción de carbón activado es necesario partir de una materia prima que tenga propiedades bien definidas: dureza, estructura inherente de poros, alto contenido de carbono, bajo contenido de ceniza y relativamente alto rendimiento (alrededor del 30 %) durante el proceso de carbonización (Ioannidou y Zabaniotou, 2007, p. 1 998; Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 164).

El carbón activado es un material altamente adsorbente, que se prepara a partir de materiales con altos contenidos de materia orgánica como: lignina, celulosa, o simplemente carbón (mineral). Se caracteriza por poseer una alta superficie específica, variedad de grupos funcionales y una buena distribución de poros. Estas propiedades, le permiten atrapar una gran diversidad de moléculas (Bandosz, 2006, p. 5). Generalmente se lo usa en procesos de: descontaminación de aguas, recuperación de solventes, control de emisiones, decoloración de líquidos, eliminación de olores, recuperación de metales preciosos entre otros, debido a sus propiedades adsorptivas (Ioannidou y Zabaniotou, 2007, p. 1 981). La creciente demanda de este tipo de materiales obliga a la búsqueda de nuevas fuentes de materias primas, que tengan gran disponibilidad y bajo costo.

El objetivo general del presente proyecto de titulación consiste en el diseño de una planta de producción de 10 t/mes de carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua. Para esto es importante encontrar las mejores condiciones de carbonización y activación para en lo posible agruparlos en un solo sistema de calentamiento. Además de garantizar que el carbón activado producido tenga propiedades adsortivas y una dureza relativamente alta para el uso principalmente en la industria de la recuperación de minerales.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presenta la información obtenida de la investigación bibliográfica realizada acerca de las propiedades químicas del cuesco de coco (*Cocos nucifera* L.) como materia prima, la carbonización de materiales lignocelulósicos y la activación del carbón con monóxido de carbono (CO₂) y vapor de agua.

1.1 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL CUESCO DE COCO (*Cocos nucifera* L.)

1.1.1 LA PLANTA DE COCO: CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS

La palmera de coco (*Cocos nucifera* L.) pertenece a la familia *Arecaceae*, la misma que tiene aproximadamente 3 000 especies. Entre ellas se destacan: la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) y una gran variedad de nueces (Litz, 2005, p. 89).

El coco tal vez sea la más representativa palmera a nivel mundial, debido a su contribución económica, sobre todo en países tropicales (Parrota, 2000, p. 152; Tomlinson, Horn y Fisher, 2011, p. 203). La mayor utilidad que tiene esta planta es para la producción de aceite (Tomlinson, et al., 2011, p. 203), el mismo que se encuentra en el endospermo (Abraham y Mathew, 1963, p. 505). A continuación se detallan las partes de la planta:

1.1.1.1 Raíz

Son una serie de ramificaciones directamente pegadas al tallo de la palmera. El árbol no tiene una raíz principal, esto hace que se sujete de mejor manera a los arenales y que pueda captar la mayor cantidad de nutrientes (Litz, 2005, p. 90).

1.1.1.2 Tallo

El tallo de la palmera es ensanchada en la base, carece de ramificaciones, crece entre 30 cm a 1 m cada año, dependiendo de varios factores como: edad, cantidad de humedad y temperatura. Llega a crecer hasta 20 m de altura (Parrota, 2000, p. 152) y un grosor de 30 a 45 cm (Bruzos, 2012). En la parte superior, se encuentra un conjunto de aproximadamente 20 hojas (Litz, 2005, p. 90).

1.1.1.3 Fruto

La palma de coco es una especie monocotiledónea. Bajo condiciones favorables, la planta comienza a florecer a partir de los 6 años de edad. Cada palmera madura produce más de 40 frutos cada año (Litz, 2005, p. 91; Parrota, 2000, p. 152).

El fruto consta de 3 partes: el exospermo, que es la parte más gruesa y fibrosa, en cuyo interior se encuentra el endospermo, la parte sólida de la fruta. Cuando madura se la denomina copra (Bruzos, 2012; Haas y Wilson, 1985, p. 6).

Entre el exospermo y el endospermo, se encuentra el endocarpio, el mismo que cuando madura, se convierte en la nuez o cuesco del coco (Abraham y Mathew, 1963, p. 509). Cuando el fruto es inmaduro, el endospermo posee gran cantidad de líquido interno, el agua de coco. A medida que madura, el agua se seca y aumenta la cantidad de aceite, por lo que se vuelve amargo.

El cuesco de coco es la parte dura del endospermo de la fruta. Es un desecho agroindustrial abundante, ya que representa del 80 al 85 % del mismo (Rosa, et al., 2001, p. 1). Se puede hacer con este material: artesanías, tazas, cucharas, floreros, entre otros (Parrota, 2000, p. 156), además es un gran material para realizar carbón para filtros de agua. La Figura 1.1 muestra las partes del fruto.

1.1.2 HÁBITAT

El árbol del coco crece en el trópico y en casi todas las zonas tropicales donde haya gran cantidad de arenales (Parrota, 2000, p. 152). El clima donde se desarrolla esta palmera es cálido tropical, con una temperatura promedio entre 27 a 35 °C, con precipitaciones medias entre 1 200 y 2 300 mm anuales. Aunque puede crecer en ecosistemas de mayor humedad y pluviosidad, estos pueden afectar la producción. Para que el fruto se desarrolle óptimamente, es necesario que la población de cocoteros sea de 100 palmeras por hectárea (Parrota, 2000, p. 154).



Figura 1.1 Partes de la fruta de coco, corte transversal de un coco de 6 meses (Abraham y Mathew, 1963, p. 509, modificado)

1.1.3 IMPORTANCIA Y USOS

La palma de coco, es conocida como el “árbol de la vida”, debido a su importancia en la agricultura en zonas tropicales. De aproximadamente 11 millones de hectáreas sembradas a nivel mundial, el 94 % se ubican en la zona asiática, y la zona del Pacífico Sur (Litz, 2005, p. 91). Los mayores productores son: Filipinas, Brasil, Sri Lanka, Tailandia, Papua Nueva Guinea, Vietnam y México.

El cascabillo de la fruta, al ser fibrosa y de baja densidad, puede ser usado para la fabricación de: escobas, cuerdas, cepillos. Las hojas se usan como techos en casas. El tallo se usa como madera en la construcción de casas o como combustible.

Aunque cada parte de la palmera se puede usar, la mayor producción de coco, se debe a la obtención de copra, del cual es extraído el aceite. Su agua se usa como bebida refrescante. Además se extrae la savia del tallo para producir azúcar, vinagre, y jarabe, para la posterior producción de alcohol (Haas y Wilson, 1985, p. 6).

1.1.4 FUTURO

La palma de coco se ha convertido en un producto multipropósito, especialmente por su fruto. Sin embargo, la plantación de esta palmera, ha sufrido y va a sufrir una disminución gradual debido a (Litz, 2005, p. 92):

1. Decrecimiento de la producción, debido a la edad de las palmeras, la mayoría de las plantaciones tiene una edad superior a 60 años.
2. Práctica de cultivos marginales que hacen que no se explote debidamente el fruto.
3. Muchas enfermedades y pestes además del cambio climático que produce grandes sequías en zonas de Asia y Pacífico Sur y grandes inundaciones en toda América.
4. Bajos precios, a pesar de la gran calidad del aceite refinado.

1.1.5 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CUESCO DE COCO

La composición química de la cáscara de coco depende de varios factores, que en primera instancia influyen el crecimiento de la planta y la producción del fruto. Entre los factores más importantes están: época del año donde es

cosechada, cantidad de lluvia, composición de la arena, palmeras de coco por hectárea. En la Tabla 1.1 se muestra un análisis químico del cuesco de coco, este análisis fue realizado en los laboratorios de Embrapa, Fortaleza (Brasil) (Rosa, et al., p. 4).

Como se observa en la Tabla 1.1, el material orgánico que posee el cuesco de coco es significativo, lo que es muy importante para la producción de carbón activado, o simplemente para su uso como combustible.

En el cuesco de coco se encuentran 3 biopolímeros que están presentes en casi todos los materiales lignocelulósicos: lignina, celulosa y hemicelulosa. La Tabla 1.2 muestra la composición de estos 3 biopolímeros según varios autores.

Como se puede observar en la Tabla 1.2, la composición de estos biopolímeros en el cuesco de coco es considerable; sin embargo, varía de acuerdo a cada autor, lo que significa que varía de acuerdo al lugar donde es cosechado.

A continuación se presentará de mejor manera la estructura química y propiedades de estas biomoléculas:

Tabla 1.1 Composición química del cuesco de coco

Elemento	[mg/kg]	Elemento	[mg/kg]
N	6 520	Zn	31,8
P	1 420	Mn	23,8
K	11 500	S	1 250
Ca	6 800	Materia orgánica*	72,58
Mg	1 790	C*	53,5
Na	12 500	H*	5,2
Fe	1 970	O*	40,3
Cu	6,6		

*Expresado en porcentaje
(Rosa, et al., p.4, modificado)

Tabla 1.2 Composición química de celulosa, Hemicelulosa y lignina en el cuesco de coco, según varios autores

Autor	Origen	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)
Abdul-Khalil, Siti-Alwani y Mohd-Omar (2006, p. 223)	Malasia	32,80	44,20	23,0*
Cagnon, Py, Guillot, Stoeckli y Chambat (2009, p. 294)	ND**	46,00	14,00	32,0
Prauchner y Rodríguez-Reinoso (2012, p. 164)	México	49,00	43,00	8,0*
Raveendran, Ganesh y Khilart (1995, p. 1 813)	India	28,70	36,30	25,1
Warnijati, Agra y Sudjono (1996, p. 935)	Indonesia	29,62	---	---

* Datos calculados, restando el porcentaje de lignina y celulosa del total

** No señalado en el trabajo

1.1.5.1 Celulosa

La celulosa es un biopolímero formado por monómeros de β -D-glucosa, los mismos que se unen aproximadamente entre 2 500 a 3 000 por cada molécula (Gomes, 2000, p. 56; Mogollón, García y León, 2008, p. 20). Es la sustancia que permite que el tallo de la planta esté sostenido. Estas propiedades mecánicas se deben a la linealidad del polímero, la misma que se aprecia en la Figura 1.2 (Mogollón, et al., 2008, p. 20); además forma fibras en los tallos y frutos (Grassino, 2003).

La unión entre moléculas de glucosa se da a través de los enlaces β -1,4-glucosídico, esto produce que la celulosa sea insoluble en agua (Hurtado y Gonzáles, 2009). La mayor utilidad de la celulosa está en la elaboración de papel, debido a su insolubilidad al agua y a disolventes simples como alcohol. Sin embargo, es soluble en: ácidos, oxidantes y sobre todo microorganismos, lo que le hace un polímero biodegradable (Mogollón, et al., 2008, p. 20).

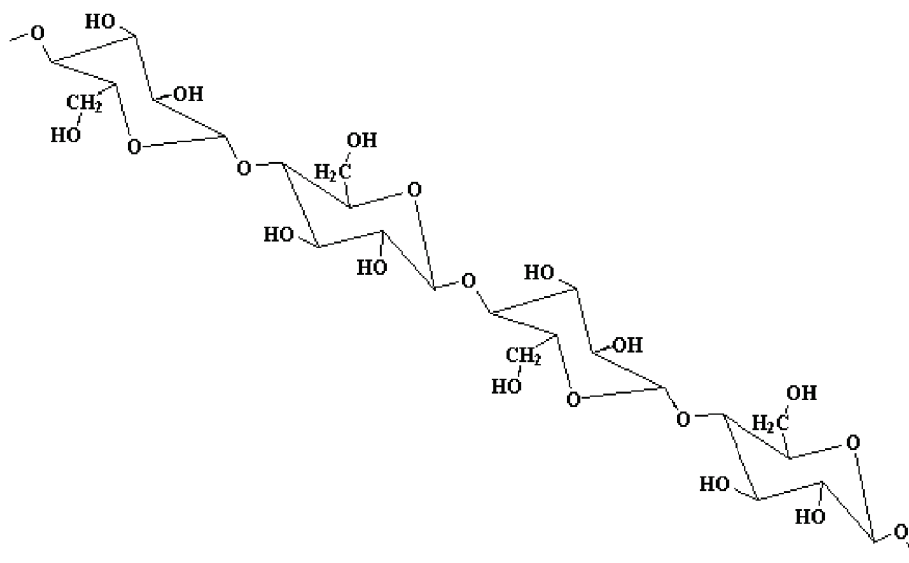


Figura 1.2 Estructura química de la celulosa
(Grassino, 2003)

1.1.5.2 Hemicelulosa

Es un biopolímero más heterogéneo que la celulosa, de menor grado de polimerización (solo se unen entre 150 a 200 monómeros). Son polímeros de 5 azúcares diferentes: 3 hexosas (glucosa, manosa y galactosa) y 2 pentosas (xilosa y arabinosa). La Hemicelulosa actúa como soporte de la celulosa (Mogollón, et al., 2008, p. 23).

1.1.5.3 Lignina

Después de la glucosa, la lignina es el polímero orgánico más abundante en las plantas, generalmente a mayor cantidad de lignina, menor cantidad de celulosa (Han, 1998, p. 4). La lignina es un polímero fenólico del fenilpropano, el mismo que se puede apreciar en la Figura 1.3.

La naturaleza aromática del monómero hace que la lignina, al igual que la celulosa, sea hidrófoba. La reticulación de los monómeros producen una rigidez y gran resistencia mecánica a la fibra (Mogollón, et al., 2008, p. 23).

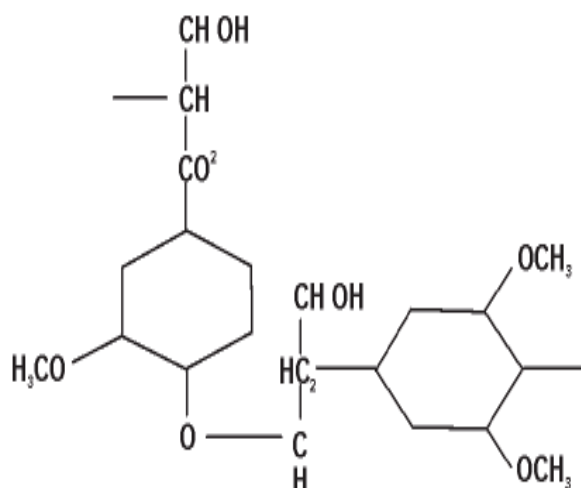


Figura 1.3 Estructura de una unidad fenilpropano
(Mogollón, et al., 2008, p. 23)

Los principales grupos funcionales encontrados en la lignina son (Otero, 1988, p. 58):

5. Grupos metoxi (-OCH₃): grupo más característico de las ligninas
6. Grupos Hidroxilo (-OH): vienen de naturaleza variada, pueden ser provenientes de fenoles, alifáticos primarios, secundarios o terciarios.
7. Grupos carbonil y carboxil
8. Grupos éter (R-O-R), pueden ser de origen alifático o aromático
9. Enlaces dobles (-C=C-)
10. Grupos ésteres (-C-O-R)

La lignina es el mayor desecho no comercializado. Se estima que el planeta produce 300×10^9 t anualmente con una tasa de biosíntesis de 20×10^9 t (Argyropoulos y Menachem, 1998, p. 292).

Se ha demostrado que la lignina tiene un potencial considerable en cuanto a la preparación de carbón activado (Rahman-Mohamed, Mohammadi y Najafpour Darzi, 2010, p. 1592). La Tabla 1.3 muestra la composición química de algunas fibras lignocelulósicas según Abdul-Khalil, et al., (2006, p. 233).

Tabla 1.3 Composición química de algunas fibras lignocelulósicas

	Palma	Coco	Hojas de piña	Tallo de plátano	Madera Blanda	Madera Dura
Solubles en alcohol-benceno (%)	4,5	6,4	5,5	10,6	0,2-8,5	0,1-7,7
Holocelulosa (%)	83,5	56,3	80,5	65,2	60-80	71-89
Lignina (%)	20,5	32,8	10,5	18,6	21-37	14-34
Ceniza (%)	2,4	2,2	2,0	1,5	< 1	< 1

(Abdul-Khalil, et al., 2006, p. 223, modificado)

La Tabla 1.3 muestra que la cantidad de lignina que tienen las fibras de coco es mayor, lo que provoca que estas fibras sean rígidas y de alta dureza, comparadas con otras fibras.

La lignina actúa como cementante (aglutinante) de las cadenas de celulosa unidas. Una buena combinación de estos biopolímeros dan a la planta una flexibilidad y resistencia (Abdul-Khalil, et al., 2006, p. 223; Gomes, 2000, p. 56).

A diferencia de otros biopolímeros, la lignina no tiene una estructura química definida, los monómeros de fenilpropano no están unidos de alguna manera sistemática. La frecuencia de los grupos funcionales y su respectivo porcentaje varían considerablemente entre las diferentes especies vegetales (Mogollón, et al., 2008, p. 24). Finalmente la Figura 1.4 señala la tinción de la lignina con azul de toluidina, para determinar la concentración de este biopolímero en las paredes celulares del cuesco de coco, muestra realizada por Abdul-Khalil, et al., (2006, p. 225).

1.1.6 PRODUCCIÓN DE COCO EN EL ECUADOR

La producción de coco en el Ecuador no ha sido regular debido a: fenómenos del Niño duros en la costa, cultivos artesanales con poco uso de tecnología. A pesar de estos inconvenientes, su obtención es considerable. La Tabla 1.4 muestra la producción de materia prima en los últimos 9 años (INEC, 2011).

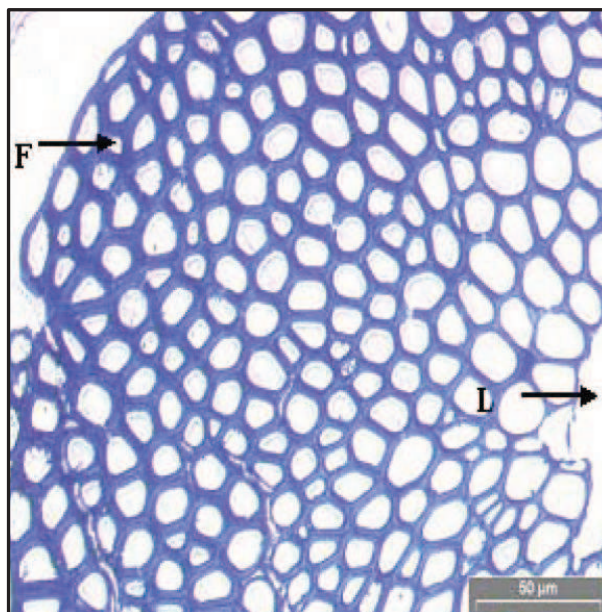


Figura 1.4 Corte transversal del cuesco de coco con el microscopio óptico a 20 grados de aumento F = fibra, L = laguna
(Abdul-Khalil, et al., 2006, p. 225)

Tabla 1.4 Producción de coco en el Ecuador durante los últimos 9 años

Año	Producción (t)
2004	4 606
2005	8 106
2006	8 240
2007	9 206
2008	4 893
2009	3 686
2010	6 082
2011	3 193

(INEC, 2011)

De la cantidad de coco producido en el Ecuador en el 2011, casi 700 t son cosechadas en Esmeraldas y otras 1 700 en las provincias de: Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas y Guayas según el INEC (2011), lo que representa un 75 % de la producción nacional.

1.2 CARBONIZACIÓN DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

Los materiales lignocelulósicos son una parte de la biomasa que incluye las sustancias biológicas que provienen de plantas.

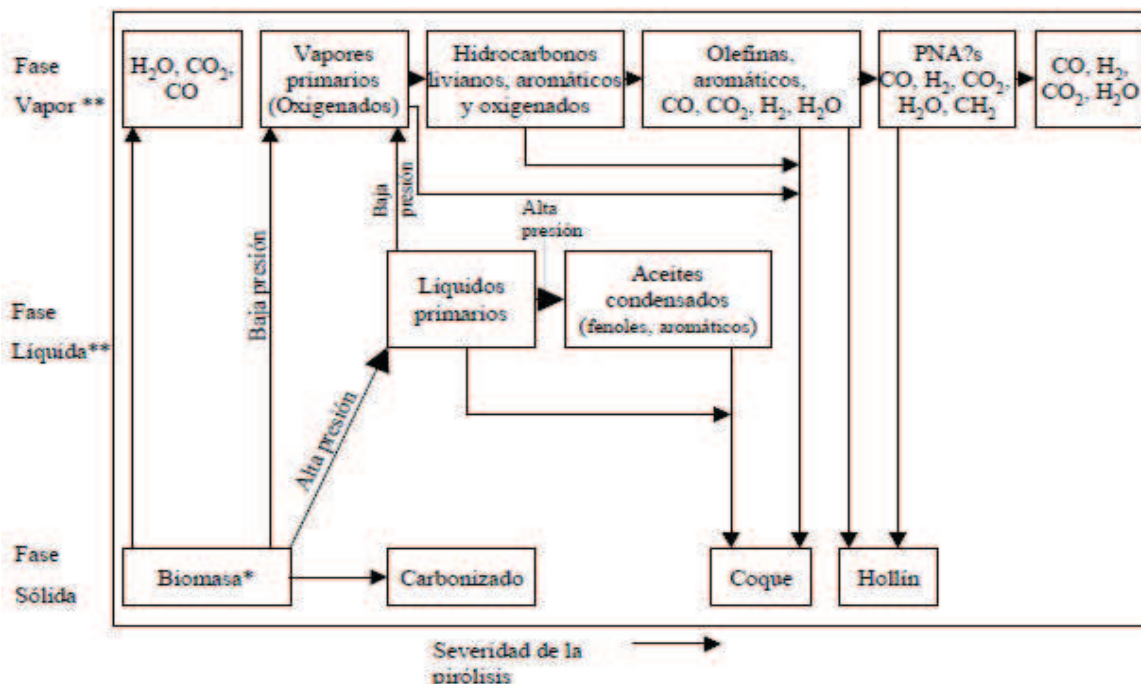
La biomasa hace referencia a todos los materiales que provienen de organismos vivos, excluyendo los combustibles de origen fósil y el gas natural. Muchos de estos compuestos están siendo investigados para producir “energías limpias” a partir de su combustión (Biomass Energy Centre, 2011).

1.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA BIOMASA

Según las características físicas y químicas de cada tipo de biomasa, se pueden obtener diferentes fracciones de materia volátil y sólida para las mismas condiciones de procesamiento. La Figura 1.5 muestra una secuencia de reacciones de pirólisis según la fase, el mismo que fue propuesto por Evans y Milne (1987, p. 134).

Dentro de las características físicas de la biomasa, el tamaño de grano tiene una influencia importante en la carbonización. Entre mayor sea el tamaño, mayor es el tiempo necesario para que la cantidad de volátiles abandonen la partícula. Igualmente, un mayor tamaño de partículas, genera la presencia de gradientes térmicos (Gómez, Klose y Rincón, 2008, p. 33).

La ceniza y los extractos presentes en la biomasa como aceites o metales, catalizan las reacciones de carbonización e influyen en la distribución de las fracciones de sus productos. Finalmente, la presencia de fracciones mayores de lignina en la biomasa genera mayores fracciones de material carbonizado en la pirólisis (Gómez, et al., 2008, p. 33).



* Incluye tanto la biomasa sólida como sus formas plásticas o elásticas anteriores a la ruptura principal de los enlaces covalentes, para producir vapores de bajo peso molecular o líquidos.

** Solo se muestran los productos formados inicialmente. Todos estos productos pueden condensarse a líquidos y sólidos

Figura 1.5 Secuencia de reacciones de pirólisis de biomasa, esquema propuesto por Evans y Milne (1987, p. 136, modificado)

1.2.1.1 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) indica la descomposición de una muestra debido al calor (temperatura). Cagnon, et al., (2009) realizaron un estudio en el que comparan los datos producidos del cuesco de coco con una mezcla artificial de los 3 biopolímeros presentes en éste, el mismo que se presenta en la Figura 1.6 (p. 294).

La Figura 1.6 muestra que la celulosa y hemicelulosa presentan una pérdida más significativa que la lignina, esto se debe a la cantidad de oxígeno que poseen los biopolímeros, en el caso de la celulosa y hemicelulosa llega al 50 % mientras que solo 30 % en la lignina. Con esto se observa que la lignina es la biomolécula de mayor aportación en la formación de carbón, ya que no posee una descomposición significativa.

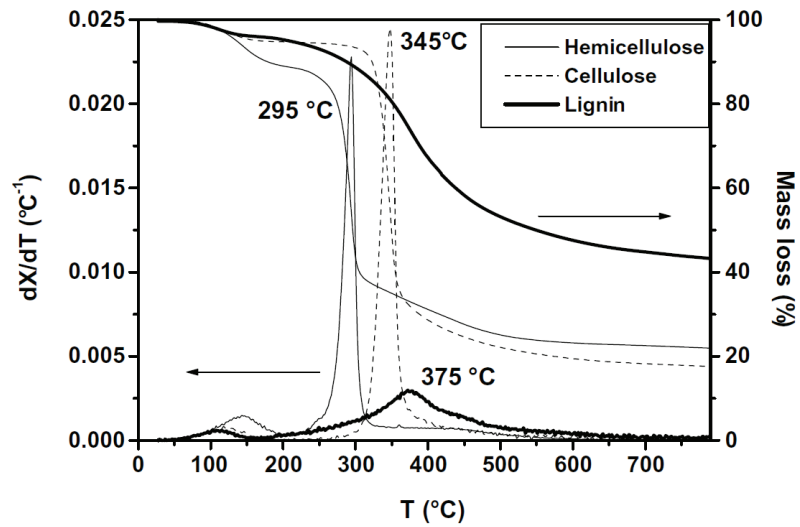


Figura 1.6 Curva TGA y DTGA de los biopolímeros presentes en el cuesco de coco (Cagnon, et al., 2009, p. 294)

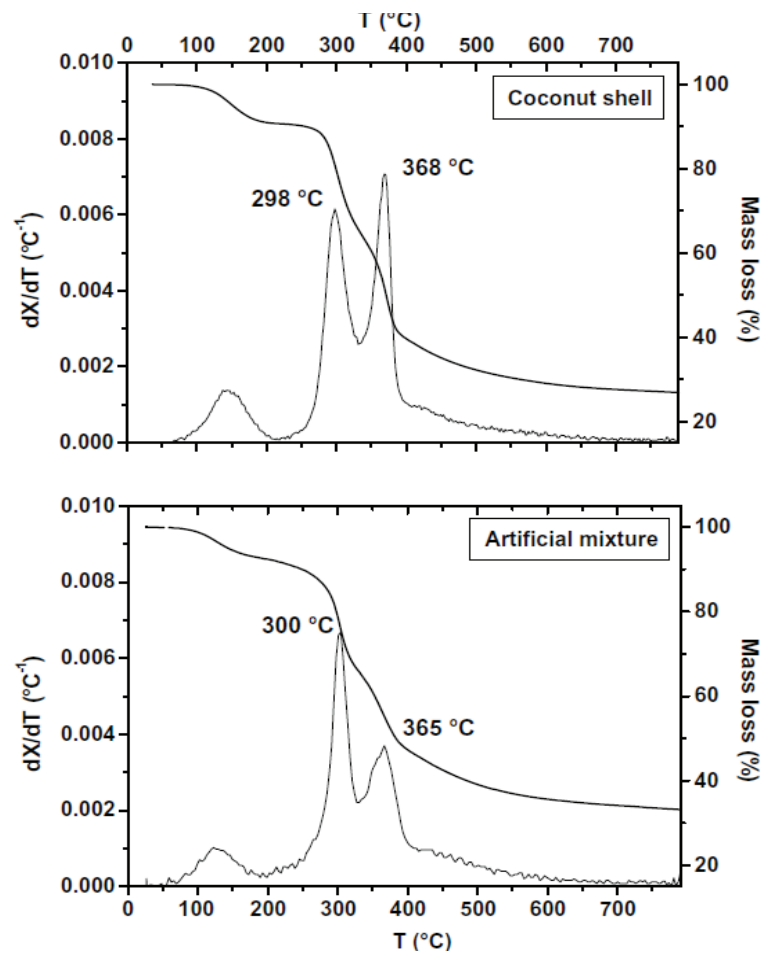


Figura 1.7 Curva TGA y DTGA de una muestra de cuesco de coco y de una mezcla artificial con los componentes puros (Cagnot, et al., 2009, p. 294)

El pico obtenido a 298 °C corresponde a la carbonización de la hemicelulosa y el de 368 °C corresponde a la celulosa y lignina en la Figura 1.7 para la muestra de cuesco de coco. La Figura 1.8 obtenida por Tsamba, Yang y Blasiak, (2006) es una comparación entre cuesco de coco, cuesco de nuez de marañón (*Anacardium occidentale*) y pellets hecho con madera (p. 526).

La Figura 1.8 señala que el cuesco de coco es el que menor porcentaje de pérdida de masa presenta globalmente. Entre los 200 a 400 °C los pellets de madera tienen una pérdida menor que los demás materiales. Sin embargo, de 400 a 900 °C el coco tiene menor porcentaje de pérdidas de peso.

También señala unos picos más prominentes para los pellets de madera, mientras que las nueces tienen picos más pequeños, sin embargo el cuesco de marañón (CS) presenta una descomposición más grande en el pico de la Hemicelulosa (300 °C) y un menor en el pico de la lignina (400 °C).

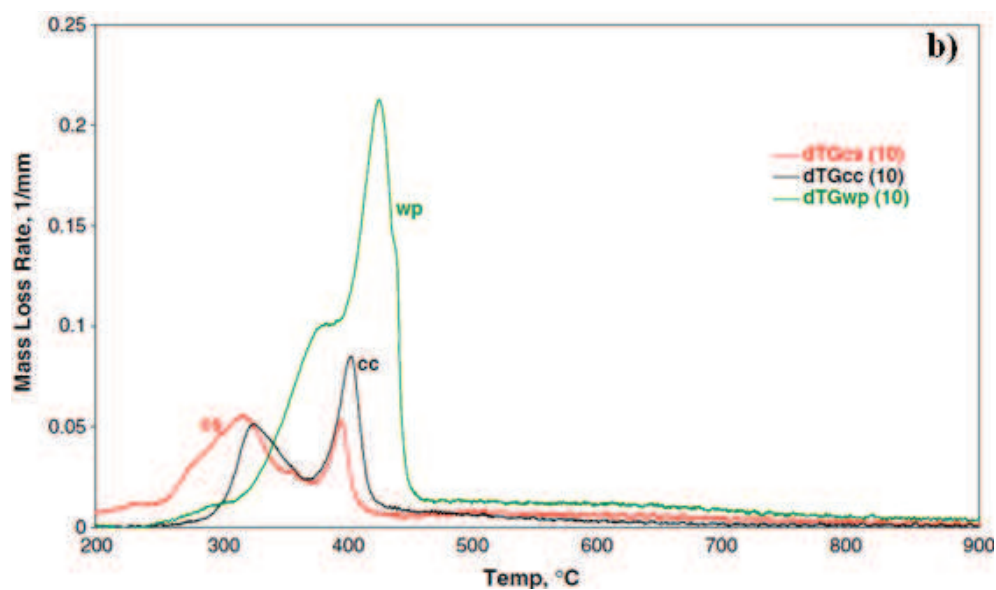


Figura 1.8 Estudio comparativo del TGA (a) y DTGA (b) de muestras de cuesco de coco (CcNS), cuesco de marañón (CNS) y pellets de madera (WP) (Tsamba, et al., 2006, p. 526)

1.2.1.2 Contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo

A pesar de que se elabore carbón con el mismo material precursor, la composición varía significativamente como se muestra en la Tabla 1.5 extraída de varios autores.

Tabla 1.5 Contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo del cuesco de coco según varios autores

Autor	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Carbón fijo (%)
Bastidas, Buelvas, Márquez y Rodríguez (2009, p. 91)	1,30	68,70	30,00
Li, Yanga, Penga, Zhanga, Guoa y Xia (2008, p. 192)	0,74	78,30	20,96
Prauchner y Rodríguez-Reinoso (2012, p. 164)	1,00	---	---
Tsamba, et al., (2006, p. 525)	0,70	74,9	24,4
Warnijati, et al., (1996, p. 935)	0,83	---	---
Yusufu, Ariaahu e Igbabul. (2012, p. 124)	3,50	---	---

El cuesco de coco, por la cantidad de volátiles, lignina y celulosa, es apto para la producción de carbón activado, además la mínima composición de ceniza es importante a la hora de impregnarlo con algún metal.

1.2.2 TERMODINÁMICA DE PIROLISIS

La pirolisis de biomasa generalmente es una reacción endotérmica a temperaturas menores de 280 °C, donde la reacción se torna exotérmica. Además el incremento de presión, favorece la reacción.

La pirolisis es un proceso térmicamente inducido y por lo tanto se debe aplicar el calor suficiente para que se produzcan las reacciones. La Figura 1.9 muestra la

energía de reacción de los principales materiales lignocelulósicos, a través de un escáner diferencial de calor (DSC, por sus siglas en inglés).

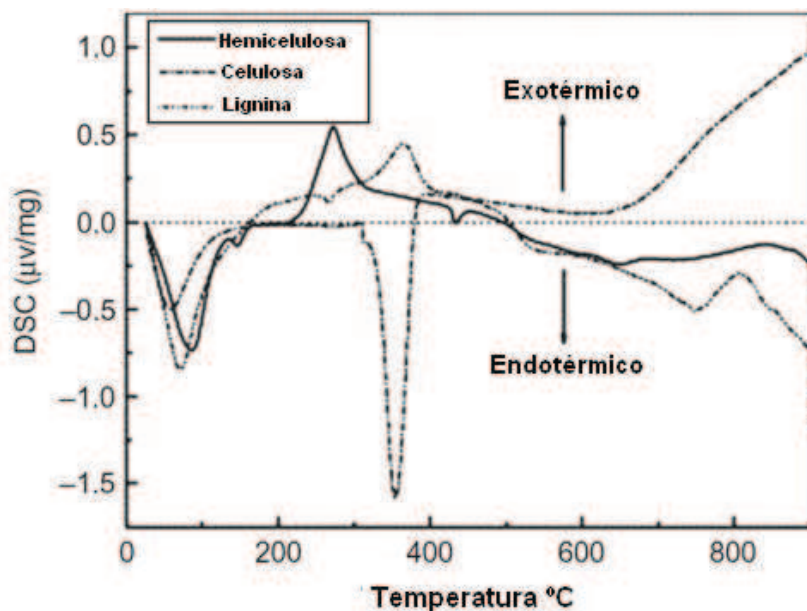
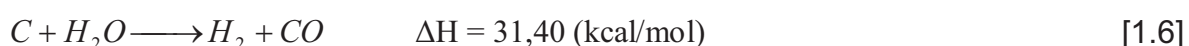
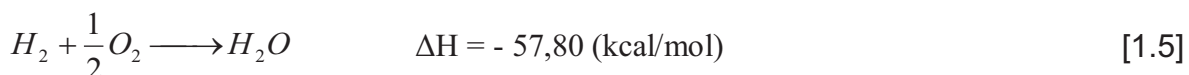
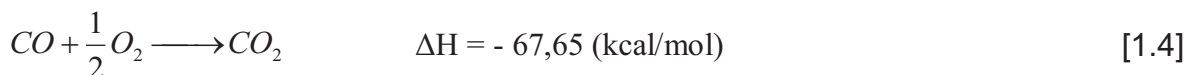
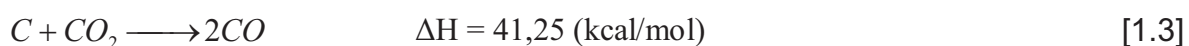
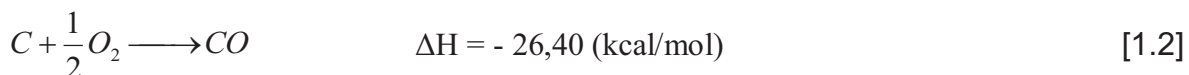
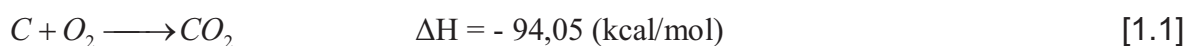
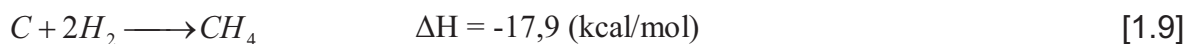
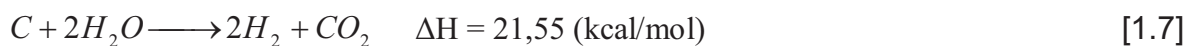


Figura 1.9 Pirolisis de lignina, celulosa y hemicelulosa tomadas con un DSC (Yang, Yan, Chen, Lee y Zheng, 2007, p. 1 784, modificado)

Las Ecuaciones 1.1 a 1.9 muestran las reacciones más importantes que se dan en la pirolisis de cualquier material lignocelulósico y su respectivo calor de reacción (Lewis y Ablow, 1980, p. 303). Algunas reacciones son endotérmicas (signo positivo), por lo que requieren calor para que se produzcan, el mismo que se obtiene de una fuente externa o de la energía que producen las otras reacciones. Los gases que se producen son: vapor de agua, CO_2 , CO , H_2 y CH_4 .





Algunos datos experimentales obtenidos por Lewis y Ablow (1980), señalan que el metano se encuentra en los gases de salida en concentraciones más altas de las previstas por la constante de equilibrio del beta-grafito, este compuesto es el que reacciona para formar poros (p. 302), además advierten la presencia de alquitranes, pero en menores proporciones.

1.2.3 MODELOS CINÉTICOS DE PIROLISIS

La complejidad y la variación en la composición química de los diferentes tipos de biomasa, además de la gran cantidad de variables del proceso, producen una gran variedad de productos en la pirolisis (Gómez, et al., p. 32).

El aspecto menos conocido de la pirolisis son las interacciones entre las fases volátiles y sólidas, que producen reacciones secundarias exotérmicas. La velocidad de calentamiento baja y moderada sin la evacuación rápida de la fase volátil de la zona de reacción, permite un contacto prolongado de esta fase con el producto sólido. Generalmente, a mayor velocidad de calentamiento, mayores son las diferencias entre las temperaturas del reactor y las temperaturas de la biomasa que se procesa (Gómez, et al., 2008, p. 36).

En la descomposición térmica de la biomasa se presentan una variedad infinita de reacciones químicas sucesivas, paralelas y competitivas. Para facilitar el estudio de la pirolisis es necesario realizar algunas simplificaciones que contemplan la descripción de la reacción o las reacciones que limitan la tasa global de reacción. La interpretación más plausible para la cinética global es asumir que existe una fase limitante en la que la reacción tiene una alta energía de activación dentro de

un mecanismo complejo de reacción (Várhegyi, Antal Jr., Jakab y Szabó, 1997, p. 82).

Según Evans y Milne (1987), algunas de las posibles transformaciones que pueden contribuir a la fase limitante en la velocidad de reacción son (p. 136):

- Disminución del grado de polimerización.
- Rompimiento intermolecular en los enlaces de hidrógeno para formar una estructura de menor rigidez, además de una zona de transición (vidriosa).
- Formación de un reactivo intermedio, producto del rompimiento de la glucosa, puede ser una especie libre o iónica (con carga).
- Algún tipo de conversión interna en la conformación molecular de la estructura de la biomasa, principalmente con los componentes mayoritarios (lignina, celulosa y hemicelulosa).

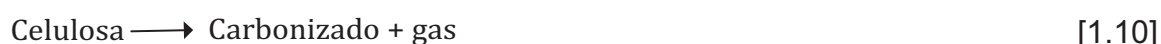
La búsqueda del mecanismo real de reacción tiene un gran interés científico, ya que contribuye al diseño y optimización de reactores para obtener productos deseados, controlando de mejor manera las variables de la reacción. Un paso en la búsqueda de los mecanismos reales de reacción ha sido la formulación de secuencias, a través de modelos con hipótesis que abarcan desde el nivel molecular hasta el nivel fenomenológico (Gómez, et al., 2008, p. 39). Dentro de los modelos que se han propuesto se puede hacer una clasificación:

1.2.3.1 Modelos de una reacción global sencilla

Los modelos de este tipo utilizan una reacción de un paso y una energía de activación, como se aprecia en la Ecuación 1.10. Para poder usarlo, se requiere de una masa final de carbonizado.

Estos modelos han sido empleados ampliamente en la descripción de la velocidad de reacción de la celulosa. Se asume que la degradación térmica de la biomasa es la suma de la descomposición de sus componentes (hemicelulosa, celulosa, lignina) (Cagnon, et al., 2009, p. 296).

Sin embargo, estos modelos no permiten la predicción del comportamiento de generación de los productos de la pirolisis en función de la temperatura, debido a que se establece una relación fija en las ecuaciones para determinar los parámetros cinéticos de reacción. Este inconveniente ha motivado la presentación de modelos semi-globales que intentan superar estas dificultades (Gómez, et al., 2008, p. 40). Algunos autores han usado este modelo: Órfao, Antunes y Figueireido (1999, p. 352); Várhegyi et al., (1997, p. 78).



1.2.3.2 Modelos de reacciones múltiples

Estos modelos fueron formulados según los cambios estructurales de la celulosa durante la pirolisis y de acuerdo a los productos obtenidos mediante su proceso.

Estos modelos consideran 2 reacciones paralelas (Tsamba, et al., 2006, p. 524), los mismos que se indican en la Ecuación 1.11. La principal es de deshidratación, la misma que es responsable de la formación de material carbonizado.

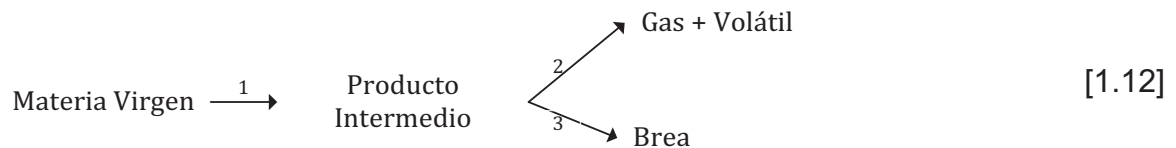
A esta reacción también se asocian la producción de CO, CO₂ y H₂O. La otra reacción toma lugar a través de la despolimerización y conduce a la formación de materia volátil condensable, especialmente de levoglucosano (1-6 deshidroglucosa) (Gómez, et al., 2008, p. 40).



1.2.3.3 Modelos semi-globales de reacción

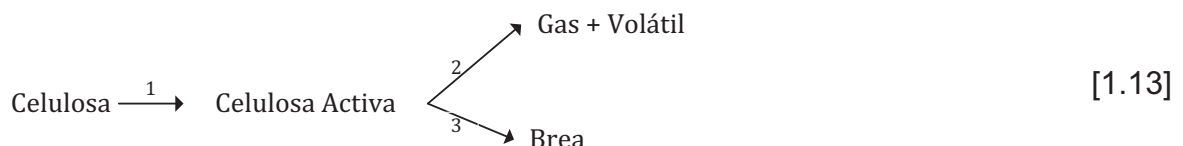
Estos modelos describen la secuencia de las reacciones durante la pirolisis empleando un esquema de tres reacciones independientes y paralelas, de los componentes de la biomasa (hemicelulosa, celulosa y lignina) y hacen uso simultáneamente de un modelo cinético para la formación de los productos (gases, condensados y sólidos). La Ecuación 1.12 representa el modelo de reacciones semi-globales.

Intentan relacionar las características químicas de la biomasa con la formación de las fracciones de los productos de la pirolisis. Los estudios suponen reacciones de primer orden para describir la descomposición de cada fracción y la formación de productos líquidos, gaseosos y sólidos (Vamvuka, Kakaras, Kastanaki y Grammelis, 2003, p. 1 951).



Algunos autores como Broido-Shafizadeh, denominan a este producto intermedio como celulosa activa. Para esto, se considera que la mayoría de la materia virgen es celulosa (Várhegyi, et al., 1997, p. 78).

La Ecuación 1.13 muestra el modelo de reacciones propuesto por Broido-Shafizadeh, que es una modificación de la Ecuación 1.12.



1.2.3.4 Modelos centrados en la formación de los productos

Estos modelos asumen reacciones paralelas separadas para describir la formación y distribución de productos, pero no se considera la composición química de la biomasa, como se puede observar en la Ecuación 1.14.

Este tipo de modelos permite la predicción del comportamiento de la generación de los productos en función de las variables del proceso como: incremento de temperatura y tasa de calentamiento. Sin embargo, no intentan representar mecanismos reales de reacción, simplemente son una herramienta útil en la solución de problemas de ingeniería relativos al diseño de reactores y procesos (Gómez, et al., p. 41).



1.2.4 VELOCIDAD DE REACCIÓN Y CINÉTICA DE REACCIÓN DE PIRÓLISIS

La velocidad de reacción es la variación de la cantidad de sustancia en función del tiempo. La expresión general de la velocidad de reacción se encuentra dada por la Ecuación 1.15 (Fogler, 2006, p. 7):

$$r_i = \left(\frac{dC_i}{dt} \right) \quad [1.15]$$

Donde:

r_i : velocidad de reacción

C_i : concentración inicial

t: tiempo

Para reacciones homogéneas la reacción ocurre en todo el volumen disponible de tal manera que la velocidad de reacción se puede expresar usando la Ecuación 1.16 (Fogler, 2006, p. 39):

$$r_i = \frac{1}{V} \left(\frac{d\eta_i}{dt} \right) \quad [1.16]$$

Donde:

r_i : velocidad de reacción

V : volumen disponible

η_i : moles de la componente i

Una ecuación cinética señala la relación entre la velocidad de reacción y las variables de operación, puede ser temperatura, moles de reactivo o producto, presión, entre otros. Sin embargo, la ley de la velocidad de reacción, se puede reducir a una simple ecuación algebraica, introduciendo la constante cinética de reacción, como se indica en la Ecuación 1.17 (Fogler, 2006, p. 7).

$$r_i = \left(\frac{dC_i}{dt} \right) = kC_i^n \quad [1.17]$$

Donde:

r_i : velocidad de reacción

k : constante cinética

n : orden de la reacción

El término “ n ” describe la probabilidad de que dos moléculas se encuentren y reaccionen para formar el producto. El término “ k ” es función de la temperatura según la ecuación de Arrhenius, descrita según la Ecuación 1.18 (Fogler, 2006, p. 92).

$$k(T) = A \times e^{\left(\frac{Ea}{RT}\right)} \quad [1.18]$$

Donde:

A: factor de frecuencia

Ea: energía de activación

R: constante cinética de los gases

T: temperatura (K)

En esta ecuación se considera una energía de activación que se define como el calor necesario para que los reactivos se transformen en productos, mientras que el factor de frecuencia señala la probabilidad de que un átomo choque contra otro para formar los productos, según la teoría de colisiones (Fogler, 2006, p. 92).

En lo que respecta a la cinética de reacción de pirolisis, se modifica la Ecuación 1.17 para formar la Ecuación 1.19.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n \quad [1.19]$$

Donde el término “ α ” se denomina extensión de la reacción (Nachenius, Ronsse, Venderbosch y Prins, 2013, p. 82; Tsamba, et al., 2006, p. 524). Este término se define comparando la cantidad de biomasa sólida, en base seca que ha sido convertida a carbón durante un periodo de tiempo, la misma que se encuentra expresada en la Ecuación 1.20. De acuerdo a esta ecuación, α tiene un valor entre 0 (biomasa) a 1 (carbón puro).

$$\alpha = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_f} \quad [1.20]$$

Donde:

w_0 : masa inicial

w : masa a un tiempo dado (t) y

w_f : masa sólida después de que no se haya percibido una pérdida considerable de masa.

Reemplazando la Ecuación 1.19 en la Ecuación 1.18, se obtiene la Ecuación 1.21 (Quek y Balasubramanian, 2012, p. 3; Tsamba, et al., p. 524; White, Catallo y Legendre, 2011, p. 5). Esta ecuación es aplicable para procesos isotérmicos.

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \times e^{\left(\frac{Ea}{RT}\right)} \times (1-\alpha)^n \quad [1.21]$$

Si se realizan proceso a una velocidad de calentamiento constante se modifica la Ecuación 1.21 y se obtiene la Ecuación 1.22.

$$\beta \frac{d\alpha}{dT} = A \times e^{\left(\frac{Ea}{RT}\right)} \times (1-\alpha)^n \quad [1.22]$$

Donde β representa la velocidad de calentamiento en °C/min. Si se desea linealizar se aplica el logaritmo natural a la expresión y se modifica la Ecuación 1.22 para obtener la Ecuación 1.23.

$$\ln \left(\frac{\frac{d\alpha}{dt}}{(1-\alpha)^n} \right) = -\frac{Ea}{RT} + \ln \left[\frac{A}{\beta} \right] \quad [1.23]$$

Si se grafica $\ln \left(\frac{\frac{d\alpha}{dt}}{(1-\alpha)^n} \right)$ Vs $-\frac{1}{T}$ de la Ecuación 1.23 se puede obtener la Energía de Activación y el factor de frecuencia (White, et al., 2011, p. 7). Posteriormente con la Ecuación 1.18 definida la temperatura se obtiene la constante cinética de reacción.

1.3 ACTIVACIÓN DE CARBÓN CON CO₂ Y H₂O

A pesar que en la carbonización se produce una microporosidad en sistemas macromoleculares orgánicos como la biomasa debido a la ruptura y volatilización de biopolímeros, estos no aprovechan completamente el potencial de adsorción del material, lo que no lo hace comercialmente aplicable.

Esto conduce hacia una necesidad de ampliar la porosidad existente para incluir microporos más amplios y algunos mesoporos que sirvan como “transporte” de las moléculas a ser adsorbidas (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 243). Es ahí cuando nace el concepto de un carbón “poroso”, también llamado carbón activado.

1.3.1 CARBÓN ACTIVADO

El término “carbón activado” se aplica al material carbonoso amorfo que posee alta porosidad y una gran área superficial (Balci, 1992, p. 20; De la Torre y Guevara, 2005, p. 104).

Según Gupta (2008), el carbón activado es un material carbonoso que tiene una variedad de grupos funcionales, entre otros: radicales carboxilos, aldehídos y otros tipos de grupos funcionales orgánicos, así como metales. Estos grupos funcionales, determinan las interacciones del material con ciertas moléculas tanto líquidas como gaseosas (p. 24).

1.3.1.1 Composición química del carbón activado

El carbón activado, químicamente hablando, es carbono prácticamente puro. La composición química del carbón activado se muestra en la Tabla 1.6 (Yahşi, 2004, p. 29):

Tabla 1.6 Composición química del carbón activado

Elemento	Composición (%)
Carbón	85 – 90
Oxígeno	6
Hidrógeno	0,5
Nitrógeno	0,5
Azufre	1
Cenizas	5 - 6

(Yahşi, 2004, p. 29)

1.3.1.2 Estructura física del carbón activado

El carbón activado posee una estructura microcristalina que se parece al grafito, la misma que da lugar a una porosidad bien determinada donde se pueden distinguir 3 tipos de poros según su radio (IUPAC, 1985, p. 606), los mismos que se muestran en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7 Tipos de poros según su radio

Tipo de poro	Tamaño (nm)
Macroporo	$r > 25$
Mesoporo	$25 > r > 1$
Microporo	$r < 1$

(IUPAC, 1985, p. 606)

Análisis realizados a diversos carbones activados mediante rayos X sugieren dos estructuras básicas (De la Torre y Guevara, 2005, p. 106):

- Pequeñas regiones de cristalitos elementales, compuestos de capas relativamente paralelas de átomos de carbono ordenados hexagonalmente en forma reticular

- Una desordenada estructura reticular de átomos de carbono ubicados en arreglos hexagonales, la cual es más pronunciada en carbones producidos de materiales con elevados contenidos de oxígeno.

1.3.1.3 Porosidad

El carbón activado tiene una gran variedad de tamaños de poros, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su función, en poros de adsorción y de transporte (De Willbert, 2008, p. 6; Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 224).

Los poros de transporte tienen un rango muy amplio de tamaño. En algunos casos son grietas detectables por la vista (0,1 mm). Solo un extremo ejerce atracción sobre el adsorbato y entonces lo hace con una fuerza menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una atracción mayor. Por lo tanto, aunque tiene poca influencia en la capacidad del carbón activado, afectan a la cinética con la que se lleva a cabo la adsorción (De Willbert, 2008, p. 7).

Los poros de adsorción consisten en espacios entre 1 y 5 veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. Los extremos del poro están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato y retenerlo con mayor fuerza (De Willbert, 2008, p. 7). Se dividen en: macroporos, mesoporos y microporos.

Los macroporos atrapan moléculas grandes, por ejemplo las que tienen grupos funcionales clorados o con elementos de gran tamaño de molécula. Los mesoporos son apropiados para moléculas intermedias y los microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas que pueden ser compuestos más volátiles que el agua, ideales para adsorber: olores, sabores y solventes (López, 2004, p.11; Yahşi, 2004, p. 3). Sin embargo, es necesario decir que todos los carbones activados poseen en menor o mayor cantidad las 3 clases de poros.

La distribución del tamaño del poro depende fundamentalmente de tres factores: el origen de la materia prima, el tipo de activación y la duración del proceso de activación. La Figura 1.10 muestra un esquema de la estructura porosa del carbón activado (Bandosz, 2006, p. 5).

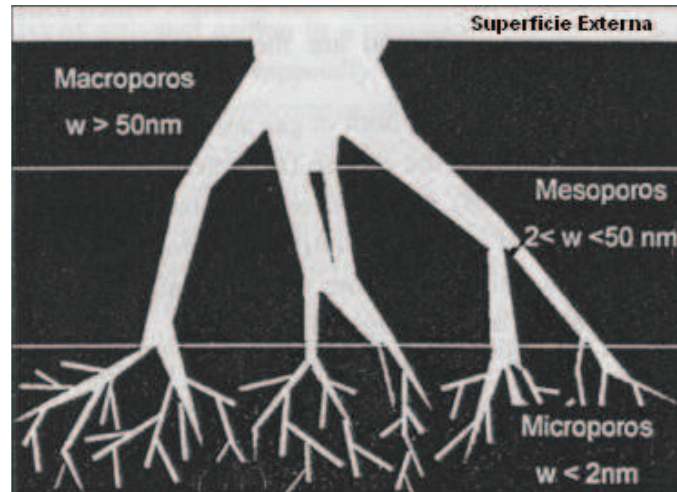


Figura 1.10 Representación Esquemática de la estructura porosa del carbón activado, clasificación de los poros según su tamaño (w = dimensión característica del poro) (Bandosz, 2006, p. 5)

Por lo tanto la capacidad de un carbón activado para retener una determinada sustancia no solo depende de su área superficial, sino también de la proporción de poros internos que tenga dicho carbón y del tamaño de los mismos (IUPAC, 1985, p. 606).

1.3.2 PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Para la elaboración de carbón activado se han utilizado algunas materias primas, principalmente carbones de mina. Sin embargo, ante el exceso de residuos agroindustriales como: cáscaras y semillas de frutas, aserrín y astillas de madera, bagazos, entre otros, éstos se han tornado una materia prima alternativa para la producción (Balci, 1992, p. 8; Hernández-Montoya, García-Servin y Bueno-López, 2012, p. 27). En la selección de la materia prima, la cantidad de biomasa que se puede convertir en carbón activado, producto del desecho, es tan importante como la calidad y el costo de la misma (Balci, 1992, p. 9).

La producción de carbón activado a partir de materiales lignocelulósicos es un proceso relativamente sencillo, además para la producción se aplican técnicas amigables al medio ambiente (Cagnon, et al., 2009, p. 293; Rahman-Mohamed, et al., 2010, p. 1592).

Se han realizado varios estudios para producir carbón activado de desechos producidos por la industria agrícola, materiales como: cáscaras de maní (Mantilla, 1993, p. 36), cuesco de palma (Bt Fuadi, Saadi Ibrahim y Nor Ismail, 2012, p. 225; Joseph, Bono, Krishnaiah, Yee Ling y Chiew Ban, 2009, p. 3 131; Wan Nik, Rahman, Yusof, Ani, y Che Adnan, 2006, p. 646), cáscaras de almendras (Balci, 1992, p. 45), semillas de durazno (Soto, 2007, p. 38), cáscaras de albaricoque (Yahşi, 2004, p. 50) y cuesco de coco (Achaw y Afrane, 2008, p. 285; Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 164; Warnijati, et al., 1996, 934; Yusufu, et al., 2012, p. 124), entre muchos más, han sido estudiados con resultados aceptables.

La producción de carbón activado se da a partir de 2 procesos principales: una carbonización en ausencia de oxígeno y una activación. En el primer proceso, se forman grandes poros en la materia prima, sin embargo, estos no son suficientes para adsorber muchas de las partículas (Achaw y Afrane, 2008, p. 285; Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 164).

Por esta razón es necesario el proceso de activación, donde por medio de altas temperaturas, o la adición de algún químico como catalizador, se produce una gran cantidad de poros en el carbón (Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 164). Existe 2 principales procesos de activación: la activación física o térmica y la activación química, los mismos que se detallan brevemente a continuación:

1.3.2.1 Activación Química

La activación química consiste en carbonizar la materia prima, con la adición de sustancias que restringen la formación de brea y forman poros (Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 163).

La activación química se usa casi exclusivamente para materiales lignocelulósicos. Los agentes activantes influyen en el proceso de pirólisis, por lo que se obtienen buenos resultados de rendimiento. Además, la temperatura necesaria para activar el carbón es menor, comparándola con la que se requiere para activarlo mediante procesos físicos. El carbón activado químicamente, tiene mayor tendencia a formar microporos (Balci, 1992, p. 13; Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 170).

Entre los reactivos que se usan para activar tenemos: ácido fosfórico (H_3PO_4), cloruro de zinc ($ZnCl_2$) (Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 164), hidróxido de sodio ($NaOH$), hidróxido de potasio (KOH) y carbonatos como el de potasio y sodio (K_2CO_3 y Na_2CO_3) (Hernández-Montoya, et al., 2012, p. 25).

1.3.2.2 Activación Física

La activación se lleva a cabo en 2 etapas: en la etapa inicial, cuando el “burn-off” o índice de combustión no supera el 10 %, el carbón se quema y desorganiza preferentemente a los poros cerrados. Esto produce que se expongan al agente activante.

El efecto que se vuelve cada vez más significativo es el ensanchamiento de poros ya existentes o la formación de nuevos de mayor tamaño por la quema fuera de las paredes adyacentes de los microporos (Yahşi, 2004, p. 24).

A bajas temperaturas, la reacción se da lentamente; sin embargo, el aumentarla tampoco es una opción, debe ser adecuadamente elegida para que sea el factor determinante de la velocidad de reacción (Ioannidou y Zabaniotou, 2007, p. 1 970). Esto conduce a que las reacciones se produzcan en la región interior del carbón, así se da el agrandamiento de poros. A temperaturas más altas, el factor controlante se vuelve la reacción química, esta se produce en el exterior del poro (Levenspiel, 1986, p. 406; Yahşi, 2004, p. 24).

Generalmente la carbonización y la activación son procesos separados en la producción (Wei, Li y Yaping, 2006, p. 266); sin embargo, estudios e investigaciones recientes señalan un incremento en la tendencia de producir hornos que puedan hacer los 2 procesos simultáneamente (Luna, González, Gordon y Martín, 2007, p. 45). La Figura 1.11 muestra un esquema del procedimiento que se utiliza para la producción de carbón activado mediante activación física.

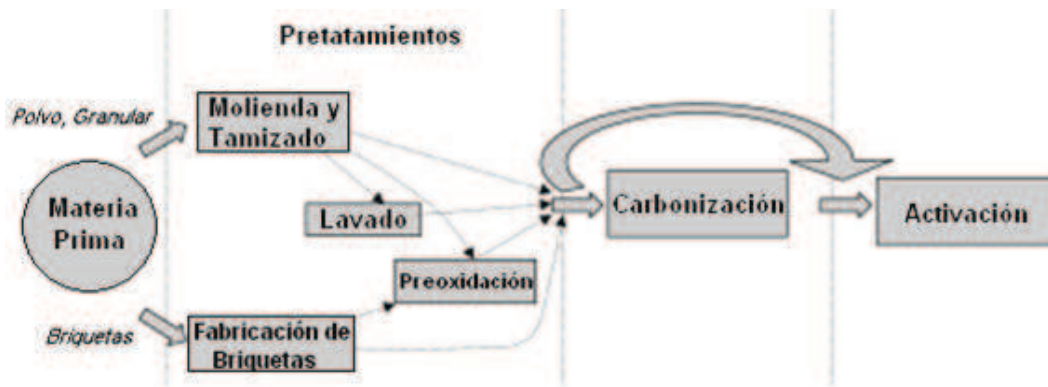


Figura 1.11 Diagrama general de la producción de carbón activado por activación física (Bandosz, 2006, p. 15, modificado)

El carbón producido es activado por medio de agentes que a pesar de reaccionar, no se los considera químicos. Las sustancias comúnmente más usadas para activarlo son: vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2). La activación generalmente se produce a temperaturas entre $800\text{ }^{\circ}C$ hasta $1\ 100\text{ }^{\circ}C$ (Hernández-Montoya, et al., 2012, p. 29; Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 164; Yahşi, 2004, p. 24).

1.3.2.3 Diferencias entre Activación Física y Activación Química

Prauchner y Rodríguez-Reinoso (2012) señalan que se puede producir carbón activado de alta porosidad con cualquiera de los 2 métodos; sin embargo, las propiedades específicas son muy diferentes, por lo que es necesario elegir el método de activación de acuerdo a las propiedades que se desea dar al carbón activado (p. 170).

La activación física, permite obtener una distribución de poro más precisa, permitiendo que los poros del carbón activado producido sean más reducidos. El problema es la densidad aparente, la misma que al tener poros muy pequeños, disminuye considerablemente.

Por otro lado, la activación química permite mejorar la densidad aparente porque elimina la formación de estos poros, lo que provoca un aumento en la capacidad adsorptiva volumétrica (Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 170). Además produce una disminución de pérdida de peso durante el proceso de activación, lo que permite obtener carbón activado de mejores propiedades mecánicas y con una gran cantidad de mesoporos (Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 170).

Otra ventaja del proceso de activación química es la disminución considerable de temperatura para la activación del carbón, lo que disminuye considerablemente el costo de energía (Ioannidou y Zabaniotou, 2007, p. 1 972). Sin embargo, entre las desventajas que presenta este proceso está: la eliminación de los agentes químicos excedentes después de la carbonización y el tiempo de impregnación de la materia prima con el agente químico, lo que implica un costo adicional (Balci, 1992, p. 18).

1.3.3 ACTIVACIÓN FÍSICA CON DIÓXIDO DE CARBONO Y VAPOR DE AGUA

El carbón necesita ser sintetizado ya que la porosidad producida en la etapa previa de pirolisis no posee una cantidad considerable de mesoporos y microporos (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 8). Para esto se utilizan gases como el vapor de agua y el CO_2 , los mismos que actúan como catalizadores y reaccionan con el beta-grafito (sitios activos de carbón), para destapar poros obstruidos y también para formar nuevos poros.

La pirolisis comienza a producirse a temperaturas entre 200 a 300 °C, debido a la producción de gases y material volátil producto de las reacciones. Además se

produce una reducción de la densidad aparente, con lo que Prauchner y Rodríguez-Reinoso (2012) concluyen que existe una posible contracción de partículas lo que restringe el desarrollo de una estructura porosa (p. 166).

La temperatura de adsorción confiere una elevada difusión de las moléculas de CO₂, lo que proporciona una mayor porosidad en menor tiempo. A 750 °C bajo atmósfera reductora se produce una disminución de la gasificación del carbón producido, lo que se traduce en una variación casi constante de peso con respecto al tiempo. Esta gasificación permite un desarrollo de un poro rudimentario en el carbón. Posteriormente es necesario agregar un catalizador, como por ejemplo vapor de agua, el cual reacciona con las paredes de los poros y los ensancha. La Tabla 1.8 muestra algunos valores de índice de yodo producidos a partir de cuesco de coco mediante activación física según varios autores.

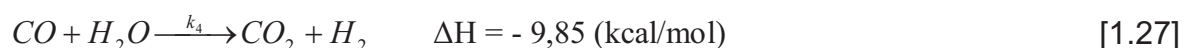
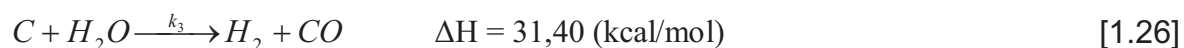
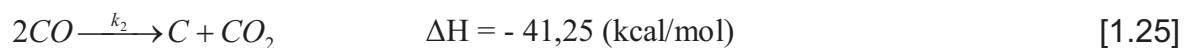
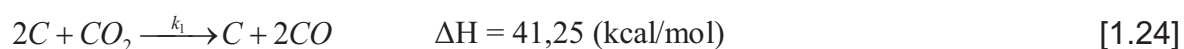
Tabla 1.8 Índice de yodo del carbón activado de cuesco de coco por activación física según varios autores

Autor	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Agente Activante	Índice de yodo
Achaw y Afrane (2012, p. 165)	850	2	CO ₂	640
Fadhil y Deyab (2008, p. 178)	800	1	CO ₂	655
Yusufu, et al., (2012, p. 128)	600	2	CO ₂	840,18

Las reacciones de activación de carbón con CO₂ o vapor de agua son endotérmicas, necesitan grandes cantidades de calor (se realizan a temperaturas entre 700 a 950 °C), estas se muestran en la Ecuaciones 1.26, 1.27 y 1.28 (González, Román, González-García, Valente y Ortiz, 2009, p. 7 474). La reacción de la Ecuación 1.26 está presente tanto en la activación con CO₂ como con vapor de agua.

1.3.3.1 Termodinámica de las reacciones de gasificación

Las reacciones de gasificación del carbón se dan principalmente entre 800 a 1 000 °C debido a que son endotérmicas bajo atmósferas con CO, CO₂ o vapor de agua según el calor de reacción señalado en las Ecuaciones 1.24 a 1.27. Las reacciones del carbón con oxígeno (O₂) son altamente exotérmicas, por lo que este gas no es usado como agente activante para la producción de carbón activado (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 248).



El carácter endotérmico de las reacciones de gasificación proporciona un control más preciso de las condiciones experimentales en el horno. En algunas empresas de carbón activado, el calor que se suministra es una mezcla de gases de combustión y vapor de agua, lo que produce una activación con dióxido de carbón y agua. En otras, los gases de activación son los producidos en la carbonización, para sustituir combustibles; sin embargo, este último reduce significativamente el rendimiento (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 249).

1.3.3.2 Cinética de Activación. Modelo de conversión continua

Algunos autores como Kunii y Chikasu (2008) proponen un modelo de conversión continua o progresiva para la activación de carbón con gases (p. 31). Levenspiel (1986) define al proceso como una reacción en donde el gas penetra en “toda” la partícula simultáneamente, por lo que el sólido se modifica de manera progresiva como muestra la Figura 1.12 (p. 396).

Kunii y Chikasu (2008, p. 27) y Levenspiel (1986, p. 393) definen a las reacciones de carbonización como reacciones sólido-fluido, las mismas que se pueden representar por la Ecuación 1.28.



Kunii y Chikasu (2008) definen la velocidad de reacción según la Ecuación 1.29 (p. 31).

$$\frac{d\alpha_B}{dt} = k_r C_A (1 - \alpha_B) \quad [1.29]$$

Donde:

k_r : es la constante cinética de la reacción

α_B : es la extensión de la reacción, en este caso el porcentaje de carbón fijo producido

C_A : es la concentración del fluido

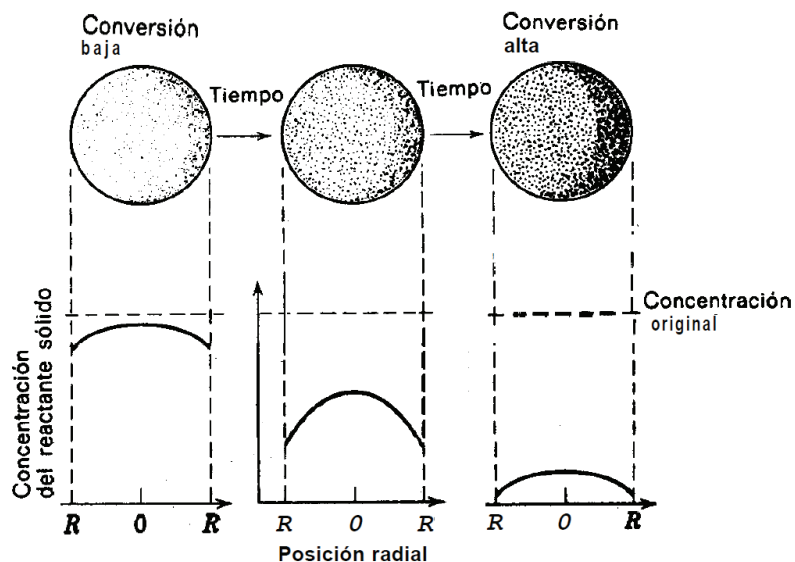


Figura 1.12 Modelo de conversión progresiva
(Levenspiel, 1968, p. 396)

1.3.4 VELOCIDAD DE REACCIÓN DE LA ACTIVACIÓN DE CARBÓN CON DIÓXIDO DE CARBONO Y VAPOR DE AGUA

Las ecuaciones de velocidad de reacción para la activación del carbón con CO₂ y vapor de agua respectivamente se representan en las ecuaciones 1.30 y 1.31 (Huang, et al., 2010, p. 843; Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 261).

$$r_1 = \frac{k_1 P_{CO_2}}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}} \quad [1.30]$$

La Ecuación 1.30 indica que la reacción se inhibe por el CO que reacciona con los complejos de oxígeno del carbón de la superficie para formar CO₂. Y este a su vez, reacciona también con las biomoléculas que contienen oxígeno y forma nuevos “sitios activos” (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 261). Finalmente esta reacción disminuye la gasificación.

$$r_2 = \frac{k_4 P_{H_2O}}{1 + k_5 P_{H_2} + k_6 P_{H_2O}} \quad [1.31]$$

Las reacciones producen una eliminación inminente de carbón, para abrir poros y producir nuevos (Huang, et al., 2010, p. 846; Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 261). Huang, et al., (2010) proponen una velocidad de reacción que une las 4 reacciones, según 2 esquemas: el primero señala que tanto la activación con CO₂ y con vapor de agua ocurren en el mismo sitio activo del carbón, mientras que la otra indica que se producen en sitios activos diferentes (p. 846), las reacciones están dadas por las Ecuaciones 1.32 y 1.33.

$$r = \frac{k_1 P_{CO_2} + k_4 P_{H_2O}}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2} + k_5 P_{H_2} + k_6 P_{H_2O}} \quad [1.32]$$

$$r = \frac{k_1 P_{CO_2}}{1 + k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO_2}} + \frac{k_4 P_{H_2O}}{1 + k_5 P_{H_2} + k_6 P_{H_2O}} \quad [1.33]$$

2. PARTE EXPERIMENTAL

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo producir carbón activado a partir de cuesco de coco, mediante una carbonización y una posterior activación física con vapor de agua, además del diseño de una planta de producción de 10 t/mes. A continuación, se presenta un breve resumen de la metodología experimental utilizada.

El cuesco se secó durante una semana a temperatura ambiente ($T \approx 18 \text{ }^\circ\text{C}$) en una terraza, después fue reducido de tamaño y caracterizado. Se determinaron: densidad aparente, densidad real y dureza, con la normativa INEN 1 989:94 (1995a), cantidad de celulosa, lignina y grasas solubles en alcohol.

La materia prima seca fue sometida a una carbonización a escala de laboratorio bajo atmósfera reductora ($\lambda < 1$) a temperaturas de 400, 500 y 600 $^\circ\text{C}$ en una mufla SEPOR INC. Se tomaron muestras a 1, 1,5 y 2 h respectivamente para cada temperatura, las mismas que fueron sometidas a una caracterización física y química. Después se realizaron pruebas en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera, para evaluar la influencia de la temperatura y tiempo sobre la carbonización mediante la caracterización física y química del carbón producido.

Fijados la temperatura y tiempo de carbonización en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera, se pirolizó la materia prima a 500 $^\circ\text{C}$ durante 30 min para posteriormente activar el carbón producido a una temperatura constante de 850 y 950 $^\circ\text{C}$ respectivamente, con un flujo constante de vapor de agua (40 kg/h) y atmósfera reductora ($\lambda = 0,9$). Se caracterizó el carbón activado producido y se determinó el índice de yodo de cada muestra. A partir de los datos obtenidos se determinó el tiempo de activación.

Con los datos obtenidos de la pirolisis y la activación se determinó la cinética de cada proceso, para el diseño de una planta de producción de 10 t/mes. Se evaluó la pre-factibilidad económica para su implementación. En la Figura 2.1 se presenta un esquema de la metodología usada en este trabajo.

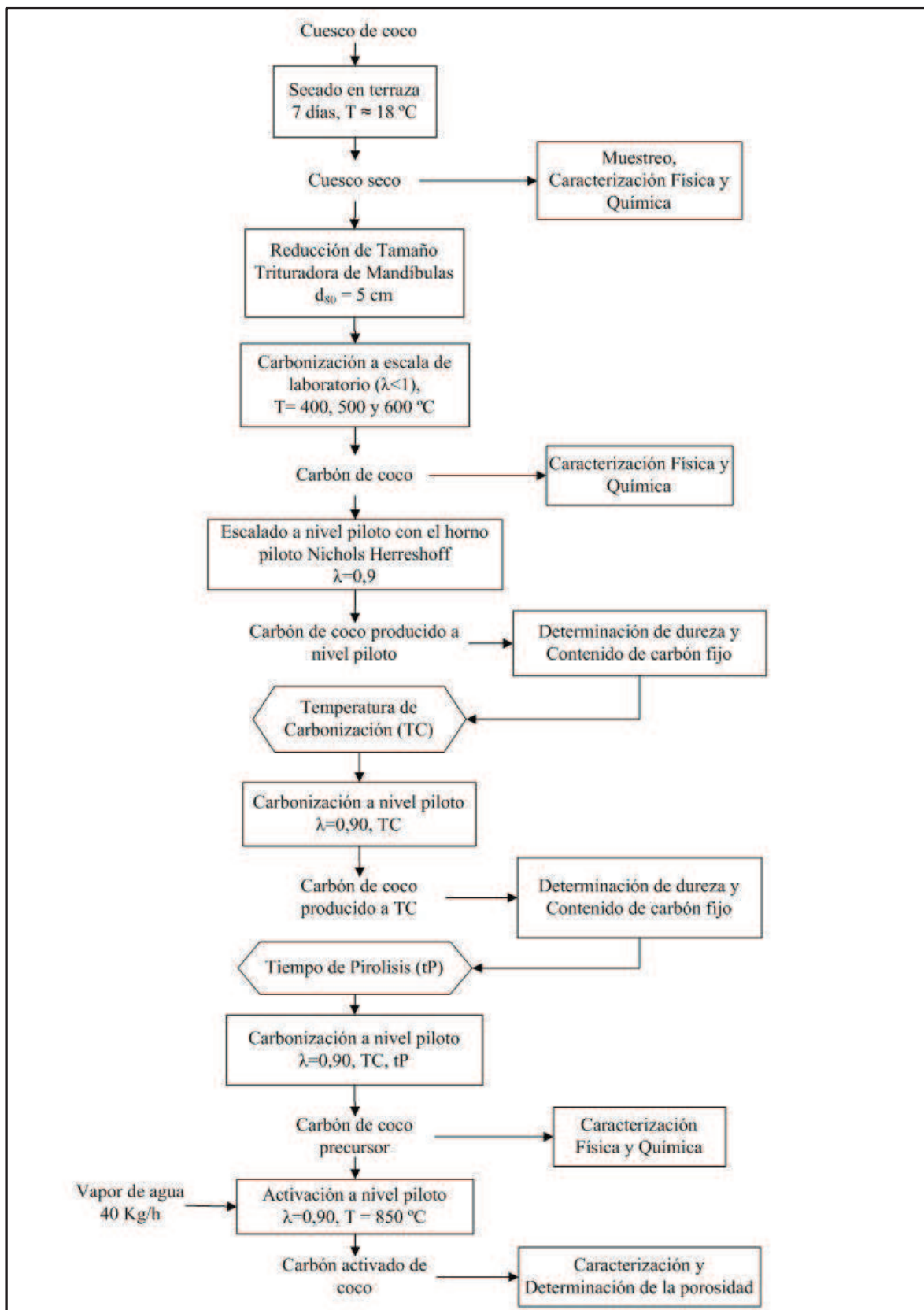


Figura 2.1 Metodología empleada para la obtención de carbón activado de alta dureza a partir de cuesco de coco

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL CUESCO DE COCO, PROVENIENTE DE SAN LORENZO, ESMERALDAS

En la presente investigación se utilizaron conchas de coco como materia prima. Las mismas provienen de San Lorenzo (Esmeraldas) y son un residuo generado en la producción de bebidas. Se obtuvieron aproximadamente 500 conchas a las que se las secó alrededor de una semana a temperatura aproximada de 22 °C como se indica en la Figura 2.2. Una vez secas, se eligieron 30 conchas al azar según la normativa INEN 1 233:95 (1995b), para determinar su respectivo diámetro menor y mayor, espesor y peso.



Figura 2.2 Fotografía del secado de las conchas de coco en la terraza a temperatura ambiente

La materia prima fue sometida a una caracterización para determinar las propiedades químicas y físicas.

2.1.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA PRIMA

Para la caracterización química de la materia prima se realizó, como pretratamiento, un proceso de pulverización para reducir su tamaño hasta 74 μm (malla 200), para esto se usó un pulverizador NAEF, cuya capacidad es de 100 g.

El pulverizador tiene una cámara cilíndrica de 14 cm de diámetro y una altura de 4,4 cm. Consta de dos partes móviles: un cilindro hueco de diámetro externo 12 cm, diámetro interno de 10,8 cm y un altura de 4,2 cm. La otra es un cilindro de 7 cm de diámetro y altura 4 cm. El pulverizador genera movimientos centrífugos que permiten el proceso de reducción de tamaño.

A la materia prima pulverizada se le sometió a varios análisis para determinar el contenido de: lignina, celulosa, aceites solubles en benceno y humedad. Para esto se usó la normativa Tappi, aplicable a maderas. Cada norma se identifica en la Tabla 2.1. Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio de Pulpa y Papel de la EPN. Los análisis se detallan a continuación:

Tabla 2.1 Normas Tappi aplicadas a la caracterización química de la Materia Prima

Análisis	Método	Bibliografía
Humedad	Tappi T-412-M(6)	Tappi (1970a)
Solubilidad en alcohol	Tappi T-6-os-59	Tappi (1970b)
Celulosa	Tappi T-17-M-55	Tappi (1970c)
Lignina	Tappi T-13-os-54	Tappi (1970d)

2.1.1.1 Determinación de Humedad

Se pesaron sobre una luna de reloj tarada 2 g de coco pulverizado. La muestra fue colocada en la estufa a 105 °C por 3 h, para después enfriarse en un desecador y ser pesada nuevamente. Los resultados se presentan a partir de la diferencia entre el peso inicial y final de la muestra, por medio de la Ecuación 2.1:

$$\%H = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad [2.1]$$

Donde:

M_i : peso muestra inicial

M_f : peso muestra final

2.1.1.2 Determinación del contenido de ceras, grasas y resinas solubles en alcohol-benceno

Se pesaron 2 g de cuesco de coco pulverizado y se colocaron en timbles tarados cubiertos con papel filtro y algodón para evitar pérdidas. Por otro lado se preparó el solvente que está compuesto de 33 ml de alcohol etílico al 70 % por cada 67 ml de benceno.

Los timbles fueron introducidos en el equipo soxhlet que mantuvo un reflujo constante del solvente por 16 h a 80 °C, para lograr que las ceras, grasas y resinas se acumulen en el extracto. Después de este tiempo los balones fueron llevados al rotavapor y a una temperatura de 70 °C, se recuperó el benceno de la mezcla.

Se llevaron los balones a una estufa por 2,5 h y se secaron a 105 °C. Transcurrido este tiempo, los balones fueron retirados y enfriados en un desecador para posteriormente ser pesados. Los resultados se obtuvieron, por medio de la Ecuación 2.2:

$$\%CRG = \frac{M_i - M_f}{M_T(1 - H)} \times 100 \quad [2.2]$$

Donde:

%CRG: contenido de ceras, resinas y grasas solubles

M_i: masa inicial del balón

M_f: masa final del balón

M_T: masa inicial del timble

H: humedad del análisis

2.1.1.3 Determinación del contenido de celulosa

Para este análisis se pesaron 2 g de muestra tratada con alcohol – benceno que quedó libre de ceras, grasas y resinas en un Erlenmeyer de 125 mL, a los cuales se agregaron 50 mL de hipoclorito de sodio (NaClO) al 10 % y se dejó la muestra en reposo a temperatura ambiente durante 16 h.

A continuación se trasvasó el material a un crisol de filtración previamente tarado. La muestra fue lavada sucesivamente con: 50 mL de agua, 50 mL de dióxido de azufre (SO₂) al 3 %, 50 mL de agua y 50 mL de sulfito de sodio (Na₂SO₃) al 2 %.

Se transfirió el contenido del crisol de filtración a un vaso de precipitación con 115 mL de sulfito de sodio al 2 %, para eliminar cualquier residuo sobrante y se lo dejó reposar por 1 h. Transcurrido ese tiempo, se volvió a filtrar en el crisol con 250 mL de agua caliente. Luego las muestras fueron secadas en la estufa a 105 °C por 3 h, enfriadas en el desecador y pesadas. El contenido de celulosa se determinó con la Ecuación 2.3:

$$\%Celulosa = \frac{M_{iC} - M_{fC}}{M_m(1 - H)} \times 100 \quad [2.3]$$

Donde:

M_{iC}: masa inicial del crisol

M_{fC}: masa final del crisol

M_m: masa inicial de la muestra

H: humedad del análisis

2.1.1.4 Determinación del contenido de lignina

Se pesó 1 g de muestra tratada con alcohol – benceno que quedó libre de ceras, grasas y resinas en un Erlenmeyer de 125 mL al que fueron añadidos 15 mL de ácido sulfúrico al 72 %.

A una temperatura aproximada de 18 °C se agitó continuamente la mezcla durante 8 h para después ser trasvasada a un balón de 1 000 mL donde se agregaron 560 mL de agua y se hirvió por 8 h a reflujo. A continuación se dejó enfriar y sedimentar la muestra contenida en el balón y se la filtró en un crisol poroso previamente tarado, lavándose con 500 mL de agua caliente.

Se secó la muestra en la estufa durante 3 h a 105 °C y se colocó en el desecador hasta que se enfrió. Luego la muestra fue pesada para finalmente determinar el contenido de lignina con la Ecuación 2.4:

$$\%Lignina = \frac{M_{iC} - M_{fC}}{M_m(1-H)} \times 100 \quad [2.4]$$

Donde:

M_{iC} : masa inicial del crisol

M_{fC} : masa final del crisol

M_m : masa inicial de la muestra

H: humedad del análisis

2.1.1.5 Contenido de volátiles, cenizas y Carbón fijo

Para la determinación de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo se empleó la metodología propuesta por el Council for Mineral Technology (1987). Se pesó en un crisol previamente tarado aproximadamente 1 g de materia prima pulverizada. Se metió el crisol con su tapa a una mufla Thermolyne a 950 °C durante 7 min. Se sacó el crisol de la mufla y se esperó a que se enfríe en un desecador, se pesó el crisol con la muestra para obtener la cantidad de volátiles.

Posteriormente se colocó el crisol por 2 h en la mufla a 950 °C sin tapa, se dejó enfriar en un desecador y se pesó el crisol con la muestra para obtener la cantidad de cenizas. La diferencia es la cantidad de carbón fijo en la muestra.

2.1.2 REDUCCIÓN DE TAMAÑO Y DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

La materia prima fue reducida de tamaño hasta obtener un $d_{80} = 5$ cm en una trituradora de mandíbulas Braun Chipmunk con capacidad de 500 g. Para esto, se realizó un canchado manual con la ayuda de un martillo, con el fin de permitir el ingreso del cuesco de coco en la tolva de alimentación (diámetro = 12 cm). La Figura 2.3 muestra el cuesco de coco triturado.



Figura 2.3 Fotografía del cuesco de coco triturado hasta $d_{80} = 5$ cm

Luego del proceso de trituración se determinó el tamaño de partícula (d_{80}) del material mediante análisis granulométrico, para lo cual se empleó un sistema de tamices Tyler y un agitador Rot-Tap con capacidad para 7 tamices y un recipiente que cumple la función de fondo.

Para el procedimiento se cargaron en los tamices 300 g de cuesco de coco triturado, cuya numeración y abertura se muestran en la Tabla 2.2. El material fue tamizado durante 15 min, después de lo cual se pesó cada muestra retenida en cada tamiz.

Tabla 2.2 Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico de los materiales molido

Malla Tyler (#)	Abertura (μm)
3/8 in	9 500
3	6 730
4	4 760
6	3 360
8	2 380
10	1 650
14	1 400
Fondo	-

2.1.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA MATERIA PRIMA

Para la caracterización física se determinó: la densidad real, la dureza y la densidad aparente. El procedimiento se detalla a continuación:

2.1.3.1 Densidad Real

Para la densidad real se usó un picnómetro. Se pesó aproximadamente 1 g de materia prima pulverizada y se colocó en el picnómetro. Se llenó el mismo con agua y se volvió a pesar. Finalmente se llenó el picnómetro seco con agua y se pesó. La determinación de la densidad se efectuó mediante la Ecuación 2.5:

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{W_{pic+H_2O} - W_{pic+H_2O+m}}{W_{pic+m} + W_{pic}}} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad [2.5]$$

Donde:

δ : densidad real

W_{pic+H_2O} : peso del picnómetro lleno de agua

W_{pic+H_2O+m} : peso del picnómetro con la muestra lleno de agua

W_{pic+m} : peso del picnómetro con la muestra

W_{pic} : peso del picnómetro vacío

2.1.3.2 Determinación de la dureza y densidad aparente

Para la determinación de la dureza se adaptó la norma NTE INEN 1 989:94 (1995a). Se tomó una muestra de aproximadamente 125 cm³ de material que se encontraba entre las # Tyler N° 6 y 10 (3 360 μ m y 1 650 μ m), de este volumen se tomaron 100 cm³ y se pesaron para encontrar la densidad aparente.

Los 100 cm³ pesados se colocaron en el fondo de una serie de tamices con 30 bolas de acero: 15 con un diámetro de 12,7 mm y 15 con un diámetro de 9,5 mm. Se tamizó la muestra durante 30 min en un Rot-Tap. Transcurrido el tiempo se retiraron las bolas con mucho cuidado y se colocó la muestra en el tamiz de malla 10, se prendió el equipo por 10 min y se pesó la cantidad de muestra retenida. La dureza es la variación del peso retenido del peso original colocado en el fondo y tamizado con las 30 bolas de acero.

2.1.4 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA MATERIA PRIMA

La muestra pulverizada fue sometida a un análisis termogravimétrico con el equipo TGA Shimadzu ubicado en el laboratorio del CIAP de la EPN. Se pesaron aproximadamente 20 mg de cuesco de coco y se sometieron a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min desde temperatura ambiente hasta 850 °C bajo atmósfera de nitrógeno. El equipo midió la variación del peso con la temperatura y la derivada del peso con respecto al tiempo.

2.1.5 CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA PRIMA

El cuesco de coco pulverizado fue analizado mediante microscopía electrónica de barrido con el equipo Tescan-Vega. Se colocaron las muestras en la cámara del microscopio y se tomaron algunas fotografías de la porosidad de la materia prima a 500, 1 000, 2 000 y 3 000 grados de aumento.

2.2 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO SOBRE LA CARBONIZACIÓN DEL CUESCO DE COCO EN EL HORNO PILOTO NICHOLS HERRESHOFF MONO SOLERA

Para determinar la influencia de la temperatura y el tiempo sobre la carbonización del cuesco de coco, primero se realizaron pruebas a nivel de laboratorio en la mufla SEPOR INC y luego a nivel piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera.

2.2.1 PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO

Se pesaron 50 g de materia prima triturada y se colocaron en un crisol. Se agregaron aproximadamente 5 g de aserrín para crear una atmósfera reductora y se tapó el crisol con papel aluminio, como se indica en el esquema de la Figura 2.4. Se prendió la mufla a 400 °C y cuando la temperatura se mantuvo constante, se colocaron 3 crisoles. Se sacó cada crisol a 1, 1,5 y 2 h respectivamente. Se repitió el procedimiento para 500 y 600 °C.

A cada muestra obtenida, 9 en total, se realizó análisis de: densidad real, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.3.1; densidad aparente y dureza, señalado en la sección 2.1.3.2 y contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo,

detallado en la sección 2.1.1.5. Finalmente se tomó el peso final para determinar el rendimiento.

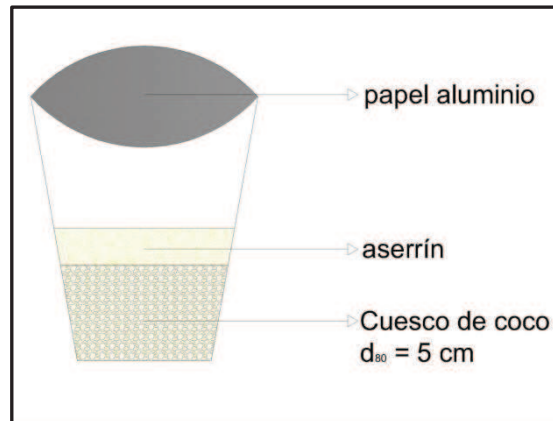


Figura 2.4 Esquema del crisol que fue llevado a la mufla SEPOR INC para carbonizar el cuesco de coco

2.2.2 PRUEBAS A ESCALA PILOTO EN EL HORNO PILOTO NICHOLS HERRESHOFF MONO SOLERA

Con los datos obtenidos en el laboratorio se realizaron pruebas a nivel piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera, la figura 2.5 muestra una fotografía del mismo y un esquema.

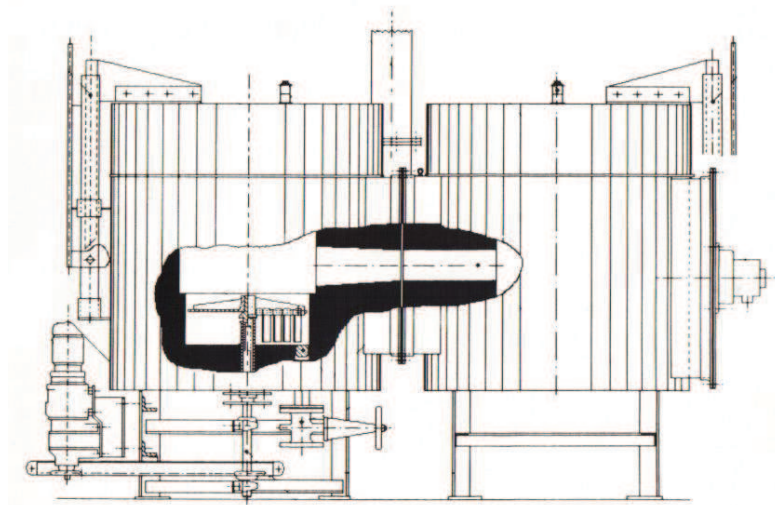


Figura 2.5 Fotografía del Horno Nichols Herreshoff mono solera y su esquema (De la Torre, Guevara y Ríos., 2005, p. 54), modificado

2.2.2.1 Determinación de la temperatura de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera

Se encendió el horno Nichols Herreshoff mono solera y se estableció una atmósfera reductora de $\lambda \approx 0,90$, para que no se produzca un exceso CO y CO₂ como muestra la figura 2.6, para esto se reguló la entrada de aire y gas al horno.

El horno Nichols Herreshoff mono solera trabaja con calentamiento de GLP y puede operar en lecho fijo o agitado. La atmósfera en el interior se controla con el factor lambda (λ) que es la relación entre la entrada de aire y combustible en el quemador. Para atmósferas oxidantes $\lambda > 1$, una atmósfera reductora se produce cuando $0,4 < \lambda < 1$. La composición de los gases en el interior del horno en función de su lambda se encuentra en la Figura 2.6 (De la Torre, et al., 2005, p. 53).

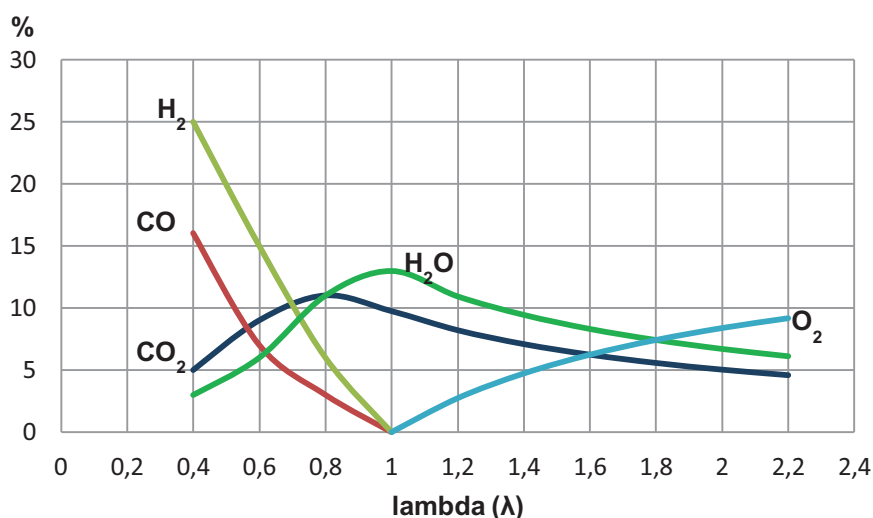


Figura 2.6 Composición de los gases de combustión del propano a 0,72 ATM (presión atmosférica de Quito)
(De la Torre, et al., 2005, p. 53, modificado)

Cuando el horno alcanzó aproximadamente 100 °C se colocaron 4 kg de cuesco de coco triturado en lecho agitado. Se tomaron muestras periódicas cada 50 °C en un perfil de temperatura entre 400 y 600 °C. A cada una se realizó análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.5.

A partir de la relación entre contenido de carbón fijo y dureza se estableció la temperatura de carbonización.

2.2.2.2 Determinación del tiempo de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera

Se encendió el horno Nichols Herreshoff mono solera y se estableció un $\lambda \approx 0,90$. Cuando el horno alcanzó una temperatura constante de 500 °C se colocaron 4 kg de cuesco de coco triturado en lecho agitado. Se tomaron muestras periódicas durante 3 h.

El mismo procedimiento se realizó para una temperatura de 600 °C. A cada muestra se realizaron pruebas de: densidad aparente y dureza, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.3.2 y contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo, detallado el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.5.

A partir de la mejor relación entre contenido de carbón fijo y dureza se estableció el tiempo de carbonización.

2.2.2.3 Determinación del rendimiento de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera

Se encendió el horno Nichols Herreshoff mono solera y se estableció un $\lambda \approx 0,90$. Cuando el horno alcanzó la temperatura constante de carbonización (500 °C), determinada en la sección 2.2.2.1, se colocó 1 kg de cuesco de coco triturado en lecho fijo.

Se carbonizó durante 30 min que fue el tiempo de pirolisis establecido en la sección 2.2.2.2 y se pesó el carbón formado. El rendimiento es la diferencia entre el cuesco de coco precursor que entra y el producto que sale.

2.3 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE ACTIVACIÓN FÍSICA CON VAPOR DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO DE CUESCO DE COCO EN EL HORNO PILOTO

Se encendió el horno Nichols Herreshoff mono solera y se estableció un $\lambda \approx 0,90$. Cuando el horno alcanzó la temperatura constante de carbonización (500 °C), se colocaron 4 kg de cuesco de coco triturado en lecho agitado.

Se carbonizó durante 30 min que fue el tiempo de pirolisis establecido en la sección 2.2.2.2. Este procedimiento se realizó varias veces para producir aproximadamente 12 kg de carbón.

El carbón producido fue tamizado con el fin de eliminar el material fino producido por la carbonización del cuesco de coco y la agitación. Para esto se eligió un tamaño de partícula de 1 650 μm (# Tyler N° 10), el carbón retenido fue usado para la activación.

2.3.1 ACTIVACIÓN FÍSICA CON VAPOR DE AGUA EN EL HORNO NICHOLS HERRESHOFF MONO SOLERA

Se encendió el horno Nichols Herreshoff mono solera y se estableció un $\lambda \approx 0,90$. Cuando el horno alcanzó una temperatura constante de 950 °C se reguló la entrada de vapor de agua del calderín, por medio de una válvula de globo, a 40 kg/h (26,7 m³/h).

Una vez que la temperatura se mantuvo constante, se colocaron 4,5 kg de carbón de cuesco de coco previamente tamizado en lecho agitado. Se tomaron muestras cada 30 min, durante 150 min. Se repitió el procedimiento para una temperatura de horno de 850 °C.

Cada muestra fue sometida a un análisis de índice de yodo para determinar la superficie específica del carbón activado producido, análisis del contenido de cenizas volátiles y carbón fijo, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.5 y análisis de densidad aparente y dureza, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.3.2.

2.3.2 DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA DEL CARBÓN ACTIVADO, POR MEDIO DEL ÍNDICE DE YODO

Para la determinación del índice de yodo, se utilizó la norma NTE INEN 1 988:94 (1995c). Los reactivos se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Reactivos que se usaron para la determinación del índice de yodo en carbón activado según la norma NTE INEN 1 988:94 (1995c)

Reactivo	Fórmula Química	Concentración
Ácido Clorhídrico	HCl	5 % en peso
Solución de yodo	I ₂	0,1 N
Solución de tiosulfato de sodio	Na ₂ S ₂ O ₃	0,1 N
Solución de almidón*	----	1 g/L

* Se usó como indicador

Las muestras obtenidas se pulverizaron para que alcancen un tamaño de partícula menor a 45 µm (malla 325), se pesaron 0,25 g de cada muestra y se añadieron a un Erlenmeyer. Se adicionaron 2,5 mL de HCl al 5 % en peso y se agitó constantemente, luego se sometió a ebullición, se enfrió y se adicionó 25 mL de solución de yodo [0,1 N]. Se agitó constantemente durante 30 s y se filtró en un papel Whatman grado 42 cuantitativo. Los primeros 6 mL se desecharon y el resto se recogió en un Erlenmeyer. Se tomó una alícuota de 12,5 mL y se titularon con una solución [0,1 N] de Na₂S₂O₃. Se usó una solución de almidón de 1 g/L como indicador.

2.3.3 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado producido a 850 y 950 °C durante 150 min fue sometido a varias pruebas de caracterización, con el fin de determinar sus propiedades adsorptivas y características químicas. Además se realizaron fotografías de su porosidad mediante microscopía electrónica de barrido con un equipo Tescan-Vega.

2.3.3.1 Índice de Azul de metileno

Para la determinación del índice de azul de metileno se utilizó el procedimiento descrito por Flores, (2010, p. 60). Se preparó una solución de ácido acético al 5 % (v/v) en agua.

Se preparó una solución “madre” de 1,20 g/L de azul de metileno en ácido acético al 5 %. Para esto, se pesó 1,20 g de azul de metileno grado analítico y se aforó a 1 L con ácido acético al 5 % (v/v).

Cada muestra fue triturada hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a 45 μm , de los que se tomaron 0,1 g y se agregaron 25 mL de la solución madre. Se agitó durante 30 min a aproximadamente 1 000 RPM. Se filtró en un papel Whatman grado 42 cuantitativo, se descartó los primeros 5 mL del filtrado.

Se tomó 1 mL del filtrado y se diluyó hasta 100 mL con una solución de ácido acético 0,25 % (v/v) en agua. Se midió la absorbancia de la muestra en un colorímetro (Corning Colorimeter 252) a una longitud de onda de 600 nm. Como blanco se usó ácido acético al 5 % (v/v) en agua.

Se realizó una curva de calibración. Para esto se disolvió la solución “madre” con ácido acético 0,25 % (v/v) según la Tabla 2.4. A cada solución se midió la absorbancia a 600 nm. Como blanco se usó ácido acético al 5 % (v/v) en agua.

Tabla 2.4 Datos para la elaboración de la curva de calibración de azul de metileno

Dilución	Valores de equivalentes de azul de metileno (g de azul de metileno/g de carbón activado)
1:600	25 g/100 g
1:300	20 g/100 g
1:150	10 g/100 g
1:120	5 g/100 g

Flores, (2010, p. 60)

2.3.3.2 Índice de decoloración de azúcar

Para la determinación del índice de decoloración de azúcar se utilizó el procedimiento descrito por Flores, (2010, p. 60). Se preparó una solución de sacarosa 60 °Brix para esto se mezclaron 60 g de azúcar morena en 40 g de agua destilada y se agitó hasta una completa disolución.

Cada muestra fue triturada hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a 45 µm de los que se tomaron 0,6 g y se agregaron 100 mL de la solución de sacarosa. Se agitó durante 45 min a aproximadamente 1 000 RPM y a una temperatura constante de 80 °C. Se filtró la solución al vacío con la ayuda de un kitasato, embudo buchner y bomba de vacío, con papel Whatman grado 42 cuantitativo.

Se midió la absorbancia del filtrado en un colorímetro (Corning Colorimeter 252) a 2 longitudes de onda: 430 nm y 710 nm, como blanco se usó agua destilada. Se calculó las unidades básicas de referencia (UBR) de acuerdo a la Ecuación 2.6

$$UBR = 1000 \times A_{430nm} - 2 \times A_{710nm} \quad [2.6]$$

El valor de UBR para la solución de sacarosa 60 °Brix debe oscilar entre 195 a 205 UBR. Además debe presentar un color característico.

2.3.3.3 Titulación Boehm

Tradicionalmente la titulación Boehm ha sido usada para la identificación química de los grupos funcionales oxigenados presentes en el carbón activado de acuerdo a su acidez. El hidróxido de sodio (NaOH) es una base fuerte que generalmente neutraliza ácidos fuertes (incluidos fenoles, grupos lactónicos y ácidos carboxílicos), el carbonato de sodio (Na₂CO₃) neutraliza grupos lactónicos y ácidos carboxílicos y el bicarbonato de sodio (NaHCO₃) neutraliza los ácidos carboxílicos.

Para la determinación de la titulación Boehm se utilizó el procedimiento descrito por: Goertzen, Thériault, Oickle, Tarasuk y Andreas, (2010, p. 1 253). Los reactivos necesarios se muestran en la Tabla 2.5. Cada muestra fue triturada hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a 45 µm, de los que se tomaron 0,6 g y se agregaron en 3 matraces, 0,2 g en cada uno.

Tabla 2.5 Reactivos que se usaron para la titulación Boehm de carbón activado según el procedimiento descrito por Goertzen, et al., (2010, p. 1 253)

Reactivo	Fórmula Química	Normalidad [N]
Hidróxido de sodio	NaOH	0,1
Carbonato de Sodio	Na ₂ CO ₃	0,1
Bicarbonato de sodio	NaHCO ₃	0,1
Ácido Clorhídrico	HCl	0,1
Fenolftaleína*	C ₂₀ H ₁₄ O ₄	---

*Se usó como indicador

A cada matraz se agregaron 50 mL de soluciones de: NaOH, Na₂CO₃ y NaHCO₃ [0,1 N], respectivamente. Se agitaron durante 48 h a aproximadamente 1 500 RPM. Luego de este tiempo se dejó reposar durante 24 h y se tomaron alícuotas de 8 mL. Se agregaron 10 mL de HCl [0,1 N] y se usó fenolftaleína como indicador. Posteriormente se tituló la solución con NaOH [0,1 N]. Para medir los blancos, a 8 mL de las soluciones de NaOH, Na₂CO₃ y NaHCO₃ [0,1 N] se

agregaron 10 mL de HCl [0,1 N] y se tituló con NaOH [0,1 N]. Como indicador se usó fenolftaleína.

2.3.3.4 Caracterización de la morfología del carbón activado

El carbón activado de coco a 950 y 850 °C fue analizado mediante microscopía electrónica de barrido con el equipo Tescan-Vega. Se tomaron algunas fotografías la morfología del carbón que se usó como precursor y del carbón activado, por medio del procedimiento descrito en la sección 2.1.5.

Además se tomaron fotografías del carbón precursor para establecer algunas diferencias estructurales entre este y los productos.

2.4 DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES PARA LA PRODUCCIÓN DE 10 T/MES DE CARBÓN DE CUESCO DE COCO

Para la definición del diagrama de flujo del proceso de producción de carbón activado mediante activación física a partir de cuesco de coco que se presenta en este subcapítulo se consideró como materia prima las conchas de coco.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas a nivel piloto y con ayuda del horno Nichols Herreshoff mono solera se determinó la cinética de carbonización y activación, para determinar el tiempo de residencia en el horno de la materia prima y el carbón producido.

Se tomó como referencia una producción mensual de 10 t/mes de carbón activado. Para este análisis se consideró que el Ecuador produce 3 193 t de coco y que de esta cantidad, el 75 % se produce en las provincias de: Esmeraldas, Manabí,

Santo Domingo de los Tsáchilas y Guayas según el INEC (2011) además que de la materia prima, un 80 % es cuesco (Rosa, et al, p. 1). Mediante los balances de masa y energía realizados para el proceso se determinó el tamaño de la planta y se diseñaron los equipos principales.

Se diseñó un horno rotatorio que carbonice y active, para esto se utilizó la ecuación propuesta por Sullivan, Charles y Oliver (1927, p. 30) aplicable a hornos de producción de cemento, la misma que está señalada en la Ecuación 2.7

$$t = 1,77 \frac{L \times F \sqrt{\Theta}}{D_i \times \beta \times \omega} \quad [2.7]$$

Donde:

t: tiempo de residencia

L: longitud del horno

Θ : ángulo de reposo del material

D_i : diámetro interno del horno

β : pendiente del horno

ω : velocidad de rotación del horno

F: factor paletas (1 = si no tiene paletas; 2 = si posee paletas)

Además se determinó el movimiento de los sólidos en el interior, este punto es importante para establecer el tiempo de residencia en el horno y las transferencias de calor y masa en el interior del horno. Para esto se estableció el régimen de movimiento según el número adimensional de Froude, el mismo que se calcula a partir de la Ecuación 2.8.

Para el cálculo del combustible necesario para la carbonización del cuesco de coco se determinó que a pesar de que existe una zona de carbonización y activación, la mayor energía se necesitará para activar el carbón ya producido. A partir de las Ecuaciones 1.26 a 1.29 se estableció el calor requerido para transformar el carbón de cuesco de coco en carbón activado.

$$Fr = \frac{\omega^2 R_i}{g} \quad [2.8]$$

Donde:

Fr: número de Froude

ω : velocidad de rotación del horno

R_i : radio interno del horno

g: gravedad

Se dimensionó un equipo de reducción de tamaño y clasificación de la materia prima que se ingresará al horno, además de otro para que el carbón activado producido sea 6×12, es decir, que su tamaño de partícula se encuentre entre las # N° 6 y 12 (1 650 μm a 1 410 μm). Además es necesario diseñar una cámara de enfriamiento para que el carbón activado producido pueda ensacarse. Para esto se asumió una chaqueta por la que circula agua que enfría al carbón activado producido.

Se diseñó tanques de almacenamiento de los combustibles, los mismos que se deben encontrar alejados de las fuentes de ignición y también se deben construir con un factor de seguridad. El abastecimiento será semanal debido a la ubicación de la planta.

Se diseñó un caldero para la producción del vapor requerido para la activación, para esto a partir del modelo propuesto en la sección 1.3.3.2 aplicado al horno Nichols Herreshoff mono solera, se estableció la concentración de vapor de agua requerida en los gases de combustión.

Es necesario finalmente diseñar una cámara de postcombustión que queme los gases producto de la combustión incompleta en ausencia de oxígeno del horno rotatorio y posteriormente un lavador de gases de combustión que disminuyan el material particulado y reduzcan la temperatura de salida de los gases.

2.5 EVALUACIÓN DE LA PRE-FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA PLANTA PARA UNA PRODUCCIÓN DE 10 T/MES

Con base en la información técnica recopilada y el diseño de los equipos principales se elaboró una estimación de la inversión y de los costos de operación de la planta. Para el análisis económico de pre-factibilidad se consideraron el Valor Actual Neto (VAN), el cual está expresado en la Ecuación 2.9 y la Tasa Interna de Retorno (TIR), señalada en la Ecuación 2.10.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad [2.9]$$

Donde:

VAN: Valor Actual Neto

I_0 : Valor de inversión Inicial

BN_t : Beneficio neto del periodo t

i: Tasa de retorno del periodo

n: Número de periodos considerados

Cuando el Valor actual neto se iguala a 0, i se denomina tasa interna de retorno. La TIR nos indica la rentabilidad del proyecto.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 = 0 \quad [2.10]$$

El análisis económico se elaboró con un horizonte de 10 años de operación de la planta y una tasa de amortización del 10 %.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la investigación, el diagrama de flujo de proceso para la implementación de la planta de producción de carbón activado de coco mediante activación física con vapor de agua y el análisis de pre-factibilidad económica.

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL CUESCO DE COCO, PROVENIENTE DE SAN LORENZO, ESMERALDAS

Previamente a la materia prima se realizó un muestreo y una posterior trituración, donde se determinó el tamaño de partícula del material molido. La caracterización consta de 3 etapas. La primera es la caracterización química, donde se determinó el contenido de los principales biopolímeros presentes y la humedad, por medio de análisis que siguen la normativa Tappi; además contenido de: volátiles, cenizas y carbón fijo. La segunda donde se determinó propiedades físicas como: densidad real, densidad aparente, dureza y análisis termogravimétrico. Para finalmente tomar algunas fotografías de la morfología.

3.1.1 MUESTREO DE LA MATERIA PRIMA

Se tomó una muestra aleatoria de 30 conchas de una población de 500. Los datos promedios obtenidos se muestran en la Tabla 3.1. Todos los datos medidos se encuentran en el Anexo I.

Tabla 3.1 Datos promedios del muestreo realizado a las conchas de coco

	Peso (g)	Diámetro mayor (cm)	Diámetro menor (cm)	Espesor (cm)
Promedio	100,41	11,54	5,31	0,16

Como se puede observar en la Tabla 3.1, el peso promedio de las conchas de coco es considerable, además de su diámetro mayor; sin embargo, el espesor es pequeño. La desviación estándar que muestran los datos es del 25,78 % para el peso del cuesco de coco, lo que indica que la materia prima no es uniforme, en parte se debe a la fracturación previa para obtener en este caso particular el agua de coco que servirá para la producción de bebidas.

3.1.2 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA OBTENIDO LUEGO DE LA MOLIENDA CON MOLINO DE MARTILLOS

La reducción de tamaño del cuesco de coco permite una mejor carbonización y gasificación, además de una reducción del gradiente de temperatura en la partícula (Achaw y Afrane, 2008, p. 285; Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 164; Tsamba, et al., 2006, p. 524). Se escogió un tamaño de partícula de 5 cm, de tal manera que se pueda producir carbón activado granular.

Tabla 3.2 Tratamiento de datos para ensayo de granulometría de cuesco de coco después del proceso de reducción de tamaño con una trituradora de mandíbulas

Malla #	Abertura tamiz (μm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
3/8 in	9 500	5,2	1,74	1,74	98,26
3	6 730	24,2	8,08	9,82	90,18
4	4 760	34,9	11,65	21,47	78,53
6	3 360	64,5	21,54	43,01	56,99
8	2 380	92,7	30,95	73,96	26,04
10	1 650	60,1	20,07	94,02	5,98
14	1 400	16,1	5,38	99,40	0,60
-14	-1 400	1,8	0,60	100,00	0,00
Peso total retenido		299,5	100,0	d₈₀	5 000 μm

En la Tabla 3.2 se presenta los datos obtenidos del ensayo de granulometría realizado con la trituradora de mandíbulas (Braun Chipmunk). Antes de ingresar a

la reducción de tamaño mecánica, se realizó un machacado manual con un martillo. El procesamiento gráfico usado para la determinación del tamaño de partícula se muestra en el Anexo II.

Para la muestra de cuesco de coco molida con una trituradora de mandíbulas (Braun Chipmunk), el d_{80} o tamaño de grano fue de 5 000 μm , lo que permite afirmar que el 80 % de las partículas tienen un tamaño menor o igual al valor antes señalado.

3.1.3 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Para la caracterización química se realizaron pruebas en el laboratorio de Pulpa y Papel de la EPN para determinar, según la metodología descrita en la sección 2.1.1: humedad, contenido de celulosa, lignina y material soluble en alcohol benceno, según la normativa Tappi aplicable a maderas. Además se sometió a un análisis para determinar la cantidad de carbón fijo de la materia prima, dato importante para empezar a determinar la factibilidad del proceso.

3.1.3.1 Determinación de humedad, contenido de ceras, grasas y aceites, celulosa y lignina del cuesco de coco

Los datos obtenidos de los análisis realizados en el laboratorio de Pulpa y Papel de la EPN se muestran en la Tabla 3.3.

La cantidad de lignina y celulosa es considerable en la materia prima, esto es un resultado muy positivo, porque estos compuestos son la parte constitutiva del carbón. La cantidad de material soluble en alcohol-benceno es mínima (4,91 %); sin embargo, se debe tomar en cuenta, ya que podría ser importante a la hora de la carbonización, porque el aceite que tiene el cuesco podría servir como combustible. Además la lignina, como se mencionó en la sección 1.1.5.3, es la biomolécula que produce la rigidez de la planta, si tenemos una composición

considerable de este polímero en nuestra materia prima, podría ser beneficioso para producir un carbón activado de gran dureza.

Tabla 3.3 Composición química de la materia prima

Sustancia	Composición (%)
Humedad	9,88
Ceras, grasas y aceites solubles en alcohol-benceno	4,91
Celulosa	30,96
Lignina	35,77
Hemicelulosa*	18,48

* La hemicelulosa se calculó por diferencia

Si comparamos el contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa de Tabla 3.3 con las composiciones consultadas en la Tabla 1.2, éstas varían entre ellas y a la vez también son diferentes a los datos experimentales obtenidos con nuestra materia prima. La causa de esta diferencia tan notoria de contenido de estos biopolímeros, primero se debe a que la materia prima fue extraída de diferentes palmeras de diferentes lugares del mundo. Además podríamos concluir lo mismo que Achaw y Afrane (2008, p. 281): “el proceso de producción del carbón activado, inicia desde el mismo momento en el que la materia prima es cosechada”.

3.1.3.2 Determinación del contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.4. La muestra tiene gran cantidad de volátiles. Además la cantidad de cenizas es mínima, lo que representa una buena pureza del carbón (Yusufu, et al. 2012, 124). El procesamiento de datos se encuentra en el Anexo III.

Si se compara la Tabla 3.4 con la Tabla 1.5, las composiciones varían mucho entre todos los datos obtenidos de varias fuentes bibliográficas, aunque el contenido de cenizas obtenido por Yusufu, et al., (2012, p. 128) es el totalmente diferente a los demás, casi todos están entre 0,70 % y 1,3 %; mientras que

Yusufu, et al. (2012) obtuvo en porcentaje de 3,50 (p.128). Sin embargo, los datos de Li, et al., (2008, p. 192) y Tsamba, et al., (2006, p.525) son muy parecidos a los obtenidos con la muestra de la Tabla 3.4, (0,74, 0,70 y 0,78 respectivamente). La causa de esta diferencia tan notoria de composición química, se debe a que la materia prima fue extraída de diferentes plantas de diferentes lugares del mundo.

Tabla 3.4 Contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo de la materia prima

	Composición (%)
Volátiles	78,51
Cenizas	0,78
Carbón fijo*	20,71

* Se calcula por diferencia

3.1.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Para la caracterización física se determinó: densidad real, densidad aparente y dureza, los datos obtenidos se encuentran en la Tabla 3.5. Las fichas técnicas de los datos obtenidos se encuentran en el Anexo IV.

La densidad aparente fue calculada para un tamaño de partícula entre # Tyler N° 6 y # 10 (3 360 μm y 1 650 μm). Como se observa en la Tabla 3.5 la densidad real del cuesco de coco es considerable, lo que es beneficioso porque en poco volumen se obtiene grandes cantidades de cuesco de coco. La dureza de la muestra también es alta, aunque no determina que el carbón activado producido a partir de éste tenga la misma propiedad.

Tabla 3.5 Propiedades Físicas del cuesco de coco

Propiedad	Resultado
Densidad real (g/cm^3)	2,0034
Densidad aparente (g/cm^3)	0,5825
Dureza (%)	97,96

3.1.5 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA MATERIA PRIMA

La muestra fue sometida a un análisis termogravimétrico. La curva TGA y su primera derivada con respecto al tiempo se muestran en la Figura 3.1.

La Figura 3.1 muestra que a mayor tiempo, mayor pérdida de peso, lo que se traduce en la pirolisis del cuesco, esto produce gases que son menos densos que el sólido. Además se observa que la descomposición entre 400 a 600 °C es mucho mayor que a más de 600 °C.

Como se puede observar en la Figura 3.1 existen 3 picos: el primero se da a una temperatura aproximada de 106 °C la cual corresponde a la eliminación de humedad de la muestra, la misma que empieza aproximadamente a los 40 °C.

El segundo pico se da a una temperatura aproximada de 306 °C, este corresponde a la eliminación de hemicelulosa de la muestra. Finalmente el tercero que se da a 368 °C es la eliminación de la celulosa y lignina. Esto se demuestra en la Figura 1.6, la misma que muestra la curva TGA de los componentes principales del cuesco de coco (Cagnon, et al., 2009, p. 294):

Si se compara la Figura 3.1 con las Figuras 1.6 a 1.8 se determina que las curvas TGA y DTGA son parecidas, esto se debe a los 3 principales compuestos presentes en la materia prima (celulosa, lignina y hemicelulosa). Sin embargo, hay diferencias significativas entre los picos de las curvas, debido a la variación de composición entre cada estudio como se aprecia en la Tabla 1.2 para el trabajo de la Figura 1.6 (Cagnon, et al., 2009, p. 294) y en la Tabla 3.3 para este trabajo. La pérdida de peso del cuesco de coco es mayor en el intervalo de 400 a 600 °C que a más de 600 °C, por lo que se podría presumir que en el rango de esta temperatura se tiene la mejor opción para la producción del carbón.

Si comparamos la Figura 3.1 con la Figura 1.6 se puede observar que a pesar de que los picos difieren en temperatura, son muy similares. Sin embargo, en el pico de la descomposición de la hemicelulosa, hay una variación ya considerable, esto

se debe a que la muestra de coco obtenida, tiene mayor cantidad de hemicelulosa que la muestra presentada en el trabajo de Cagnot, et al., (2009, p. 294).

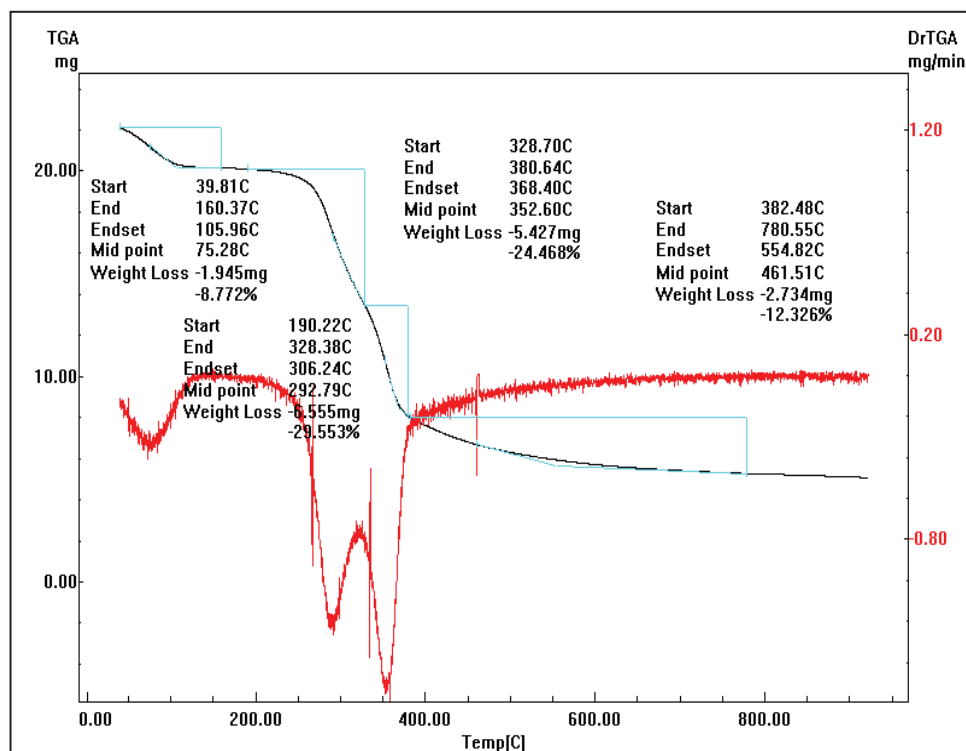


Figura 3.1 Curva TGA y DTGA de la muestra de cuesco de coco

La Figura 1.8 referente al cuesco de coco es similar a la Figura 3.1; sin embargo, los picos se dan a menor temperatura, además el pico de descomposición de celulosa y lignina es más acentuado. Hu, Srinivasan y Ni, (2001), señalan que el 60 % del peso se pierde entre 200 a 400 °C (p. 883).

Además como se observa en la Figura 1.6, la lignina es la que aporta mayor cantidad de carbón al cuesco, debido al alto punto de descomposición que posee y a la poca pérdida de peso. Esto es bastante conveniente, sobretodo porque la muestra como indica la Tabla 3.3 posee una cantidad significativa de lignina (35,77 %). Finalmente en la Figura 1.8 se demuestra que el endospermo de los frutos son grandes materiales para la producción de carbón, ya que tienen un porcentaje de pérdida menor que otros materiales lignocelulósicos.

3.1.6 CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA PRIMA

Se tomaron 4 imágenes con el microscopio electrónico de barrido del cuesco de coco a diferentes grados de aumento. Las mismas que se muestran en la Figura 3.2.

Las Figuras 3.2a y 3.2b muestran la estructura desordenada del coco, se puede apreciar las paredes celulares. Se llega a la conclusión que son las paredes celulares por la forma de celdas, similares a la Figura 1.4 (Abdul-Khalil, et al., 2006, p. 225).

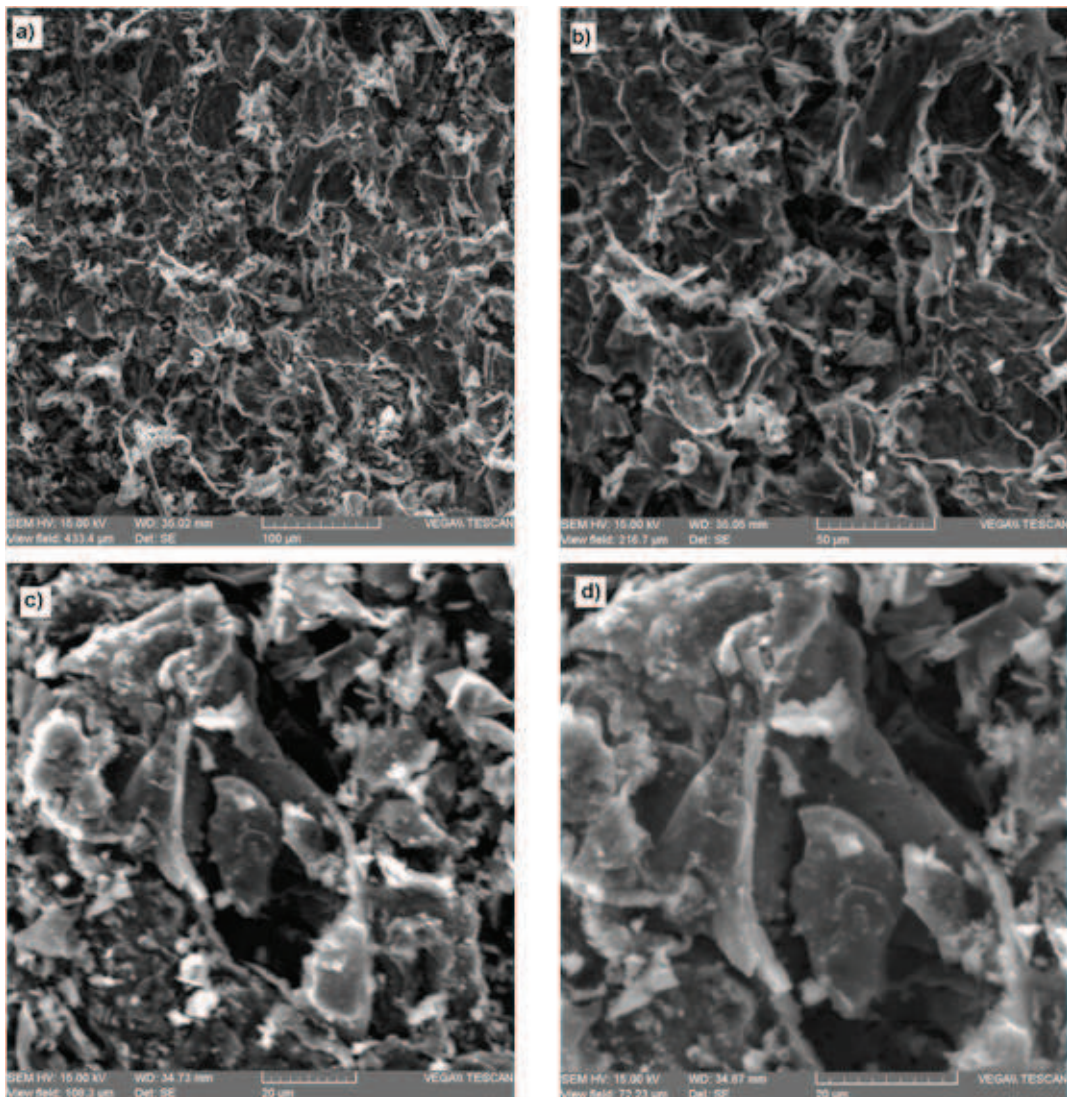


Figura 3.2 Fotografías MEB del cuesco de coco seco a diferentes grados de aumento: a) 500, b) 1 000, c) 2 000 y d) 3 000

Las Figuras 3.2c y 3.2d ya nos muestran la presencia de poros que son pequeñas aberturas en el interior de la matriz. Además se observan grietas en la muestra, lo que representan poros de mayor tamaño.

Esto acrecienta la idea del cuesco de coco como un material apto para la producción de carbón activado, debido a: un contenido considerable de lignina y celulosa, una gran dureza y poros inherentes, los mismos que con un tratamiento adecuado pueden agrandarse, produciendo carbón activado de gran calidad y alta adsorción.

3.2 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO SOBRE LA CARBONIZACIÓN DEL CUESCO DE COCO EN EL HORNO PILOTO NICHOLS HERRESHOFF MONO SOLERA

Para la evaluación de la influencia de la temperatura y el tiempo sobre la carbonización del cuesco de coco seco, primero se realizaron pruebas a nivel laboratorio para luego escalar en el horno piloto Herreshoff mono solera a atmósfera controlada.

3.2.1 PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO

Para las pruebas de laboratorio se establecieron temperaturas fijas a partir de los datos obtenidos en el análisis termogravimétrico que señalaban una temperatura de descomposición de la lignina en 368 °C. Sin embargo, se iniciaron las pruebas a 400 °C porque a 368 °C a pesar de que la Figura 3.1 señale un pico, significa el inicio de la descomposición térmica de la materia prima, por lo que se eligió una temperatura un poco mayor.

3.2.1.1 Análisis de la densidad aparente y densidad real del carbón de cuesco de coco producido a nivel de laboratorio

Para la densidad aparente se tomó un tamaño nominal de partícula entre 3 360 μm y 1 650 μm que corresponden a las mallas 6 y 10 respectivamente, las mismas que se utilizan para determinar la dureza. Se tomaron estos valores, ya que el producto se encuentra a estos tamaños de partícula. La Figura 3.3 muestra el gráfico de la densidad aparente a las temperaturas de trabajo en función del tiempo y la Figura 3.4 muestra el gráfico de la densidad real.

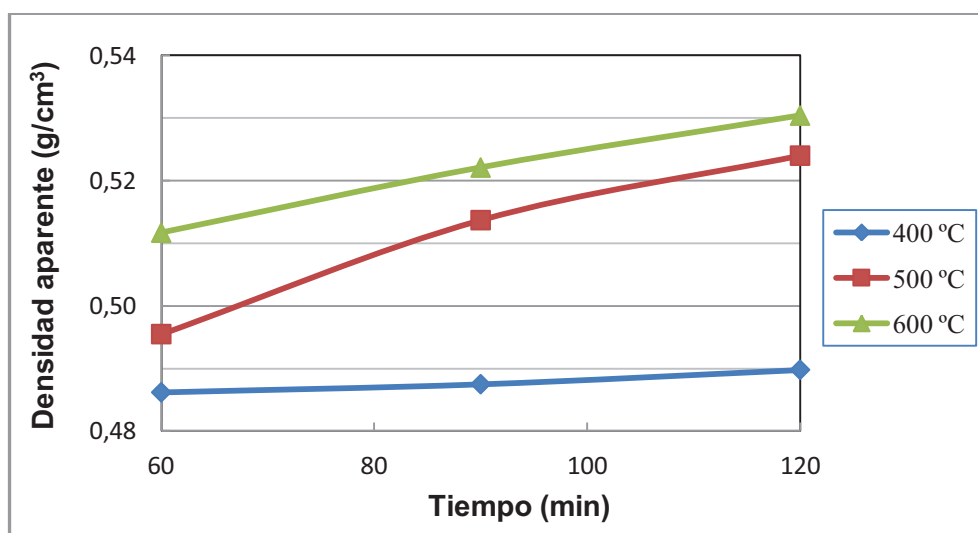


Figura 3.3 Densidad aparente del cuesco de coco carbonizado en función del tiempo a diferentes temperaturas. Pruebas de laboratorio

Como se puede observar en la Figura 3.3, la densidad aparente aumenta con el tiempo, esto se debe a la formación de poros que hacen que se compacte el carbón producido. Por lo que para un volumen constante se tiene mayor peso.

A mayores temperaturas se produce un carbón con mayor densidad aparente, debido a que como son reacciones endotérmicas según la sección 1.2.2, el aumento de temperatura, favorece la reacción. El carbón a 600 °C y 2 h presenta la mayor densidad aparente.

Como se aprecia en la Figura 3.4, la densidad real aumenta con el tiempo, de igual manera como sucede con la densidad aparente. Sin embargo, disminuye con la temperatura. Esto se debe a que a mayores temperaturas, ya existe la presencia considerable de poros, por la naturaleza de las reacciones endotérmicas. El carbón a 400 °C y 2 h presenta la mayor densidad real.

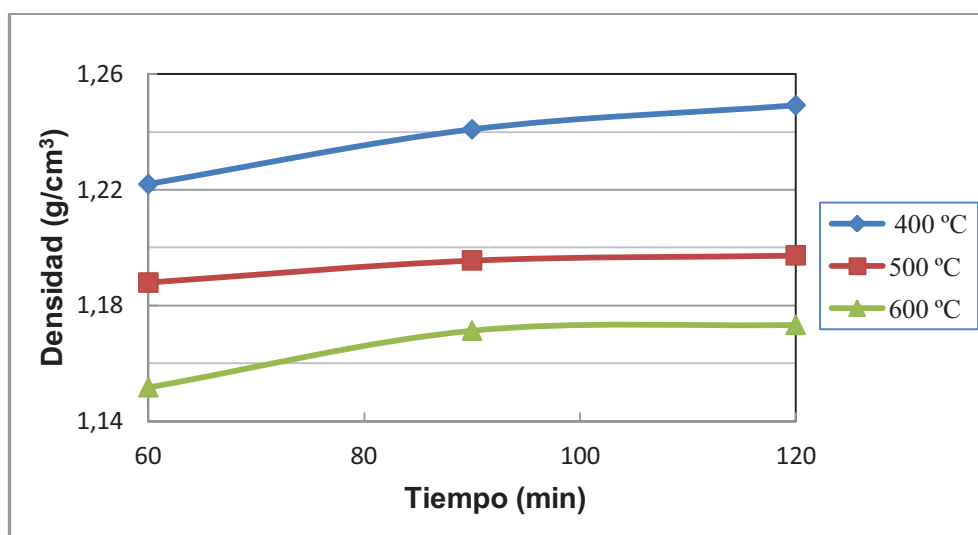


Figura 3.4 Densidad real del cuesco de coco carbonizado en función del tiempo a diferentes temperaturas. Pruebas de laboratorio

3.2.1.2 Análisis de dureza del carbón de cuesco de coco producido a nivel de laboratorio

Para la determinación de la dureza se tomó un tamaño nominal de partícula entre 360 μm y 650 μm . La Figura 3.5 muestra el gráfico de la dureza a las temperaturas de trabajo.

Como se puede observar en la Figura 3.5, la mayor dureza de las muestras se da a una temperatura de 400 °C. Además se observa que a medida que se aumenta el tiempo de pirolisis, el carbón obtenido tiene menor dureza. En el caso tanto de 500 °C como de 600 °C, a pesar de que se redujo la dureza al aumentar la temperatura, los resultados son considerablemente muy similares. El carbón que obtuvo la mayor dureza fue el de 400 °C pirolizado durante 1 h, esto podría

deberse a que el material no pudo haber quedado pirolizado totalmente, por lo que puede todavía poseer características de la materia prima.

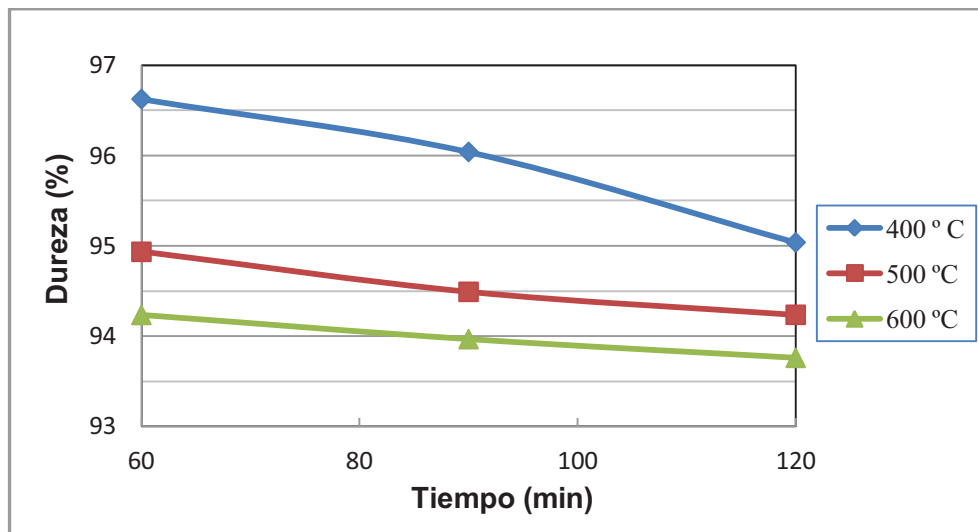


Figura 3.5 Porcentaje de dureza del cuesco de coco carbonizado en función del tiempo a diferentes temperaturas. Pruebas de laboratorio

Si comparamos los datos obtenidos de dureza del carbón de coco con los de Yusufu, et al., (2012, p. 128), los que se muestran en la Tabla 3.6, se comprueba que nuestra materia prima carbonizada presenta una dureza alta, primero comparándolo con otras materias primas, y posteriormente con la misma materia prima del estudio.

Sin embargo, Yusufu, et al., (2012, p. 128) determinó que la activación física aumenta la dureza del carbón activado, aspecto contrario a los datos obtenidos experimentalmente en este trabajo.

3.2.1.3 Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón de cuesco de coco producido a nivel de laboratorio

Los datos obtenidos para cada muestra carbonizada a diferentes temperaturas y tiempos se muestran en la Tabla 3.7. Las fichas técnicas de los datos obtenidos se encuentran en el Anexo III.

Como se observa en la Tabla 3.7, la cantidad de carbón fijo aumenta a mayor temperatura y tiempo de pirolisis. Esto se traduce porque en el proceso de carbonización, los volátiles se pirolizan a menor temperatura, haciendo que se acumule carbón fijo. La cantidad de ceniza a diferentes temperaturas es casi similar en los tiempos analizados. La cantidad de volátiles disminuye a una misma temperatura, cuando aumenta el tiempo.

Tabla 3.6 Porcentaje de dureza de varias materia primas según Yusufu, et al., (2012, p. 128), modificado

Material	Estado	Dureza (%)	Temperatura (°C)
Coco	Materia prima	90,5	----
	Carbón activado con vapor	96,5	700 a 950
Huesos de ganado	Materia prima	90,0	----
	Carbón activado con vapor	93,5	700 a 950
Madera	Materia prima	87,5	----
	Carbón activado con vapor	88,5	700 a 950

Tabla 3.7 Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos. Pruebas de laboratorio

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
400	60	28,76	14,11	57,13
	90	28,45	14,13	57,42
	120	27,45	14,13	58,42
500	60	19,98	11,86	68,16
	90	19,69	10,88	69,43
	120	18,96	10,87	70,17
600	60	14,90	6,81	78,29
	90	14,86	5,88	79,25
	120	14,40	5,00	80,59

A una temperatura de carbonización de 600 °C durante 2 h se obtiene la muestra con mayor cantidad de carbón fijo, mientras que la muestra pirolizada a 400 °C

durante 1 h tiene un porcentaje de carbón fijo no tan alto, aunque este porcentaje es más del doble que el porcentaje de carbón fijo de la de la materia prima, mostrada en la Tabla 3.4.

El objetivo de la pirolisis es concentrar o formar la mayor cantidad de carbón, esto se puede reconocer ya que a mayor temperatura, se tiene un mayor porcentaje de carbón fijo en la muestra. En el caso de la ceniza, a 400 °C se tiene un porcentaje de ceniza casi constante, con lo que se puede concluir que las cadenas a estas temperaturas no están todavía muy separadas entre sí. Pero a medida que se aumenta la temperatura se tiene menor porcentaje de ceniza al transcurrir el tiempo.

3.2.1.4 Relación entre el carbón fijo y la dureza del carbón de cuesco de coco producido a nivel de laboratorio

Para establecer una relación entre el contenido de carbón fijo en el cuesco de coco pirolizado y su dureza, es necesario construir una gráfica de estos para cada temperatura, los mismos que se muestran en las Figuras 3.6 a 3.8 para 400, 500 y 600 °C respectivamente.

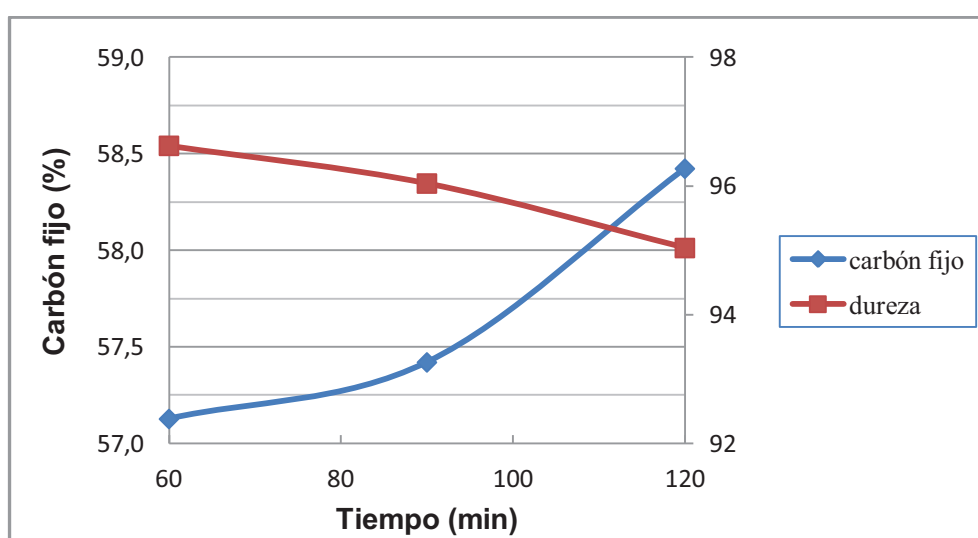


Figura 3.6 Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de coco en función del tiempo para 400 °C. Pruebas de laboratorio

Como se observa en la Figura 3.6, el carbón pirolizado a 400 °C durante 2 h posee el mayor porcentaje de carbón fijo, pero la menor dureza. Sin embargo, el contenido de carbón fijo aumenta. La variación de porcentaje de carbón fijo entre 1 y 1,5 h es mínima, comparada a la variación entre 1,5 y 2 h. Algo similar acontece en lo que respecta a la dureza.

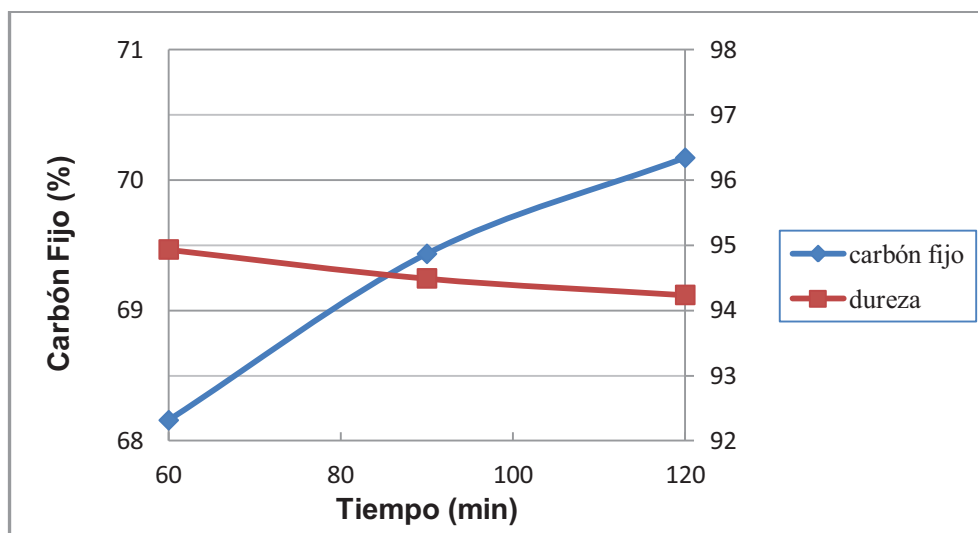


Figura 3.7 Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de coco en función del tiempo para 500 °C. Pruebas de laboratorio

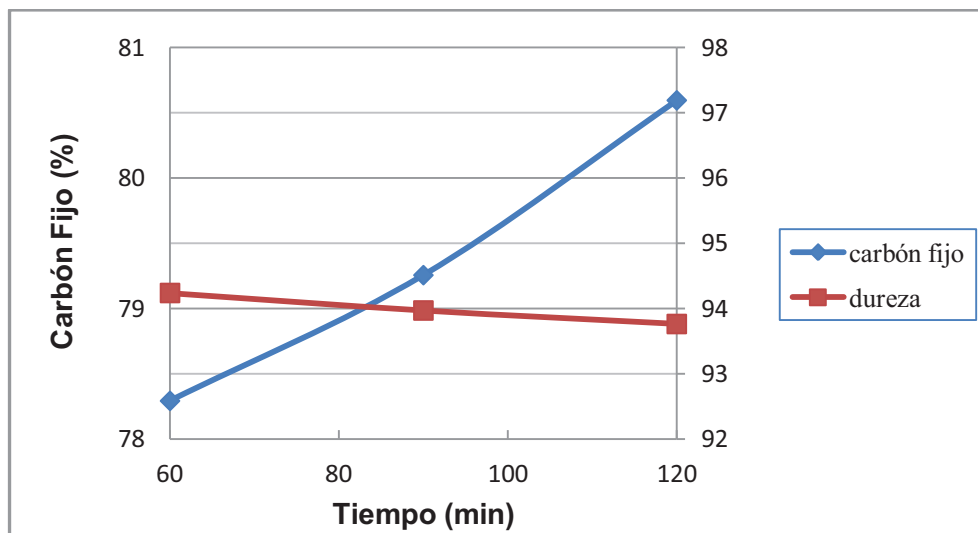


Figura 3.8 Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de coco en función del tiempo para 600 °C. Pruebas de laboratorio

Como se observa en las Figura 3.7 y 3.8, el carbón pirolizado durante 2 h posee el mayor porcentaje de carbón fijo, pero la menor dureza al igual que en la Figura

3.6. En la Figura 3.7, la variación de porcentaje de carbón fijo entre 1 y 1,5 h es mayor que entre 1,5 y 2 h, mientras que la variación de dureza, no es tan notoria entre los 2 intervalos de tiempo. En la Figura 3.8, la variación de porcentaje de carbón fijo entre 1 y 1,5 h es ligeramente mayor que entre 1,5 y 2 h, mientras que la variación de dureza, es mínima entre los 2 intervalos de tiempo.

3.2.1.5 Rendimiento de la carbonización del cuscó de coco a diferentes temperaturas y tiempos a nivel de laboratorio

Para la determinación del rendimiento de la carbonización, se tomaron los pesos inicial y final de la muestra a cada temperatura y tiempo, con estos se construyó la Tabla 3.8. Las fichas técnicas de los datos obtenidos se encuentran en el Anexo V.

Tabla 3.8 Datos obtenidos del rendimiento del cuscó de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos. Pruebas de laboratorio

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Rendimiento (%)
400	60	32,30
	90	32,12
	120	30,39
500	60	27,80
	90	27,12
	120	26,81
600	60	25,99
	90	25,59
	120	24,71

La Tabla 3.8 muestra un mayor rendimiento para una temperatura de 400 °C. Además se observa que a medida que se aumenta el tiempo de pirolisis, se disminuye el rendimiento. En el caso tanto de 500 °C como de 600 °C a pesar de que disminuyó el rendimiento a mayor temperatura, los resultados son considerablemente similares. La variación del rendimiento con respecto al tiempo es más considerable a 400 °C que a 500 y 600 °C.

El carbón que obtuvo el mayor rendimiento fue el de 400 °C pirolizado durante 1 h, esto se debe a que no hubo una volatilización de todos los componentes para formarlo, por lo que todavía podría poseer características de la materia prima, esto también se puede determinar al comparar las Figura 3.6 (400 °C), con las Figuras 3.7 (500 °C) y 3.8 (600 °C), debido a que la Figura 3.8 no posee todavía gran cantidad de carbón fijo y tiene una gran dureza. El proceso tiene un rendimiento moderadamente bajo (24,74%). Sin embargo, este rendimiento podría no ser malo, siempre y cuando el carbón activado producido sea de gran porosidad y con buena capacidad de adsorción.

3.2.2 PRUEBAS A ESCALA PILOTO EN EL HORNO PILOTO NICHOLS HERRESHOFF MONO SOLERA

Una vez que se realizaron pruebas a nivel de laboratorio, se escaló el proceso en un horno piloto Nichols Herreshoff mono solera en donde primero se realizaron pruebas para determinar la temperatura de carbonización (TC) y determinar el tiempo de pirolisis (tP).

3.2.2.1 Determinación de la temperatura de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera

Se tomaron muestras en un perfil de temperatura entre 400 y 600 °C, se realizaron análisis de contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo, los mismos que se resumen en la Tabla 3.9. Los datos a 0 °C son los obtenidos en los ensayos realizados para la materia prima, los mismos que se encuentran en la Tabla 3.4.

En la Tabla 3.9 se puede observar que la cantidad de carbón fijo aumenta a mayor temperatura. Esto se debe a que en el proceso de pirolisis, el objetivo es concentrar carbón, además de carbonizar los materiales volátiles para formar breas, lo que efectivamente sucede. Las fichas técnicas de los datos obtenidos se

encuentran en el Anexo III. Las temperaturas de operación del horno Nichols se encuentran en el Anexo VI.

Tabla 3.9 Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas. Pruebas piloto en el horno Nichols

Temperatura (°C)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
0	78,51	0,78	20,71
364	66,79	0,88	32,33
447	32,59	9,78	57,63
496	23,05	9,73	67,21
546	13,77	8,40	77,83
576	12,43	6,23	81,34

La cantidad de ceniza a diferentes temperaturas es casi similar, mientras que los volátiles disminuyen a una misma temperatura, cuando aumenta el tiempo. Sin embargo, para una temperatura de 364 °C, no se produce cenizas y tampoco carbón fijo, esto se debe a que a pesar de que en el análisis TGA, el que se encuentra en la Figura 3.1, esta temperatura tiende a ser un pico, en la práctica no se produce una óptima carbonización. Como el punto a 364 °C el material no está completamente carbonizado, este punto será eliminado de las siguientes Figuras realizadas a partir de la Tabla 3.9.

Para elegir la temperatura óptima de pirolisis es necesario considerar otros factores, como por ejemplo el tiempo que le tomó al horno llegar a esta temperatura. Ya que a pesar de que a 576 °C se da una mejor cantidad de carbón fijo, se necesita más energía, mientras que a 546 °C se da un porcentaje de carbón fijo considerable y no varía mucho con respecto a 576°C, pero el ahorro energético es considerable.

A partir de los datos obtenidos a escala piloto de la Tabla 3.9, con los datos de laboratorio se construyeron las Figuras 3.9 para carbón fijo, 3.10 para cenizas y 3.11 para volátiles.

Como se observa en la Figura 3.10 las pruebas en laboratorio hasta alcanzar los 500 °C presentan un porcentaje mayor de carbón fijo, mientras que a mayores temperaturas de ese punto, el horno Nichols tiene mayor cantidad de carbón fijo.

A 500 °C presenta un porcentaje de carbón fijo casi igual. Sin embargo las temperaturas mayores a 400 °C son las que se debería considerar, ya que a estas temperaturas se empieza a dar la pirolisis, por lo que se establece que el horno Nichols carboniza de mejor manera la muestra.

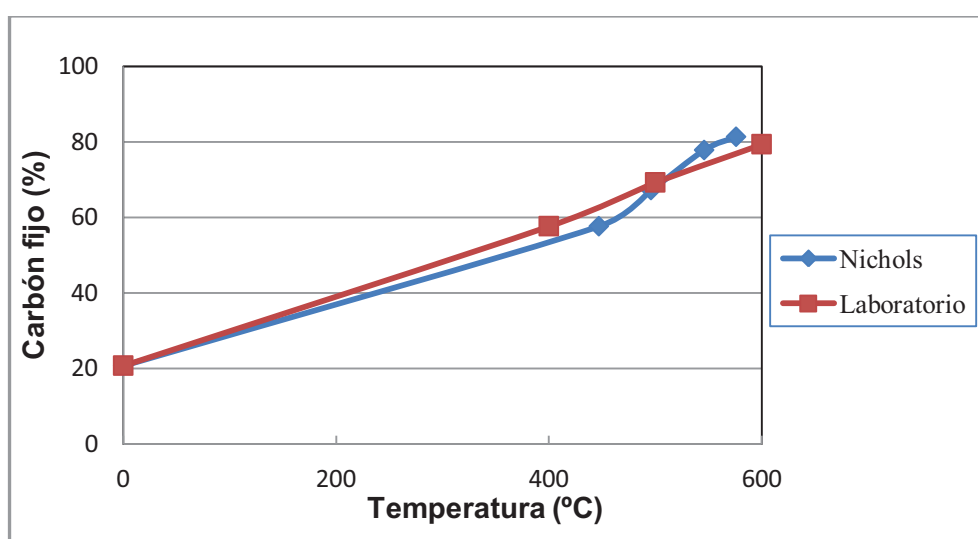


Figura 3.9 Porcentaje de carbón fijo en función de la temperatura, comparación entre pruebas a nivel laboratorio y pruebas piloto en el horno Nichols para el cuesco de coco carbonizado

La Figura 3.10 señala que las pruebas realizadas en el laboratorio presentan mayor porcentaje de cenizas que las realizadas en el horno Nichols, esto se debe a que las pruebas realizadas en el laboratorio no fueron a atmósfera controlada, se creó una atmósfera reductora, con la adición de aserrín y cerrando el crisol con papel aluminio, mientras que en el horno Nichols se controla la atmósfera por medio del flujo de gas y aire que ingresa. La cantidad de cenizas disminuye con el tiempo.

Según la Figura 3.11, las pruebas de laboratorio a menor temperatura hasta 500 °C presentan un porcentaje menor de volátiles. Mientras que a mayores temperaturas, el horno Nichols tiene menor porcentaje. A 500 °C presenta un

contenido similar. Sin embargo las temperaturas mayores a 400 °C son las que se debe considerar, ya que a estas temperaturas se empieza a dar la pirolisis, por lo que se establece que el horno Nichols tiene una mejor carbonización de la muestra, ya que el objetivo de la pirolisis es eliminar la mayor cantidad de volátiles y cenizas para formar carbón fijo, el mismo que posteriormente será activado.

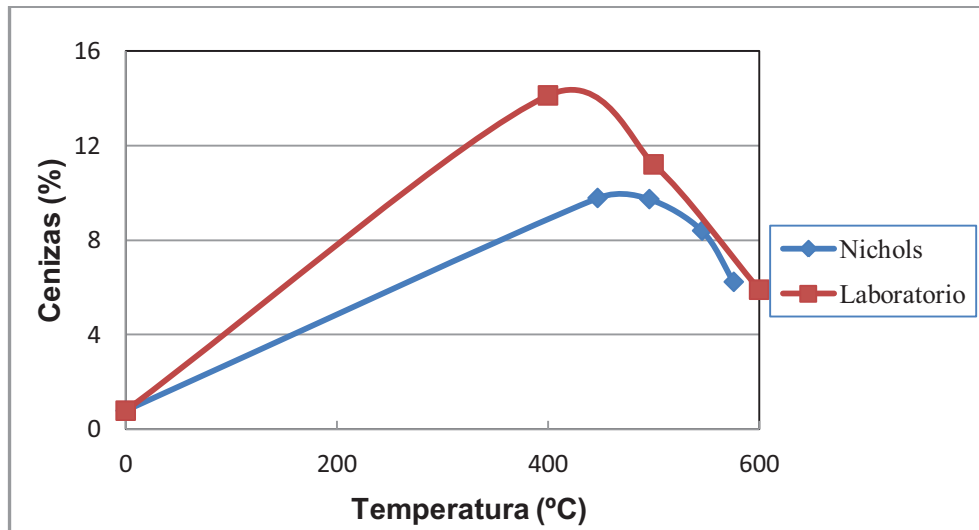


Figura 3.10 Porcentaje de cenizas en función de la temperatura, comparación entre pruebas de laboratorio y pruebas piloto en el horno Nichols para el cuesco de coco carbonizado

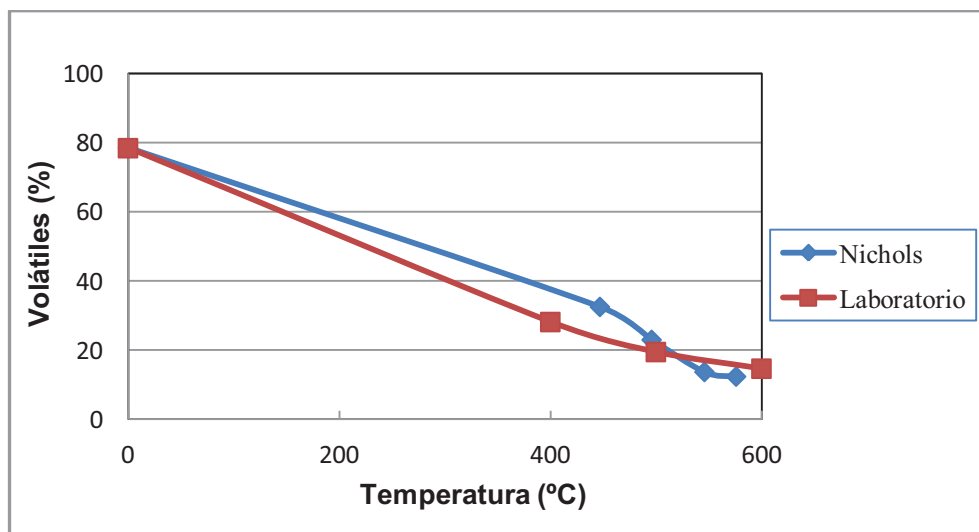


Figura 3.11 Porcentaje de volátiles en función de la temperatura, comparación entre pruebas de laboratorio y pruebas piloto en el horno Nichols para el cuesco de coco carbonizado

De la Tabla 3.9 se establece que entre 500 y 600 °C se obtiene las mejores características del carbón producido a partir de cuesco de coco, debido a su alto contenido de carbón fijo y bajo de cenizas.

3.2.2.2 Determinación del tiempo de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera

Todavía no se estableció la temperatura de carbonización (TC), por lo que se realizaron pruebas a 500 y 600 °C. Las Figuras 3.12 y 3.13 muestran los gráficos del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo para una temperatura constante de 500 y 600 °C respectivamente en función del tiempo. Los datos a tiempo 0 son los de la materia prima, los mismos que se encuentran en la Tabla 3.4.

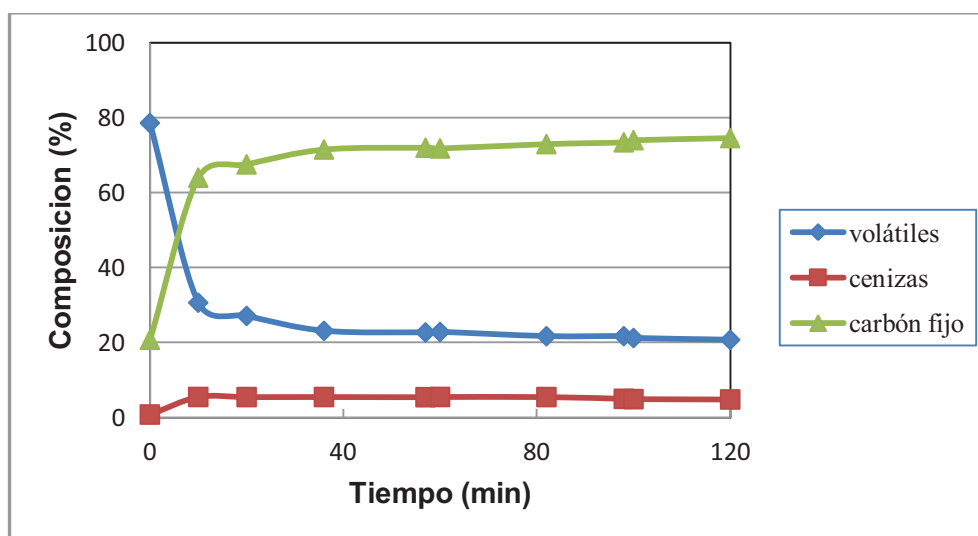


Figura 3.12 Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 500 °C en función del tiempo. Pruebas en el horno Nichols

La Figura 3.12 señala que el carbón pirolizado a 500 °C aumenta el porcentaje de carbón fijo, cuando aumenta el tiempo. La cantidad de cenizas permanece casi constante. El porcentaje de volátiles disminuye con el tiempo. Esto se traduce porque en el proceso de pirolisis, los volátiles se pirolizan, haciendo que se acumule carbón fijo. Además también los volátiles forman carbón fijo en el proceso de carbonización.

En la Figura 3.13 se puede observar que a una temperatura constante de pirolisis de 600 °C, las propiedades son casi constantes. A medida que se aumenta el tiempo de pirolisis, aumenta el porcentaje de carbón fijo y disminuye la cantidad de volátiles. La ceniza disminuye, pero el porcentaje es casi constante.

Si comparamos la Tabla 3.7 con las Figuras 3.12 y 3.13 se afirma que la cantidad de carbón fijo producido tanto a nivel de laboratorio como en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera es similar en función del tiempo tanto a 500 como a 600 °C

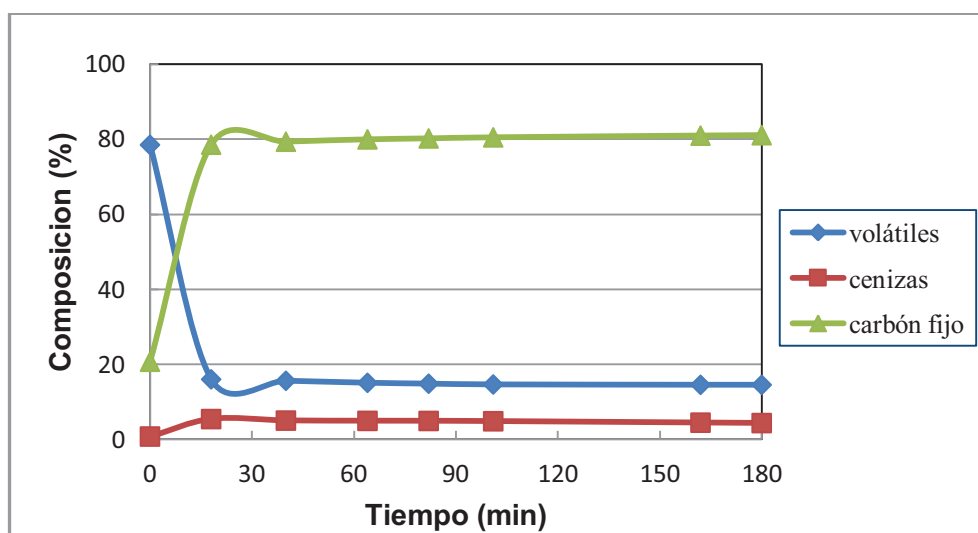


Figura 3.13 Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 600 °C en función del tiempo. Pruebas en el horno Nichols

De las Figuras 3.12 y 3.13 se elaboró la Figura 3.14 que muestra la evolución de la concentración de carbón fijo para las 2 temperaturas en función del tiempo. Como se observa en la Figura 3.14 el carbón pirolizado a 600 °C posee mayor porcentaje de carbón fijo que el producido a 500 °C. Además también se observa que la cantidad de carbón fijo a 600 °C es casi constante desde un tiempo aproximado de 40 min.

Con la dureza de las muestras obtenidas a las 2 temperaturas se realiza la Figura 3.15, la misma que muestra que el porcentaje del carbón producido a 500 °C es

mayor a la producida a 600 °C, con el transcurso del tiempo. El carbón producido a 600 °C tiene una mayor dureza hasta aproximadamente los 30 minutos. Se observa que la dureza disminuye con el tiempo, esto se debe a los poros que se forman en la pirolisis. La mayor dureza se presenta a la menor temperatura.

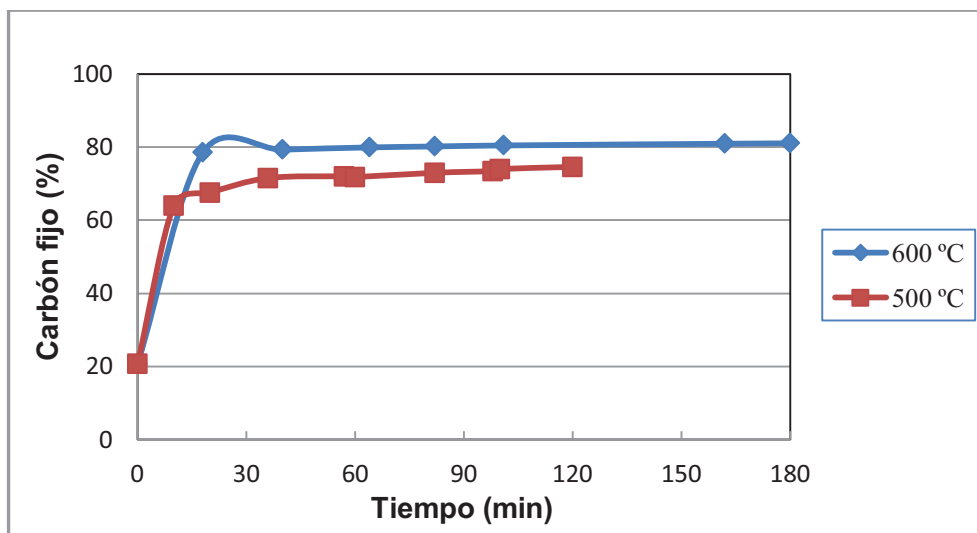


Figura 3.14 Contenido de carbón fijo en función del tiempo a las posibles temperaturas de carbonización del cuesco de coco. Pruebas en el horno Nichols

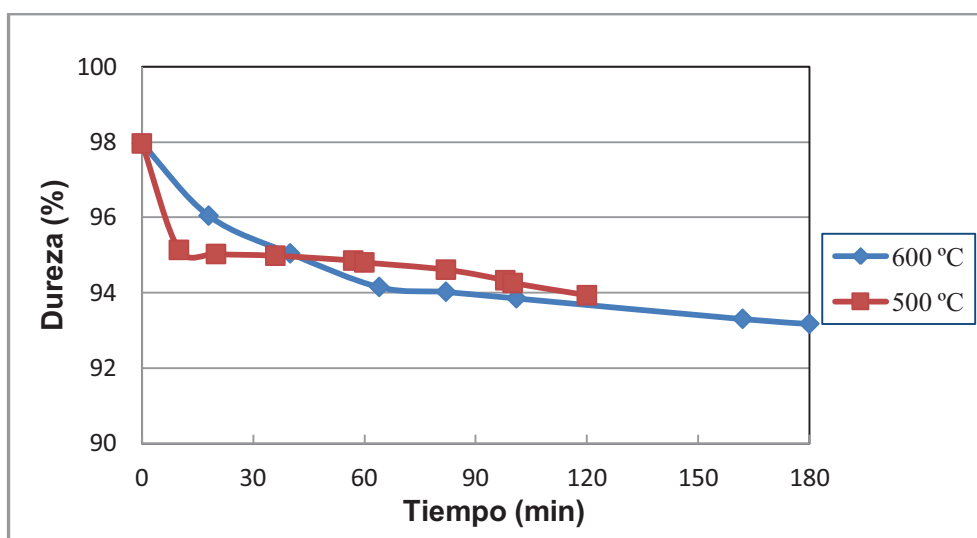


Figura 3.15 Porcentaje de dureza en función del tiempo a las posibles temperaturas de carbonización del cuesco de coco. Pruebas en el horno Nichols

Finalmente la Figura 3.16 muestra la densidad aparente en función del tiempo para las pruebas realizadas en el horno piloto. Esta arroja resultados similares a la Figura 3.3, en donde la densidad aparente aumenta con el tiempo debido a la

formación de poros. Sin embargo, la densidad no varía mucho entre las 2 temperaturas, por lo que se puede asumir que la porosidad tampoco es muy significativa entre las 2 temperaturas.

A partir de las Figuras 3.14 y 3.15 se determinó que la temperatura de carbonización (TC) es 500 °C, ya que aunque el aumento de porcentaje de carbón fijo es mayor a 600 °C y la porosidad es significativamente mayor, no justifica el mayor consumo de energía. Otro factor que también es representativo es la dureza, la misma que es mayor a 500 °C.

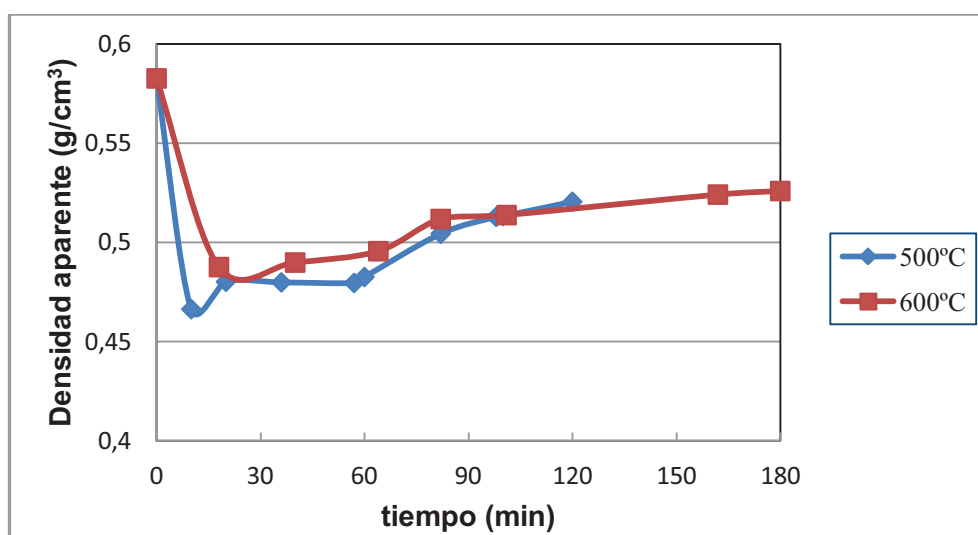


Figura 3.16 Densidad aparente en función del tiempo a las posibles temperaturas de carbonización del cuesco de coco. Pruebas en el horno Nichols

Para determinar el tiempo de pirolisis (tP) se graficó la dureza en función del porcentaje de carbón fijo tanto para 500 °C, la misma que se muestra en la Figura 3.17, como para 600 °C, representada en la Figura 3.18. Como se muestra en la Figura 3.17, la dureza disminuye cuando se aumenta el contenido de carbón fijo a 500 °C. La relación tiende a ser lineal, pero esto es solo una coincidencia, ya que si se observa la Figura 3.18, este tiende a ser una parábola.

Para determinar la tP se linealizaron las Figuras 3.17 y 3.18. Si consideramos que la temperatura de carbonización (TC) es 500 °C, el tiempo óptimo de residencia de la materia prima para producir el carbón a las mejores condiciones es de

aproximadamente 30 minutos, en este tiempo ya existe una carbonización de la materia prima, además de una porosidad inherente, no existe un gasto considerable de energía. El contenido de carbón fijo en este punto es de aproximadamente 67 %.

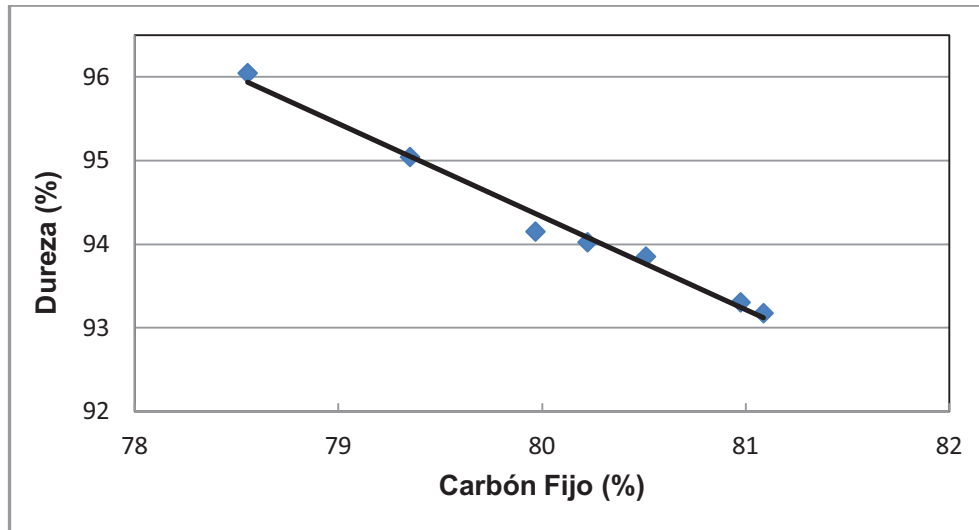


Figura 3.17 Porcentaje de dureza en función del carbón fijo, del cuesco de coco carbonizado a 500 °C obtenido en las pruebas piloto en el horno Nichols a diferentes tiempos

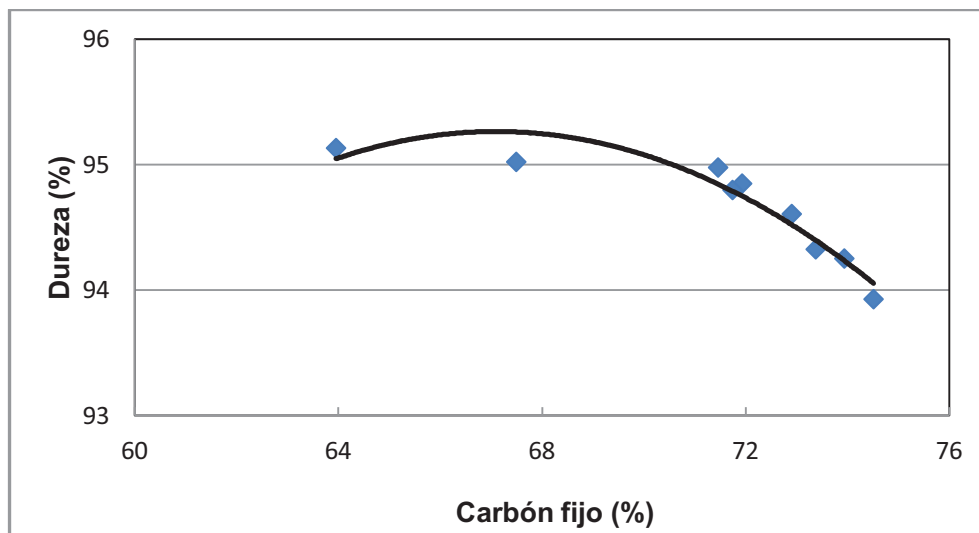


Figura 3.18 Porcentaje de dureza en función del carbón fijo, del cuesco de coco carbonizado a 600 °C obtenido en las pruebas piloto en el horno Nichols a diferentes tiempos

3.2.2.3 Determinación del rendimiento de carbonización del cuesco de coco en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera

Se colocaron 1 000 g de cuesco de coco en lecho fijo y se carbonizó a TC durante tP, se obtuvo un rendimiento de 28,25 %. Si se comparan estos datos con los obtenidos a nivel laboratorio, a pesar de que no se hayan realizado a esta temperatura, se considera que son similares.

3.3 EVALUACIÓN DEL TIEMPO PARA PRODUCIR UN CARBÓN ACTIVADO DE CUESCO DE COCO QUE TENGA EL MAYOR ÍNDICE DE YODO Y SUPERFICIE ESPECÍFICA, POR MEDIO DE ACTIVACIÓN FÍSICA CON VAPOR DE AGUA EN EL HORNO NICHOLS HERRESHOFF MONO SOLERA.

Después de carbonizar el cuesco de coco en el horno Nichols Herreshoff mono solera a 500 °C durante 30 min en lecho agitado hasta obtener aproximadamente 13 kg de carbón, se determinó el tiempo de activación (tA). Para esto, se realizaron pruebas a 850 y 950 °C con un flujo de vapor de agua constante de 40 kg/h (26,7 m³/h).

3.3.1 DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA DEL CARBÓN ACTIVADO, POR MEDIO DEL ÍNDICE DE YODO

Se realizaron pruebas de índice de yodo y dureza al carbón activado producido a diferentes tiempos. La Tabla 3.10 muestra los datos para 850 °C y la 3.11 para 950 °C. En los datos, al tiempo 0 se consideró las muestras de carbón antes de activar (pirolizado a TC durante tP). Las fichas técnicas de los datos obtenidos se encuentran en el Anexo IV para dureza y densidad aparente y Anexo VII para índice de yodo.

Tabla 3.10 Índice de yodo y dureza del carbón activado de cuesco de coco con vapor de agua en el Horno Nichols a 850 °C

Tiempo (min)	Índice de yodo	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
0	162	92,89	0,4798
30	772	89,88	0,4488
60	866	86,64	0,4512
90	1009	75,08	0,4535
120	1095	71,02	0,4562
150	1193	70,41	0,4583

Como se puede observar en las Tablas 3.10 y 3.11 el índice de yodo aumenta con el tiempo. A tiempo 0, el índice de yodo es muy bajo, esto se debe a que el carbón no está activado todavía. Después de 150 min el carbón activado posee un índice de yodo superior a 1 000, lo que le hace un carbón activado muy poroso. El carbón a 950 °C presenta una mayor porosidad.

Tabla 3.11 Índice de yodo y dureza del carbón activado de cuesco de coco con vapor de agua en el Horno Nichols a 950 °C

Tiempo (min)	Índice de yodo	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm ³)
0	162	92,89	0,4798
30	740	87,65	0,4145
60	886	85,32	0,4189
90	1045	67,75	0,4232
120	1297	54,69	0,4262
150	1371	36,94	0,4301

La dureza disminuye con respecto al tiempo, esto se debe a los poros que se forman, producto de la reacción del carbón con el vapor de agua. La mayor dureza se presenta en la menor temperatura. Hasta los 60 min se puede considerar un carbón granular ya que tiene una dureza superior al 90 % según las normas INEN 1 991:94 (1995a). El carbón activado luego de 150 min tiene una

dureza intermedia para el carbón activado producido a 850 °C. A 950 °C el carbón activado pierde totalmente la dureza, esto se debe a las altas temperaturas que prácticamente deshacen el carbón. Es un alto costo para la gran porosidad que obtienen. Además la temperatura favorece la reacción del vapor de agua con los sitios activos del carbón. La densidad aparente es considerablemente menor a 950 °C que a 850 °C, eso se debe a la formación de poros que disminuyen el peso de la muestra.

El tiempo para producir carbón activado es muy pequeño comparándolo con algunas otras materias primas que necesitan aproximadamente 4 h para activarse. Sin embargo, el producto tiene una dureza muy pobre, esto se debe a la porosidad producida por la reacción con vapor y las altas temperaturas, que por un lado aumenta el índice de yodo; pero por otro, disminuye considerablemente la dureza, lo que perjudica al producto, sobre todo en aplicaciones metalúrgicas.

Si se compara los datos bibliográficos de la Tabla 1.8 con los obtenidos en las Tablas 3.10 y 3.11; a pesar de que se sometió a mayor tiempo y temperatura de activación, el índice de yodo aumenta considerablemente. Uno de los grandes factores que aumentan el índice de yodo es el uso de vapor de agua como agente activante, ya que si comparamos los datos obtenidos por Achaw y Afrane (2012, p. 165) con los de la Tabla 3.10, a pesar de que el material fue carbonizado y activado a esa temperatura y tiempo, el índice de yodo es totalmente mayor en la Tabla 3.11 para esa temperatura. Otro factor que podría influir en la superficie específica del carbón activado producido es la previa carbonización, en los estudios investigados de fuentes bibliográficas no se especifica este pretratamiento, por lo que no se puede definir la influencia.

3.3.2 ANÁLISIS DE CONTENIDO DE VOLÁTILES, CENIZAS Y CARBÓN FIJO DEL CARBÓN ACTIVADO DE CUESCO DE COCO PRODUCIDO EN EL HORNO NICHOLS

Las muestras de carbón activado tomadas a cada temperatura fueron sometidas a análisis de contenido de volátiles cenizas y carbón fijo. Los resultados se muestran en la Figura 3.19 para 850 °C y Figura 3.20 para 950 °C.

Tanto la Figura 3.19 como la Figura 3.20 indican que el porcentaje de cenizas es casi constante en el proceso de activación, la cantidad de volátiles. A 950 °C existe una mayor cantidad de carbón fijo y un porcentaje casi nulo de volátiles, esto se debe a que la determinación de estos componentes se da a esta temperatura.

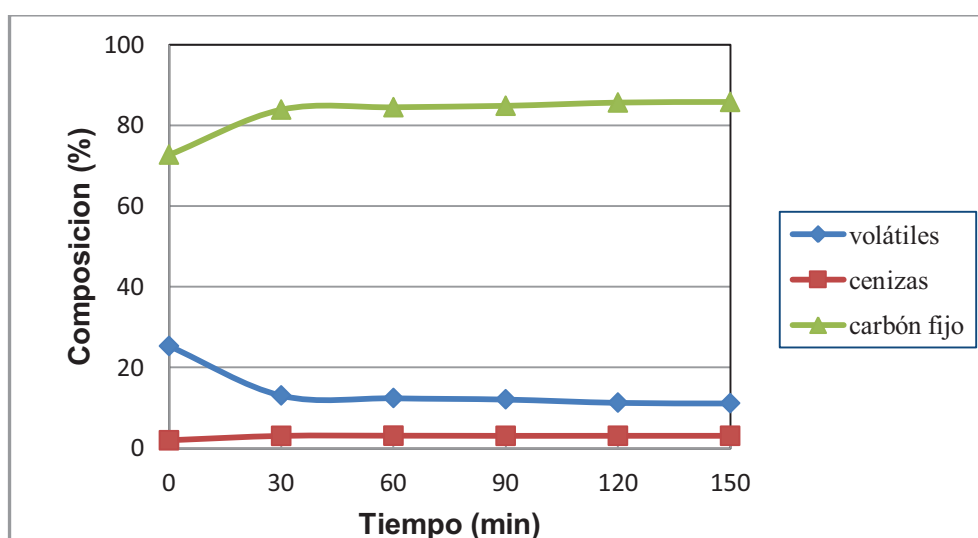


Figura 3.19 Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo en función del tiempo para una temperatura de 850 °C. Pruebas en el horno Nichols

Finalmente a partir de la Figura 3.19, la Tabla 3.10, la Figura 3.20 y la Tabla 3.11 para 850 y 950 °C respectivamente, se construyeron las Figuras 3.21 y 3.22, las mismas que señalan la dureza e índice de yodo en función del porcentaje de carbón fijo obtenido en las muestras.

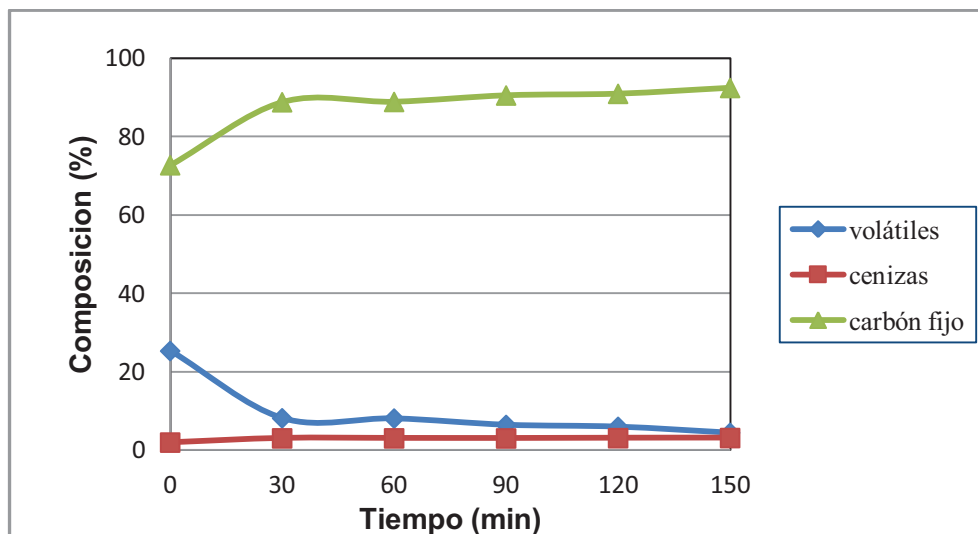


Figura 3.20 Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo en función del tiempo para una temperatura de 950 °C. Pruebas en el horno Nichols

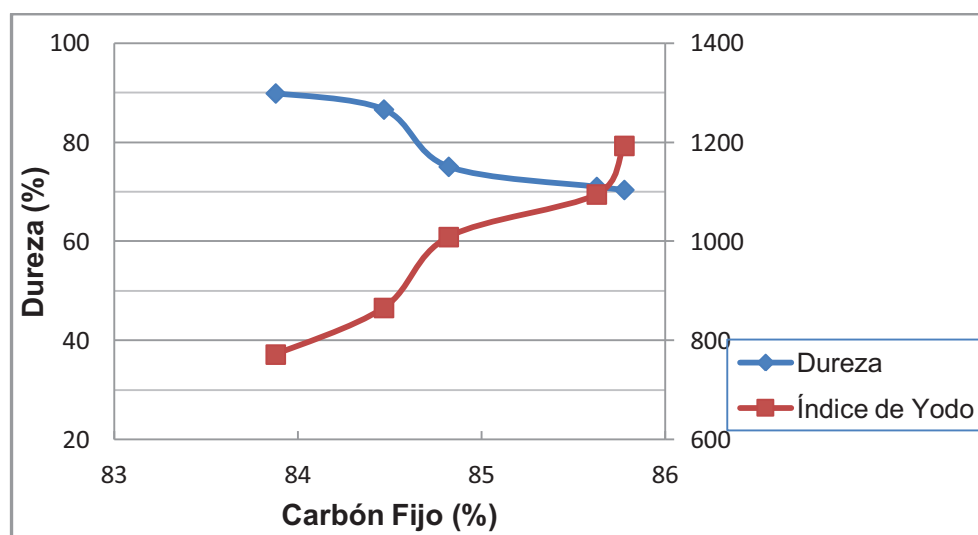


Figura 3.21 Porcentaje de dureza e índice de yodo en función del carbón fijo para el carbón activado de cuscú de coco mediante activación física con vapor de agua a 850 °C

Como se observa en la Figuras 3.21 la dureza disminuye mientras aumenta el índice de yodo para un porcentaje de carbón fijo determinado. Esto se debe al mayor tiempo de activación que produce una mayor concentración de carbón fijo, un mayor agrietamiento pero una menor dureza.

La Figura 3.22 muestra una disminución considerable de dureza a pesar de poseer un porcentaje de carbón fijo muy importante. El índice de yodo también es muy significativo, pero si el carbón activado se requiere para adsorción de

metales mediante procesos agitados, es necesario producir un material que tenga gran dureza aunque disminuya la superficie específica.

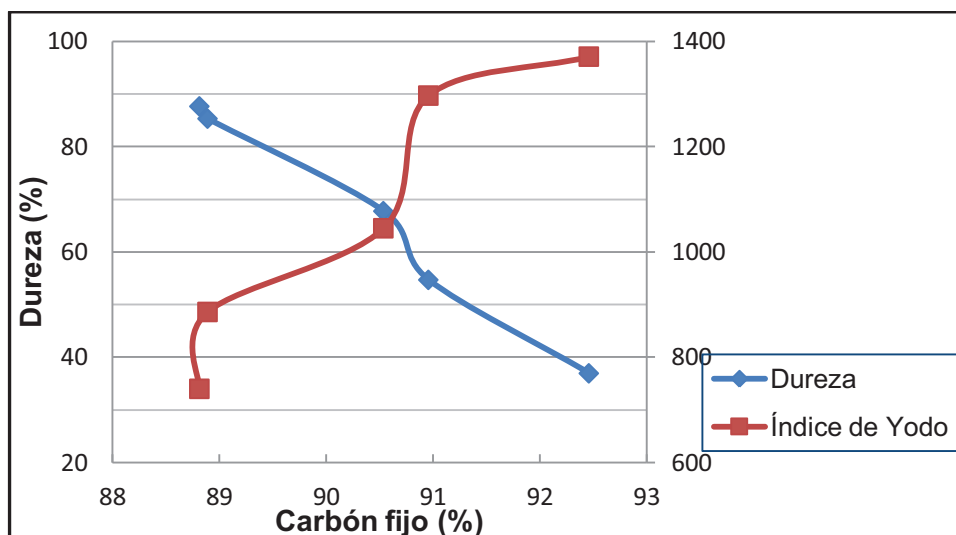


Figura 3.22 Porcentaje de dureza e índice de yodo en función del carbón fijo para el carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua a 950 °C

3.3.3 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO.

Las muestra finales de los carbones activados a 150 min fueron sometidos a varias pruebas para determinar su porosidad, estructura y grupos funcionales. Se comparó con el carbón producido a 500 °C y 30 min que fue el precursor.

3.3.3.1 Índice de Azul de metileno

El índice de azul de metileno determina la mesoporosidad del carbón activado de cuesco de coco producido.

Para la determinación del índice de azul metileno se realizaron curvas de calibración que determinaron la absorbancia de los equivalentes de carbón activado, esta se encuentra en el Anexo VIII. Una vez realizada la curva de calibración se determinó el índice de azul de metileno para los carbones activados

finales, además para el carbón precursor y de un carbón activado comercial (GSR-20), los datos se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Índice de azul de metileno para los carbones activados producidos a 150 min

Carbón	Absorbancia	mg de azul de metileno / mg de CA
Precursor	0,43	0,1
GSR-20	0,40	2,1
A 850 °C	0,35	5,5
A 950 °C	0,13	20,4

La Tabla 3.12 señala que el carbón precursor presenta una mesoporosidad casi nula, esto se debe a que todavía no fue activado. El carbón activado a 950 °C durante 150 min tiene una mesoporosidad muy alta, la absorbancia es casi 0, lo que implica que el azul de metileno fue casi removido de la solución. El carbón activado comercial tiene casi la mitad de la mesoporosidad del carbón activado a 850 °C, lo que significa que el carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua presenta una gran porosidad. La Figura 3.23 muestra una fotografía de las soluciones finales de azul de metileno a las cuales se les midió la absorbancia.

Como se observa en la Figura 3.23d la decoloración del azul de metileno producida por el carbón activado a 950 °C es considerable, comparándola con las otras que visiblemente no tienen diferencia.

3.3.3.2 Índice de decoloración de azúcar

El índice de decoloración de azúcar determina la macroporosidad del carbón activado de cuesco de coco producido. Para la determinación del índice de decoloración de azúcar se determinaron las Unidades Básicas de Referencia (UBR) según la Ecuación 2.6.

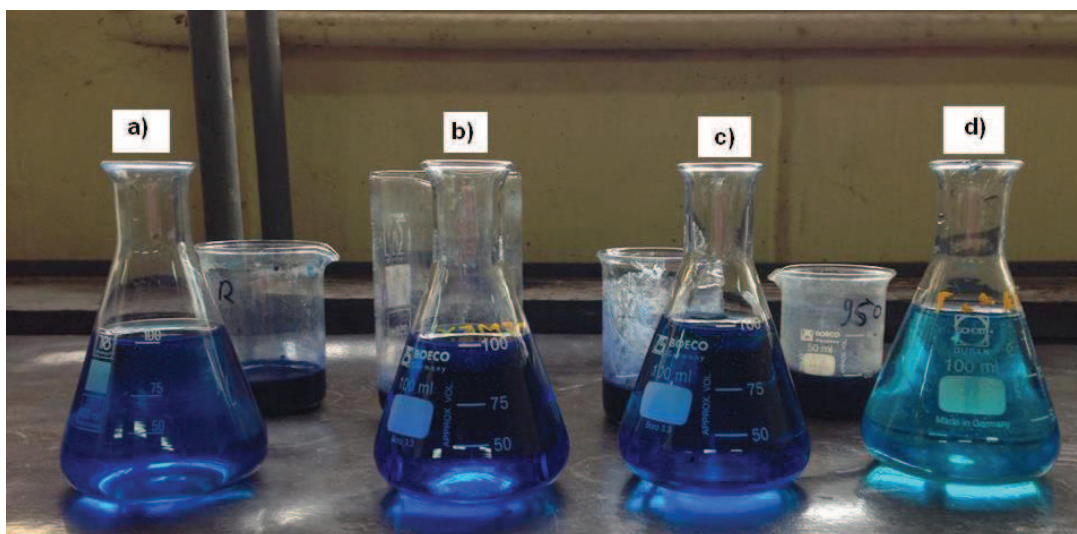


Figura 3.23 Fotografía de las soluciones finales de azul de metileno a las cuales se midió la absorbancia

a) GSR-20 b) carbón precursor c) carbón activado a 850 °C d) carbón activado a 950 °C

Se determinó el índice de decoloración de azúcar para los carbones activados finales, además para el carbón precursor y de un carbón activado comercial (GSR-20), los datos se muestran en la Tabla 3.13. A menor UBR, existe mayor adsorción de azúcar de la solución inicial.

Tabla 3.13 Índice de decoloración de azúcar para los carbones activados producidos a 150 min

Absorbancia	UBR
Blanco	199
Precursor	198
GSR-20	149
A 850 °C	148
A 950 °C	139

El blanco se encuentra dentro de los rangos permitidos por la norma que señala que debe estar entre 195 a 205 UBR. El carbón precursor ya presenta una macroporosidad, porque disminuye un poco los UBR, sin embargo, no es tan representativa como los obtenidos por los carbones activados.

Todos los carbones activados tienen una macroporosidad mínima, el carbón activado producido a 850 °C casi presenta la misma porosidad que el comercial, aunque es un poco mayor. La Tabla 3.13 muestra que las UBR del carbón producido a 950 °C son las menores, lo que significa que el éste es producto de mejor macroporosidad.

3.3.3.3 Titulación Boehm

La titulación Boehm determina la presencia de grupos oxigenados presentes en el carbón activado. Se determinó la presencia de grupos fenólicos, grupos lactónicos y carboxílicos en el producto final. Los datos se muestran en la Tabla 3.14. La ficha técnica se encuentra en el Anexo IX.

Tabla 3.14 Grupos funcionales oxigenados de las muestras de carbón activado durante 150 min, datos obtenidos mediante titulación Boehm

Muestra	Grupos fenólicos (μmol/g CA)	Grupos lactónicos (μmol/g CA)	Grupos carboxílicos (μmol/g CA)	Total (μmol/g CA)
850 °C	50	0	200	250
950 °C	100	150	50	300

Como muestra la Tabla 3.14 el carbón activado a 850 °C presenta gran cantidad de grupos carboxílicos, poca cantidad de fenólicos y no posee grupos lactónicos, mientras que el carbón activado a 950 °C presenta grupos lactónicos y fenólicos considerables y pocos grupos carboxílicos, además presenta mayor cantidad de grupos totales.

El total de la presencia de los grupos oxigenados podría otorgar mejores propiedades de adsorción, lo que se comprueba con los índices presentados en las Tablas 3.10 a 3.13 donde el carbón producido a 950 °C tiene mayores propiedades adsorptivas. La presencia de grupos lactónicos produce una mayor adsorción en el carbón activado a 950 °C. Lastimosamente estos datos no se pueden comparar con la bibliografía, ya que éstos se elaboraron con carbón

activado mediante activación química, lo que significa que hay una influencia y reacciones químicas que producen por ejemplo valores negativos de estos grupos funcionales.

3.3.3.4 Caracterización de la morfología del carbón activado

Se tomaron fotografías con la ayuda del microscopio electrónico de barrido Tescan-Vega de los carbones activados finales y se comparó con la estructura del carbón utilizado como precursor. La Figura 3.24 muestra el carbón precursor a diferentes grados de aumento, mientras que las Figuras 3.25 y 3.26 muestran los carbones activados a 850 y 950 °C respectivamente.

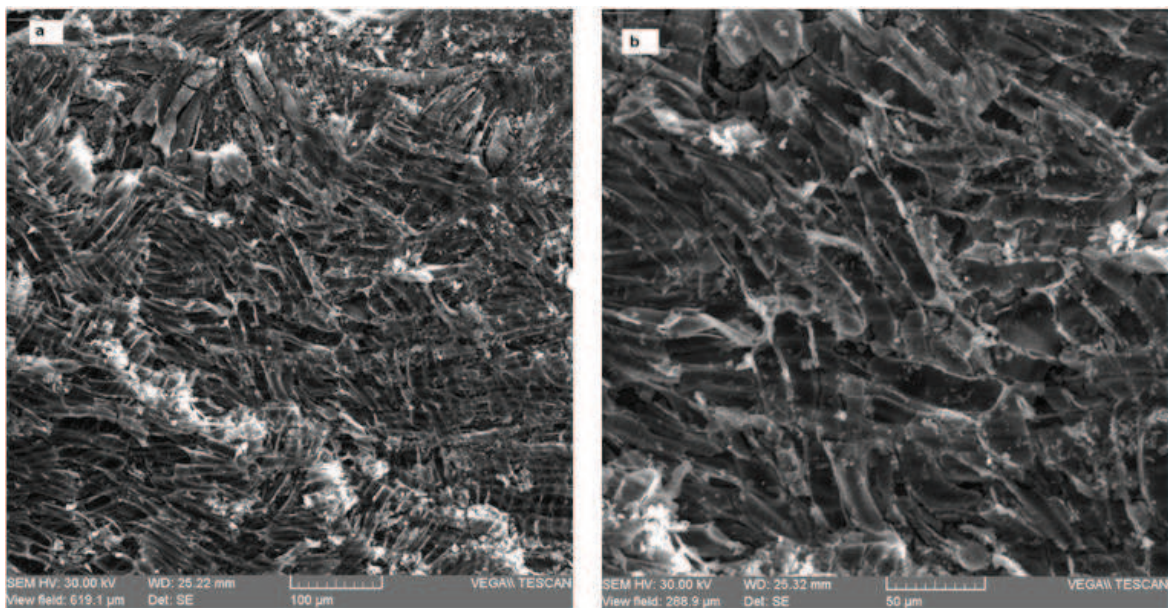


Figura 3.24 Fotografías MEB del cuesco de coco carbonizado diferentes grados de aumento: a) 350 y b) 750

Las Figuras 3.24a y 3.24b muestran la estructura desordenada del coco, comparándolas con la Figura 3.2 se aprecia un poco más de orden, además tienen mayor similitud a la Figura 1.4 que muestra las paredes celulares del fruto (Abdul-Khalil, et al., 2006, p. 225). No se pueden observar claramente los poros presentes en el cuesco carbonizado debido al poco grado de aumento con las que están tomadas estas fotos.

Las Figuras 3.25a a 3.25d muestran de manera significativa la porosidad del carbón activado producido. En las Figuras 3.25b y 3.25c muestran además segmentos de carbón activado donde no se presenta poros, o estos son muy pequeños. La porosidad por lo general como denota la Figura 3.25 es desordenada

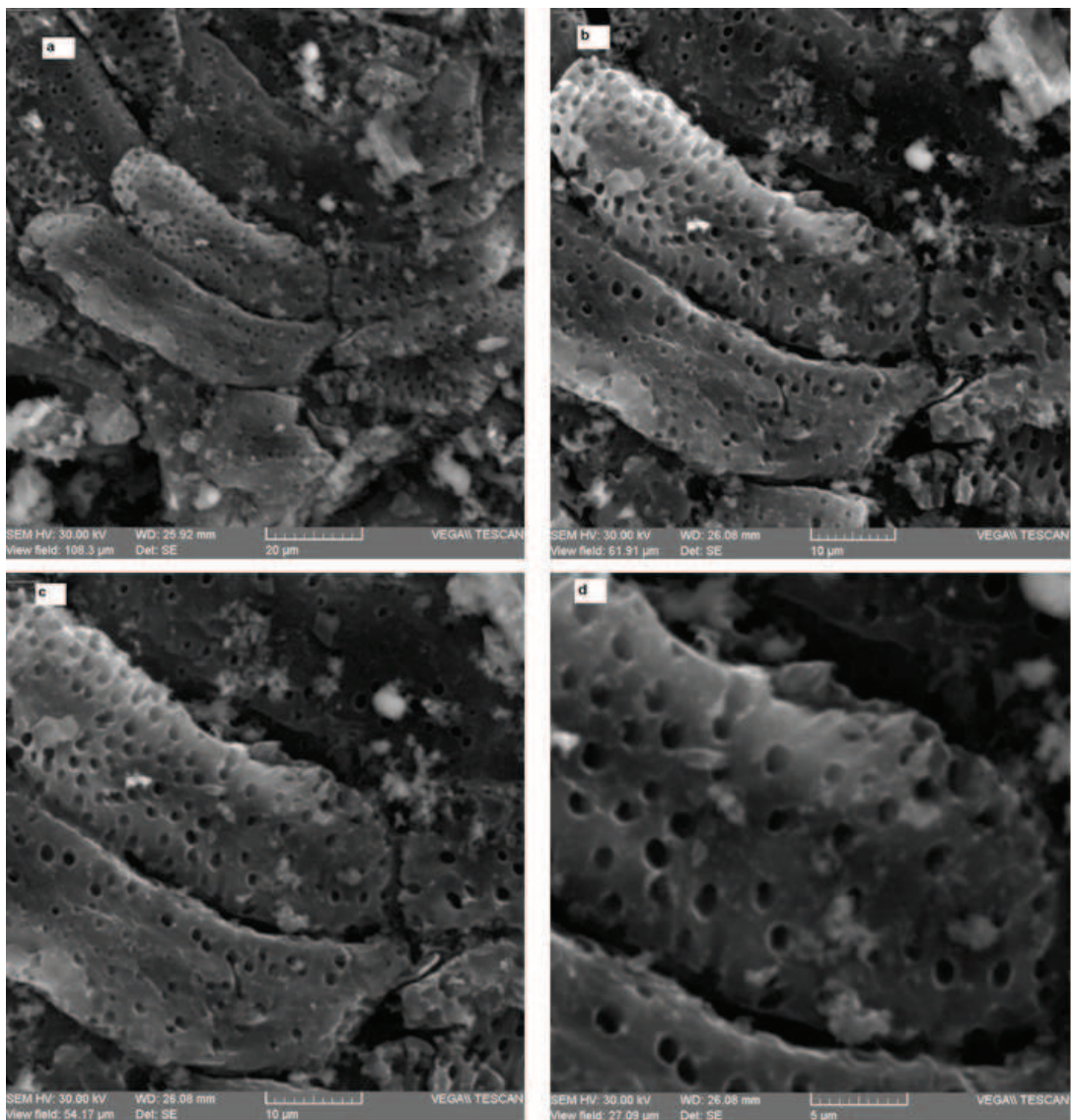


Figura 3.25 Fotografías MEB del carbón activado de cuesco de coco a 850 °C y 150 min a diferentes grados de aumento: a) 2 000, b) 3 500 c) 4 000 y d) 8 000

A pesar de que en la Figura 3.24 no se aprecia ningún poro, la Figura 3.25 cambia radicalmente, esto también se traduce en que el carbón precursor de la Figura

3.24 no posee la adsorción que el carbón producido tiene como se observa claramente en las Tablas 3.11 y 3.12.

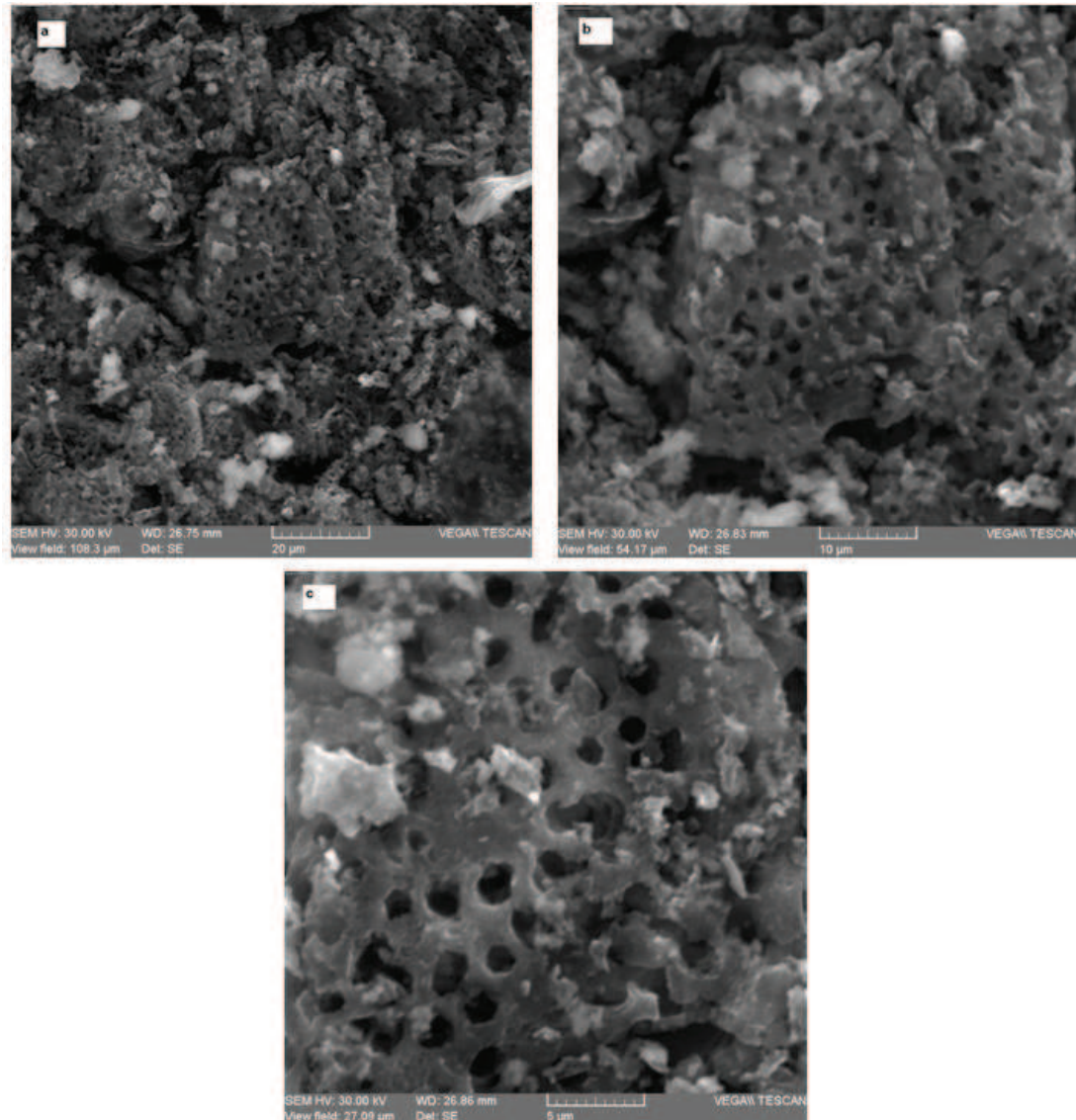


Figura 3.26 Fotografías MEB del carbón activado de cuesco de coco a 950 °C y 150 min a diferentes grados de aumento: a) 2 000, b) 4 000 y c) 8 000

Las Figuras 3.28a a 3.28c presentan mayor cantidad de poros que las Figuras 3.27a a 3.27d, sin embargo como se aprecia con claridad en la Figura 3.28c, los poros en muchos de los casos se superponen lo que aumenta considerablemente la adsorción como se aprecia en las Tablas 3.11 y 3.12, pero produce una disminución de la dureza como se determinó en las Figuras 3.21 y 3.22

respectivamente porque estos poros al ser sometidos a abrasión tienden a romperse con mayor facilidad, debido a la cercanía y al tamaño.

De la secciones 3.3.1 a 3.3.3 se puede establecer que el carbón activado que presenta las mejores condiciones de adsorción, a pesar de tener una bajísima dureza, es el obtenido a 950 °C durante 150 min. Sin embargo, se producirá carbón activado a 850 °C debido a que la dureza es un factor determinante para la adsorción de oro.

La planta de carbón activado de cuesco de coco será construida a una temperatura de operación de 850 °C durante 150 min (tA).

3.4 DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES PARA LA PRODUCCIÓN DE 10 T/MES DE CARBÓN DE CUESCO DE COCO

El diagrama de flujo se estableció para una producción de 10 t/mes de carbón activado a partir de las conchas de coco. Previo al dimensionamiento de equipos, se estableció la constante cinética tanto de la carbonización como de la activación con vapor de agua para determinar las dimensiones de los hornos y el tiempo de residencia.

3.4.1 CINÉTICA DE LOS PROCESOS DE ACTIVACIÓN Y CARBONIZACIÓN

Es necesario establecer las constantes cinéticas (k) del proceso de carbonización del cuesco de coco y de la activación física con vapor de agua del carbón producido.

3.4.1.1 Cinética de carbonización

Para la cinética de carbonización se utilizaron los datos con los que se elaboró la Figura 3.1 de la curva TGA del cuesco de coco, los mismos que se encuentran detallados en el Anexo X. Para la Figura 3.27 se graficó $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) V_S - \frac{1}{T}$ de la Ecuación 1.23 y se normalizó la curva.

Como se aprecia en la Figura 3.27, la linealización no es aceptable ya que el coeficiente de correlación no es cercano a 1. Para mejorar la gráfica se asumió que la reacción es de segundo grado ($n=2$), con esto se graficó $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) V_S - \frac{1}{T}$ el mismo que se encuentra en la Figura 3.28.

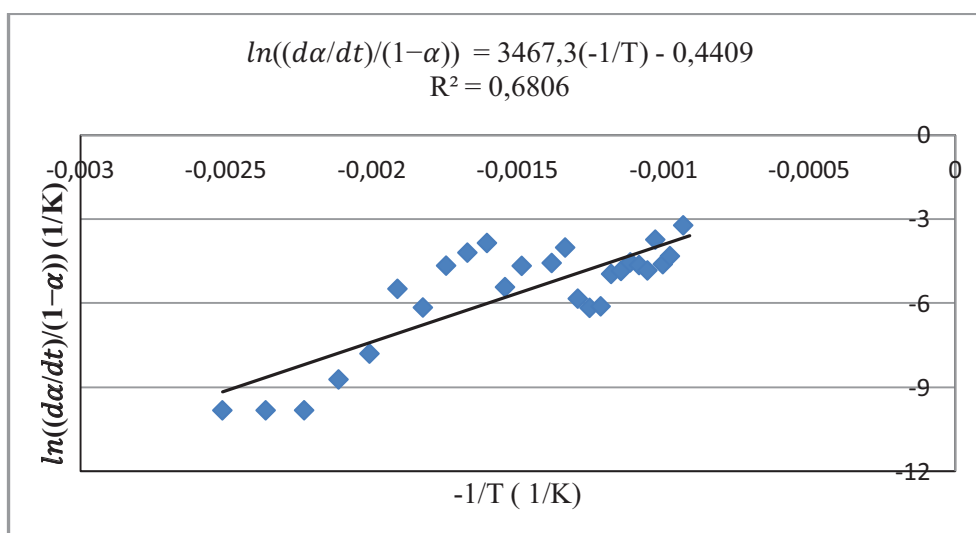


Figura 3.27 $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ en función de $-\frac{1}{T}$ para los datos obtenidos de la curva TGA del cuesco de coco

La Figura 3.28 comprueba que la reacción es de orden 2 porque a pesar de que la gráfica no tiene un coeficiente de correlación (R^2) deseable (cercano a 1), para ser datos experimentales éste es aceptable.

A partir de la Ecuación 1.23 y la Figura 3.28 se encontraron las constantes del proceso. Para hallar la constante cinética (k) se utilizó la Ecuación 1.20 y la

temperatura que se usó fue de 500 °C. Los datos de las constantes halladas se encuentran en la Tabla 3.15.

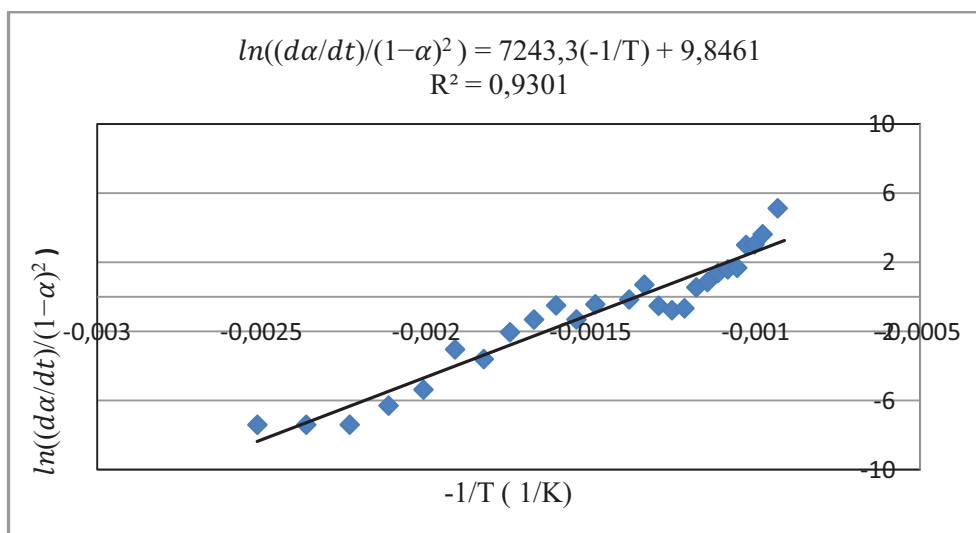


Figura 3.28 $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}(1-\alpha)^2\right)$ en función de $-\frac{1}{T}$ para los datos obtenidos de la curva TGA del cuesco de coco

Tabla 3.15 Valores cinéticos de la reacción de pirolisis del cuesco de coco, obtenidos a partir de la Figura 3.27

	Valor	Unidades
Temperatura (T)	773	K
Energía de Activación (Ea)	60,2208	kJ/mol
Factor de frecuencia (A)	18884,5612	min ⁻¹
Constante cinética (k)	1,6092	min ⁻¹
Tiempo de conversión (τ)	24,85	min

Estos valores están dentro del rango obtenido por White, et al., (2011) el cual establece que para una pirolisis entre 250 a 750 °C los valores están entre 58,9 a 114,8 kJ/mol (p. 11). El tiempo de residencia (τ) se calculó según la Ecuación 3.1 (Levenspiel, 1986, p. 409). Se asumió que el tamaño de partícula no influye en el tiempo de carbonización.

$$\tau = \frac{\rho_B}{k \times C_A} \quad [3.1]$$

Donde:

ρ_B : densidad del cuesco de coco

C_A : concentración del gas en el interior del horno

3.4.1.2 Cinética de activación

Para la cinética de activación se utilizó el modelo de conversión progresiva explicado en la sección 1.3.3.2. Para esto se determinó α para cada grupo de datos (850 y 950 °C) en donde se tomó como peso inicial (w_o) al carbón precursor y como peso final (w_f) al carbón producido a 150 min. Posteriormente se graficó la Ecuación 1.29 y se linealizó para cada temperatura para obtener $k_r \times C_A$. Donde la concentración de A es la concentración de la mezcla gaseosa obtenida a partir de los datos del Anexo VI. Las Figuras 3.29 y 3.30 muestran la linealización de los gráficos de la Ecuación 1.29 para 850 y 950 °C respectivamente, el tratamiento de datos se encuentra en el Anexo X.

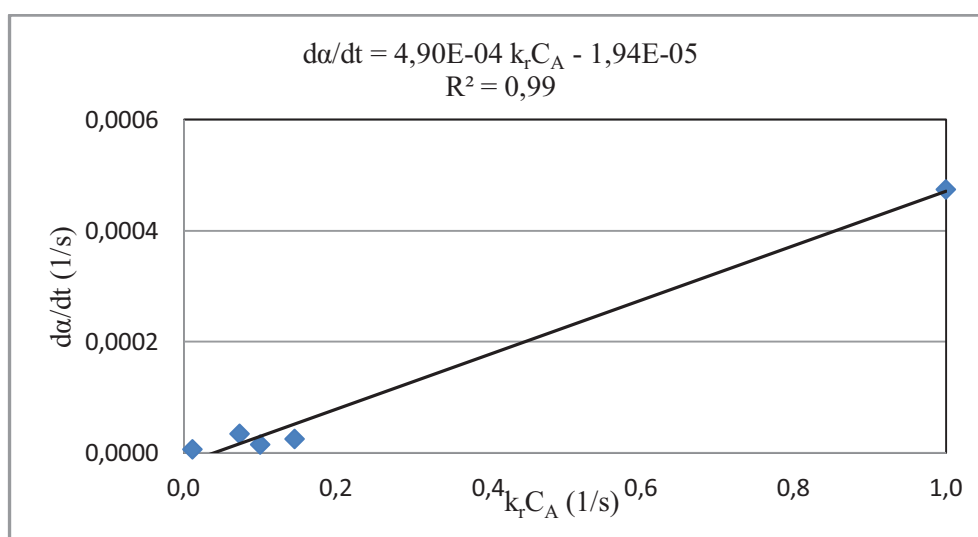


Figura 3.29 $\frac{d\alpha}{dt}$ en función de $1 - \alpha$ para los datos obtenido del porcentaje de carbón fijo en el carbón activado de cuesco de coco a 850 °C

Tanto la Figura 3.28, como la 3.29 son rectas cuyo eje de corte con las abscisas tiende a 0, lo que encaja con la Ecuación 1.32. La poca cantidad de puntos puede ser una fuente de error, sin embargo, se aceptarán los valores para poder hallar las constantes cinéticas a las 2 temperaturas dadas.

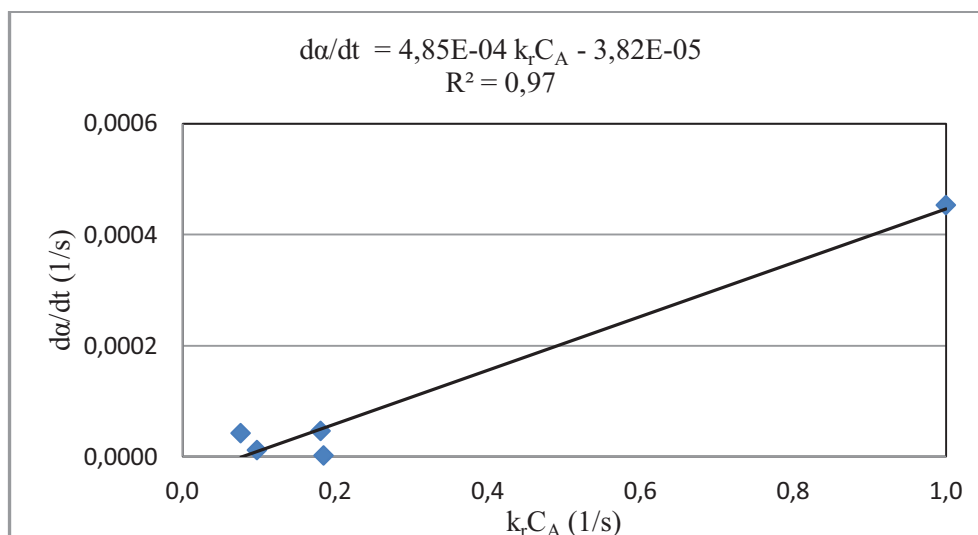


Figura 3.30 $\frac{d\alpha}{dt}$ en función de $1 - \alpha$ para los datos obtenidos del porcentaje de carbón fijo en el carbón activado de cuesco de coco a 950 °C

A pesar de que la combustión produce vapor y que la atmósfera también tiene agua, no se consideró para el cálculo de la cinética de activación ya que el flujo producido por el calderín es mayor al producido en la reacción. Los resultados se muestran en la Tabla 3.16.

La Tabla 3.16 muestra que la constante cinética es relativamente elevada, esto se debe a las altas temperaturas que se requieren para producir este producto. Además la concentración de vapor de agua es relativamente baja.

Con los datos de las cinéticas tanto de la activación como de la carbonización, además del flujo de vapor necesario para transformar el carbón en carbón activado, se elaboró el diseño conceptual.

Tabla 3.16 Valores cinéticos de la reacción de activación del carbón de cuesco de coco activado con vapor de agua obtenidos a partir de las Figuras 3.29 y 3.30

Temperatura (°C)	$k_r C_A$ (s ⁻¹)	C_A $\left(\frac{\text{mol}}{\text{cm}^3 \text{ gas}}\right)$	k_r $\left(\frac{\text{cm}^3 \text{ gas}}{\text{mol} \times \text{s}}\right)$	τ (h)
850	4,90E-4	7,88E-6	62,183	2,61
950	4,85E-4	8,58E-6	56,527	2,64

3.4.2 DISEÑO CONCEPTUAL Y DISEÑO DE EQUIPOS

Para el diseño conceptual de la planta se consideró: estimación de la cantidad de cuescos de coco para la producción de carbón activado mediante activación física con vapor de agua, diseño del proceso, equipos y materiales; ubicación y dimensionamiento.

Para el diseño de equipos se considera que el proceso es el mismo que se presenta en la Figura 3.31, por lo que es necesario el dimensionamiento de un horno rotatorio, un caldero para la producción de vapor, un triturador para producir el tamaño de partícula deseada de la materia prima y otro para el carbón activado, una cámara de post combustión, una cámara de enfriamiento y un lavador húmedo de gases (wet scrubber). A partir de los datos de las Tablas 3.15 y 3.16 se determinaron las dimensiones del horno rotatorio y del caldero que proporcione la cantidad necesaria de vapor de agua necesario para activar el carbón.

3.4.2.1 Estimación de la cantidad de cuesco de coco necesario para la producción de carbón activado

Si se considera el peso promedio de una concha de coco y el rendimiento de la Tabla 3.10 y se asume un rendimiento del 60 % para la activación, se necesita

para la producción de 10 t/mes de carbón activado de cuesco, 60 t/mes de materia prima, aproximadamente 20 000 cuescos de coco diarios.

Si se toma en cuenta la producción de cuesco de coco según el INEC (2011), la planta recogerá el 22,5 % de la producción nacional, si se toma en cuenta los mismos datos que el Ecuador arrojó en el 2011.

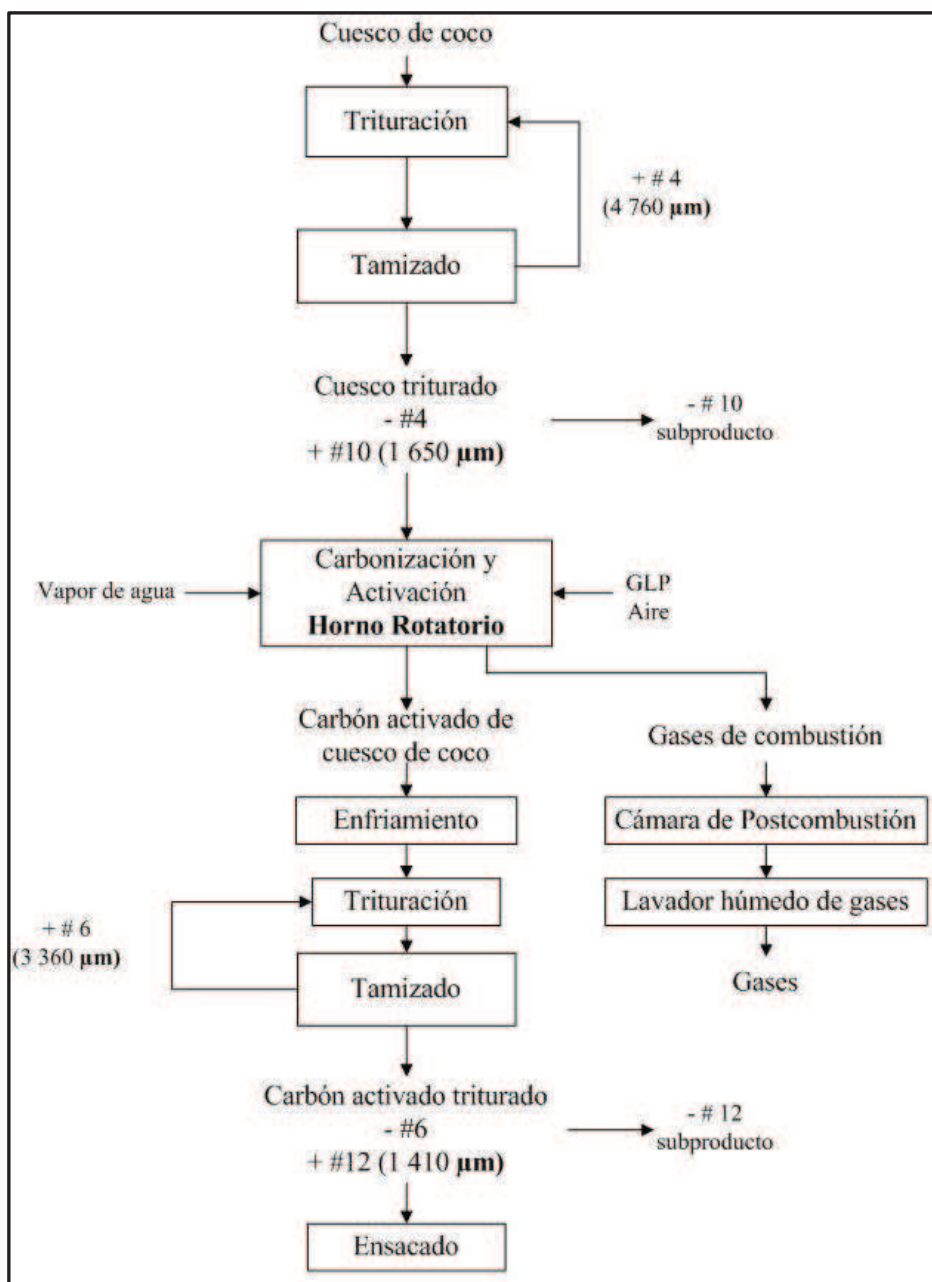


Figura 3.31 Diagrama de bloques del proceso de producción de carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua

3.4.2.2 Dimensionamiento del horno rotatorio

Con los datos obtenidos de las Tablas 3.15 y 3.16 se diseñó el horno rotatorio a partir de la Ecuación 2.7. Si se considera que el tiempo de residencia es el mismo que se obtuvo en la Tabla 3.16 (τ) para el carbón producido a 850 °C, pero además se modificó para que el horno tenga una longitud para carbonizar y otra para activar con vapor de agua. Los resultados de las medidas se encuentran en la Tabla 3.17. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI. Se consideró para el ángulo de reposo, que a pesar de que se carboniza en los primeros metros, este permanece constante a lo largo del horno rotatorio.

En la Tabla 3.17 se puede observar que las dimensiones son relativamente pequeñas, esto se debe a la poca producción comparada por ejemplo a la elaboración de Clinker, en donde se producen 10 t/h y se requieren hornos rotatorios de 2,7 m de diámetro y 42 m de longitud. Los primeros 40 cm carbonizarán la materia prima y la longitud restante activará el carbón. Los cálculos se muestran en el Anexo XI.

Tabla 3.17 Dimensiones del horno rotatorio para producir carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua

Parámetro	Valor	Unidades
t	144	min
L	14	m
Di	1	m
β	2	grados sexagesimales
ω	1	RPM
Θ	33,85	grados sexagesimales
Flujo de entrada	250	kg cuesco/h
Flujo de salida	42,375	kg Carbón activado/h

Otro punto importante, además de la determinación de las medidas del horno rotatorio es encontrar el movimiento de los sólidos en el interior, el mismo que presenta 2 componentes: axial y transversal.

El movimiento axial influye en el tiempo de residencia del cuesco, mientras que el transversal incide en la transferencia de masa y calor entre los gases y el material sólido, además de la transferencia de energía entre ellos y las paredes del horno (Coral, 2011, p. 35). La Figura 3.32 esquematiza los diferentes regímenes de movimiento del material sólido al interior del horno rotatorio según Boateng (2008, p. 20). Además la Tabla 3.18 señala la determinación de este régimen según el número de Froude, el mismo que se calcula a partir de la Ecuación 2.8.

Coral señala (2011): *“La efectividad de la transferencia de masa y energía dependerá del régimen dominante, debido a que cada uno de ellos expone de forma diferente la capa activa de material sólido a los gases. En el movimiento deslizante se considera que el lecho de material sólido se mueve como un todo sin generar ‘ninguna’ condición de mezcla. En el movimiento de caída el material sólido se eleva como un todo hasta que vence el ángulo de reposo del material y desciende de forma uniforme. En los movimientos cascada y catarata el movimiento del material sólido es agresivo generando ‘olas’ al interior del horno. Este tipo de movimientos se presentan a elevadas velocidades de rotación. El movimiento centrífugo es una condición crítica, en la cual el material sólido, por efecto de la fuerza centrífuga, se adhiere a la pared interna del horno y gira a la misma velocidad, permaneciendo prácticamente estático, sin generar ninguna condición de mezclado”* (p. 35).

Tabla 3.18 Número de Froude y regímenes de movimiento de material sólido

Movimiento	Intervalo
Deslizante	$Fr < 1 \times 10^{-5}$
Caída	$1 \times 10^{-5} < Fr < 0,3 \times 10^{-3}$
Rodante	$0,5 \times 10^{-3} < Fr < 0,2 \times 10^{-1}$
Cascada	$0,4 \times 10^{-1} < Fr < 0,8 \times 10^{-1}$
Catarata	$0,9 < Fr < 1$
Centrífugo	$Fr > 1,0$

(Boateng, 2008, p. 30)

Con los datos establecidos en la Tabla 3.17 se determinó que el número de $Fr = 0,0005$ que corresponde a un régimen rodante según la Tabla 3.18. A pesar de eso, por la naturaleza del sólido y del vapor la parte del horno para la activación necesariamente debe tener una especie de paletas, que puedan mezclar el carbón con el vapor para que se dé la reacción de activación, la Figura 3.33 muestra un esquema de éste.

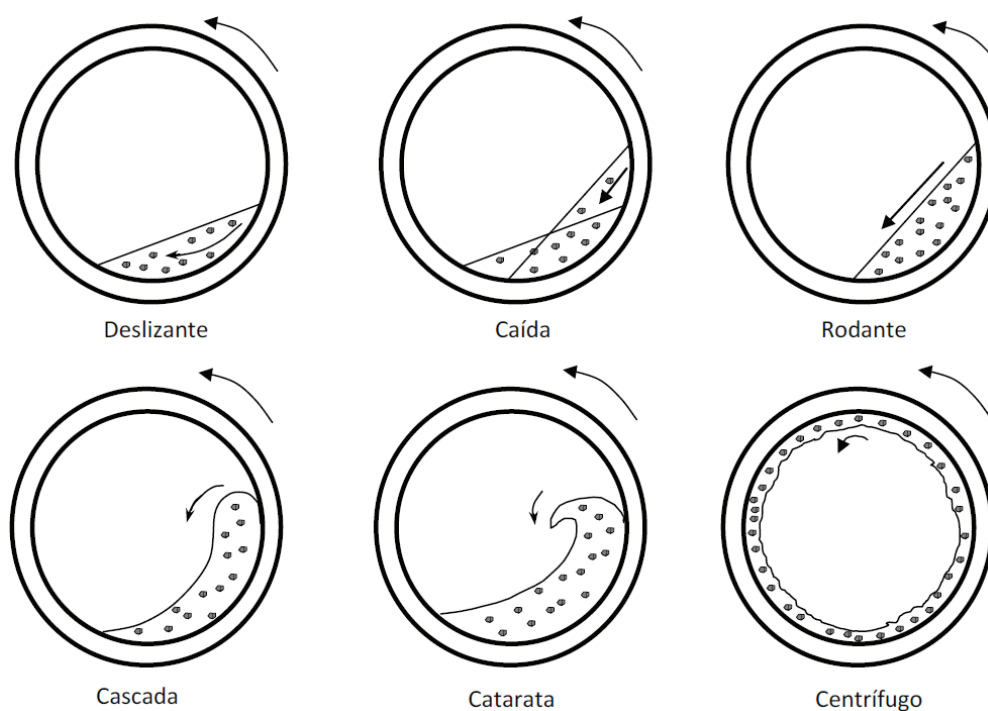


Figura 3.32 Esquemas de los diferentes regímenes de movimiento de material sólido al interior de un horno, modificado (Boateng, 2008, p. 30)

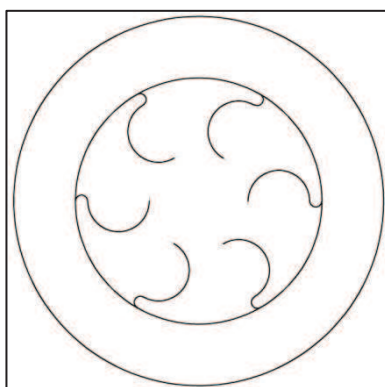


Figura 3.33 Esquema de las paletas presentes en el horno rotatorio para que se produzca la reacción de activación entre el carbón y el vapor de agua

Para la determinación del poder calórico del combustible se determinó una combustión incompleta que produce las Ecuaciones 3.2 y 3.3 para el propano y butano respectivamente, componentes del GLP. Se establecieron estas ecuaciones ya que según la Figura 2.6, en el horno Nichols se produce tanto monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y gas hidrógeno (H₂).



A partir de las Ecuaciones 3.2 y 3.3 se elaboró la Tabla 3.19 donde se muestran los requerimientos energéticos para obtener el carbón activado de cuesco de coco. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

Tabla 3.19 Requerimientos Energéticos del horno rotatorio para la producción de carbón activado de cuesco de coco

Parámetro	Valor	Unidades
GLP requerido	25,00	kg/h
Aire requerido	319,74	kg/h
Flujo volumétrico de aire a condiciones estándar (25 °C y 1 ATM)	267,00	m ³ /h
λ	0,82	
T operación	850	°C

La Tabla 3.19 muestra una atmósfera reductora, esto es necesario para la producción de carbón activado y para la minimización de producción de cenizas. Además la cantidad de GLP requerido es considerable ya que el poder calórico disminuye debido la combustión incompleta que se produce en el horno. Se eligió como combustible GLP debido a su facilidad para mezclarse con aire directamente en el quemador y porque es más fácil controlar la atmósfera.

Además se calculó la composición de los gases de salida, la misma que se señala en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20 Composición de los gases de salida del horno

Gas	Flujo (kg/h)	% Flujo	Flujo molar (mol/h)	% Molar
H ₂	1,02	0,30	504,03	3,98
CO ₂	53,23	15,50	1 209,67	9,56
CO	14,11	4,11	504,03	3,98
H ₂ O	30,85	8,98	1 713,7	13,54
N ₂	244,22	71,11	8 722,13	68,93
TOTAL	343,43	100,00	12 653,56	100,00

Los valores obtenidos de la Tabla 3.20 son similares a los datos experimentales del horno Nichols Herreshoff mono solera para ese valor de λ (0,82). Estos valores se encuentran en la Figura 2.6.

Los valores calculados difieren a los experimentales del horno Nichols Herreshoff para CO y H₂, ya que éstos son iguales en la Tabla 3.20, mientras que en la Figura 2.6 existe mayor composición de gas hidrógeno que de CO. El valor del vapor de agua y del CO₂ es muy similar.

Como indica la Tabla 3.20 es necesario construir una cámara de postcombustión que elimine los gases de efecto invernadero como el gas hidrógeno y el monóxido de carbono.

3.4.2.3 Dimensionamiento de la sección de reducción y clasificación de tamaño de la materia prima

Se debe dimensionar un equipo de reducción de tamaño y clasificación para la materia prima que se introducirá al horno. Se escogió una trituradora de mandíbulas, las especificaciones se encuentran en la Tabla 3.21.

Las características para la elección de la trituradora de mandíbulas de la Tabla 3.21 coinciden con el diámetro del cuesco de coco promedio obtenido experimentalmente y señalado en la Tabla 3.1, además de la producción mínima de la Tabla 3.17.

Tabla 3.21 Especificaciones de la trituradora de mandíbulas usada para la reducción de tamaño del cuesco de coco

	Valor	Unidades
Modelo	LB-1510	
Abertura	100 × 150	mm
Motor	1,325	kW
Producción	0,4	t/h

Después del proceso de reducción de tamaño del cuesco de coco, se clasifica por medio de un tamizador grizzly a 5 000 μm , cuya área de clasificación es de 50,90 cm^2 , es muy pequeño debido a la poca producción de la planta.

Del ingreso al grizzly, se supuso que el 80 % pasa por el mismo debido a la determinación del d_{80} que se encuentra en la Tabla 3.2. Además según la misma, el 6 % del total presenta un tamaño menor a malla 10 (1 650 μm).

El cuesco de coco a un tamaño menor a 1 650 μm se considera un subproducto que podría ser de igual manera comercializado como carbón activado. El grizzly que separa esta fracción tiene un área de 128 cm^2 . Finalmente se diseñó una pila stock para una reserva de 2 días, no se consideró mucho tiempo debido a que este material puede atraer plagas como ratones. Las dimensiones de esta pila stock son: 0,95 m de alto y 2,82 m de longitud. Los cálculos se muestran en el Anexo XI.

3.4.2.4 Dimensionamiento de la sección de reducción y clasificación de tamaño del carbón activado producido

Una vez que la materia prima sea enfriada es necesario reducir de tamaño para producir carbón activado 6×12, es decir tamaño de partícula entre # Tyler N° 6 y 12 (1 650 μm y 1 410 μm). Para esto, se escogió una trituradora de rodillos, las especificaciones se encuentran en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22 Especificaciones de la trituradora de mandíbulas usada para la reducción de tamaño del cuesco de coco

	Valor	Unidades
Modelo	VK-18/30	
Abertura	470 × 285	mm
Motor	7,5	kW
Producción	0,5	t/h

Después del proceso de reducción de tamaño del carbón activado de cuesco de coco producido se clasifica por medio de un tamizador grizzly a 1 650 μm , cuya área de clasificación es de 91,44 cm^2 . Del ingreso al grizzly, se supuso que el 60 % pasa por el mismo, además también se asumió que el 10 % del total presenta un tamaño menor a malla 12 (1 410 μm).

El cuesco de coco a un tamaño menor a 1 410 μm se considera un subproducto que podría ser de igual manera comercializado como carbón activado. El grizzly que separa esta fracción tiene un área de 64,44 cm^2 . Los cálculos se muestran en el Anexo XI.

3.4.2.5 Dimensionamiento de la cámara de enfriamiento

La cámara de enfriamiento consta de un tornillo sinfín cubierto de una chaqueta por la que circula agua a temperatura ambiente. El fin es poder manipular el carbón activado para su posterior embalaje (Luna, et al., 2007, p. 47). Las

dimensiones se encuentran en la Tabla 3.23. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

Tabla 3.23 Dimensiones de la cámara de enfriamiento

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de entrada (carbón)	41,7	kg/h
Diámetro interno	0,47	m
Diámetro externo	0,56	m
Longitud interna	14	m
Caudal de agua	1 388,89	kg/h

3.4.2.6 Dimensionamiento del caldero

Una vez que se tiene dimensionado el horno rotatorio su consumo energético y la cámara de enfriamiento, es necesario determinar las dimensiones del caldero, el flujo de vapor que produce y la cantidad de combustible que se necesita para su funcionamiento.

A partir de la Tabla 3.16 se encontró la cantidad de agua necesaria para inyectar al horno para mantener la concentración de vapor constante. Es necesario indicar que el agua proveniente de la cámara de enfriamiento irá al caldero, con eso se aprovechará el calor de la cámara. Los datos de diseño del caldero se encuentran en la Tabla 3.24. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

La Tabla 3.24 muestra las dimensiones con las que se deberá construir el caldero. Además se señala el combustible que se usó para los cálculos que es diésel. El consumo de éste es considerable al igual que la cantidad de vapor de agua que se necesita para activar el carbón. La temperatura con que entra el vapor de agua es suficiente ya que los gases de combustión del horno giratorio también los calentarán.

Tabla 3.24 Dimensiones del caldero para el vapor de agua que activará el carbón de cuesco de coco

	Valor	Unidades
Altura de la caldera	4 000	mm
Diámetro de la caldera	1 570	mm
Altura de la caja de fuego	2 950	mm
Número de tubos hervidores	5	
Diámetro de tubos hervidores	250	mm
Combustible	Diésel	
Consumo de combustible	1 029,86	gal/mes
Ingreso de agua al caldero	1 660,53	kg/h
T vapor de salida	200	°C
Flujo de aire	2 063,54	kg/d

3.4.2.7 Dimensionamiento de los tanques de reserva de combustible

Es necesario tener tanques de almacenamiento para los combustibles. El abastecimiento será semanal. La Tabla 3.25 muestra las dimensiones de cada uno de ellos, los cálculos se presentan en el Anexo XI.

Tabla 3.25 Dimensiones de los tanques de reserva de combustible

	Forma	Volumen (m³)	Altura (m)	Largo (m)
GLP	Cilindro horizontal	3,0	1,6	2,0
Diésel	Cilindro vertical	1,4	1,6	1,1

La Tabla 3.25 señala que la altura es la misma para los 2 tanques de reserva. Esto fue calculado para que sea aproximadamente la altura de un operario o de la persona que despacha el combustible. Además para los 2 tanques se realizó un factor de seguridad del 30 %.

3.4.2.8 Dimensionamiento de la cámara de post-combustión

Al trabajar en atmósfera reductora es necesario construir una cámara de postcombustión que reduzca la producción de gases de efecto invernadero. Este equipo servirá para producir CO₂ y vapor de agua a partir del H₂ y CO respectivamente, según las Ecuaciones 3.4 y 3.5.



Como son reacciones exotérmicas, se asumió que se necesitará en el quemador el 5 % en moles de GLP del total de estos 2 reactivos, mostrados en la Tabla 3.20, además se necesitará un exceso de aire del 20%. La Tabla 3.26 indica las dimensiones de la cámara. Los cálculos se muestran en el Anexo XI.

Tabla 3.26 Dimensiones de la cámara de post-combustión

	Valor	Unidades
Modelo	CP - 1 000	
Potencia máxima	300 000	kcal
Diámetro interior	90	cm
Longitud interna	160	cm
Tiempo de residencia	6	s
Combustible	GLP	
Consumo de combustible	2,5	kg/h
Flujo de aire	62,62	kg/h
T salida de los gases	900	°C

Como se observa en la Tabla 3.26, los gases de salida tienen una temperatura muy elevada por lo que es necesario diseñar un lavador húmedo que disminuya ésta para que no se produzca una contaminación térmica. La Tabla 3.27 señala la composición de los gases que se producen en la cámara de postcombustión.

Tabla 3.27 Composición de los gases de salida del horno

Gas	Flujo (kg/h)	% Flujo	Flujo molar (mol/h)	% Molar
CO ₂	5,32	5,02	120,97	3,22
H ₂ O	3,09	2,91	171,37	4,56
N ₂	93,02	87,64	3 321,99	88,32
O ₂	4,71	4,44	147,18	3,91
TOTAL	106,13	100,00	3 761,51	100,00

3.4.2.9 Dimensionamiento del lavador de gases de combustión

La Tabla 3.28 señala los gases de entrada al lavador de gases de combustión, los mismos que son la sumatoria de la Tabla 3.22 y 3.27.

Tabla 3.28 Composición de los gases de salida del horno

Gas	Flujo (kg/h)	% Flujo	Flujo molar (mol/h)	% Molar
CO ₂	58,55	13,48	1 330,64	8,64
H ₂ O	33,94	7,81	1 885,07	12,24
N ₂	337,24	77,63	12 044,12	78,17
O ₂	4,71	1,08	147,18	0,96
TOTAL	434,43	100,00	15 407,01	100,00

La Tabla 3.29 muestra las características del lavador de gases de combustión. Los cálculos se muestran en el Anexo XI.

Tabla 3.29 Dimensiones del lavador de gases de combustión

	Valor	Unidades
Temperatura de entrada de gases	900	°C
Temperatura de salida de gases	125	°C
Temperatura de entrada del agua	25	°C
Temperatura de salida del agua	90	°C
Consumo de agua	1 490	kg/h

Finalmente se muestra en la Tabla 3.30 el resumen del balance de masa de todas las corrientes.

Tabla 3.30 Resumen de los flujos que intervienen en el proceso de producción de carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua

	Trituración y clasificación [t/mes]	Almacenamiento [t/mes]	Carbonización [t/mes]	Activación [t/mes]	Empacado [t/mes]
Cuesco	72	12	60	-----	-----
Carbón	-----	-----	-----	16,7	-----
Carbón activado	-----	-----	-----	-----	10
Vapor de agua	-----	-----	-----	398,52	-----
Diésel	-----	-----	-----	5 231,79	-----
GLP	-----	5,63	5,63	-----	-----
Aire	-----	75,13	75,13	61,91	-----

Se elaboró la vista de la planta para proponer las medidas de la misma, la misma que se encuentra detallada en la Figura 3.33.

La Tabla 3.31 señala las diferentes áreas de la planta.

Tabla 3.31 Distribución de la planta según la Figura 3.34

Número	Zona	Número	Zona
1	Descarga de material	7	Vestidores y baños
2	Tanque de reserva de GLP	8	Oficinas
3	Horno	9	parqueaderos
4	Caldero	10	Cámara de enfriamiento
5	Tanque de reserva de diésel	11	Cámara de postcombustión
6	Trituración y clasificación	12	Trituradora de rodillos
		13	Lavador de gases de combustión

En la Figura 3.33 no se señalan ninguno de los 2 tanques de almacenamiento de los combustibles.

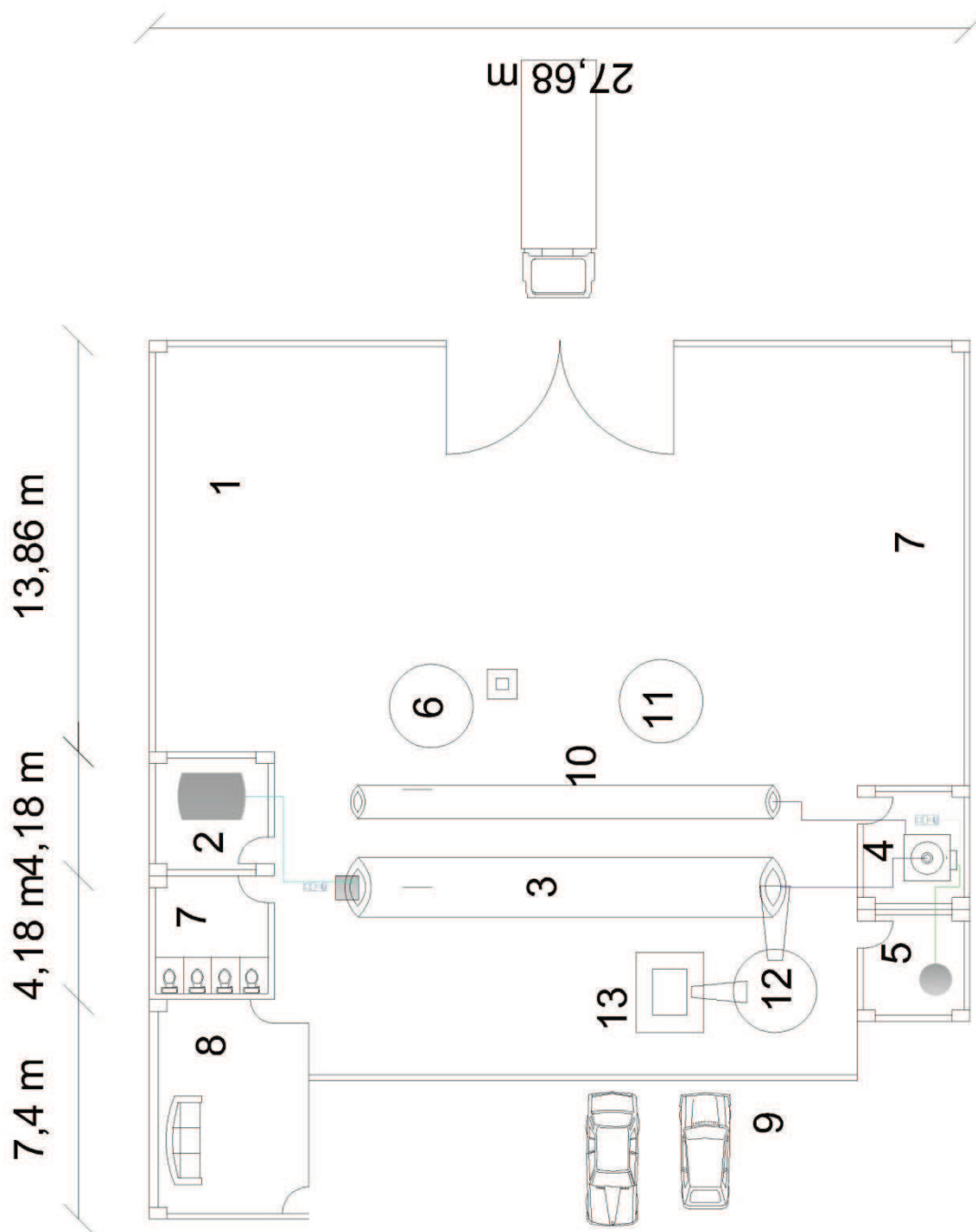


Figura 3.34 Vista de la planta de producción de cunesco de coco

3.5 EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA PLANTA PARA UNA PRODUCCIÓN DE 10 T/MES

Para el análisis económico se consideró las capacidades indicadas en la sección 3.4.2. Una vez realizado el diseño conceptual de la planta, se encontró los costos de los equipos, insumos, materia prima, gastos de inversión, costos operativos, pero encontrar el flujo de caja anual y por medio de los indicadores TIR y VAN, encontrar la viabilidad del proyecto. La Tabla 3.32 resume los equipos y su costo.

Tabla 3.32 Gastos de inversión

Denominación	Valor	Contribución porcentual
<u>Inversión fija</u>		
Terreno y construcciones	\$53 900,00	31,89
Maquinaria y equipo	\$69 050,00	40,85
Instalación de maquinaria y equipos	\$20 715,00	12,26
Tuberías y accesorios	\$2 000,00	1,18
Equipo y muebles de oficina	\$1 305,00	0,77
<u>Capital de operación</u>	\$21 095,50	13,04
TOTAL INVERSIONES	\$169 015,50	100,00

La Tabla 3.32 indica que el mayor porcentaje de los gastos de inversión se presentan en la adquisición del terreno y la construcción de la obra civil y la maquinaria y equipos, aproximadamente el 72 %.

La Tabla 3.33 señala la maquinaria y equipos que se usarán en la implementación de la planta, se consideraron que se usarán bombas para: el caldero, enfriador del carbón activado y el lavador de gases de combustión. Los compresores se usarán en la cámara de postcombustión, horno y caldero.

Tabla 3.33 Maquinaria y equipo usado en el proceso de implementación de la planta

Designación del equipo	Número de unidades	Valor Unitario	Valor Total	Dividendo Anual de Amortización
Trituradora de mandíbulas	1	\$2 000,00	\$2 000,00	\$400,00
Caldero	1	\$5 000,00	\$5 000,00	\$1 000,00
horno Rotatorio	1	\$25 000,00	\$25 000,00	\$5 000,00
Enfriador de chaqueta	1	\$2 500,00	\$2 500,00	\$500,00
ensacador	1	\$3 000,00	\$3 000,00	\$600,00
bombas	3	\$1 000,00	\$3 000,00	\$600,00
zarandas	4	\$500,00	\$2 000,00	\$400,00
bandas transportadores	1	\$800,00	\$800,00	\$160,00
tanques de reserva	2	\$4 000,00	\$8 000,00	\$1 600,00
compresor	3	\$1 250,00	\$3 750,00	\$750,00
Cámara de post combustión	1	\$8 000,00	\$8 000,00	\$1 600,00
Trituradora de rodillo	1	\$2 000,00	\$2 000,00	\$400,00
Lavador de gases	1	\$10 000,00	\$10 000,00	\$2 000,00
	TOTAL		\$75 050,00	\$15 010,00

En la tabla 3.34 se observa los costos de materia prima e insumos.

Tabla 3.34 Costos de materia prima e insumos

Designación del insumo	Costo unitario	Cantidad de Materia Prima por día	Cantidad de materia prima por mes	Cantidad de materia prima por año	Costo de materia prima por año
Cuesco de coco	0,03	2 000	60 000	720 000	\$21 600,00
vapor de agua	\$1,00	75,6	1 134	13 608	\$13 608,00
electricidad	\$0,15	200	4.000	48.000	\$7 200,00
Gas	\$0,80	285,74	4 286	51 434	\$41 147,57
Combustible diésel	\$0,80	38	759	9 113	\$7 290,24
			TOTAL	122 155	\$69.245,81

La Tabla 3.35 muestra el costo anual de producción.

Tabla 3.35 Costos anuales de producción

Designación del rubro	Valor	Costos Fijos	Costos variables Unitarios	Contribución porcentual
Materiales directos	\$21 600,00		\$0,18	11,07
Mano de obra directa	\$32 346,41	\$32 346,41		16,57
<u>Carga Fabril</u>				
Mano de obra indirecta	\$32 346,41	\$32 346,41		16,57
Materiales indirectos	\$69 245,81		\$0,57	35,48
<u>Depreciaciones</u>				
Construcciones	\$2 390,00	\$2 390,00		1,22
Maquinaria y Equipo	\$15 010,00	\$15 010,00		7,69
Muebles y equipos de oficina	\$261,00	\$261,00		0,13
Otros Activos	\$3.000,00	\$3.000,00		1,54
<u>Mantenimiento</u>				
Maquinaria y Equipo	\$750,50	\$750,50		0,38
Edificios	\$478,00	\$478,00		0,24
SUB-TOTAL COSTOS DE PRODUCCIÓN	\$177 428,13			
Imprevistos	\$17 742,81			9,09
TOTAL, COSTOS ANUALES DE PRODUCCIÓN	\$195 170,95	\$86 582,33	\$0,74	100,00

El precio de venta del carbón activado producido es de \$1,50 cada Kilogramo, lo que representa ventas anuales de \$ 180 000. Se estimó un horizonte de 10 años de operación para la planta. Con base en lo anterior se elaboró el flujo de fondos anuales para calcular los indicadores económicos: TIR y VAN. Los resultados presentan en la Tabla 3.36.

Tabla 3.36 Indicadores económicos obtenidos para la producción de carbón activado de cuesco de coco mediante activación física

Indicador	Valor
TIR	18 %
VAN	\$ 22 000,26

Según la Tabla 3.36 el proyecto puede considerarse rentable ya que se tiene mayor interés que el del mercado que es apenas del 10 %. Además cabe aclarar que el capital inicial con el que fueron calculados todos estos valores es de \$ 125 000.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- El cuesco de coco es un material de alta dureza (98 %), además se considera un buen material para la elaboración de carbón activado debido a su gran contenido de biomoléculas como: celulosa (30,96 %) y lignina (35,77 %)
- Otro factor que hace al cuesco de coco un gran material para la elaboración de carbón activado es su estructura, las fotografías en el MEB demostraron una estructura similar a la materia prima del carbón producido.
- La dureza del cuesco de coco es inversamente proporcional a la temperatura y tiempo de carbonización. En las pruebas de laboratorio el carbón producido a 400 °C y 1 h tuvo la mayor dureza, mientras que el carbón producido a la mayor temperatura (600 °C) y 2 h perdió mucho porcentaje de ésta.
- En la carbonización ya existe una presencia de poros, esto se traduce debido al aumento de densidad aparente en función de la temperatura y tiempo de pirolisis. El carbón a 600 °C y 2 h presenta la mayor densidad aparente. Sin embargo, la densidad real disminuye, por los agrietamientos de la biomasa.
- El porcentaje de carbón fijo es inversamente proporcional a la dureza, esto se debe primero a la formación de poros que se presenta en la pirolisis y a la volatilización de materiales que daban rigidez a la materia prima. En las pruebas de laboratorio el carbón producido a 2 h y 600 °C obtuvo la menor dureza, pero el mayor porcentaje de carbón fijo.

- El rendimiento de la carbonización de cuesco de coco es muy bajo, se obtiene un promedio de 28,25 % y disminuye al aumento de temperatura.
- La atmósfera controlada en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera mejora la calidad del carbón producido, ya que disminuye la cantidad de ceniza, esto se debe al mejor control de la atmósfera reductora que sirve para pirolizar el cuesco de coco.
- La temperatura de carbonización (TC) y tiempo de pirolisis (tP) obtenidos en este trabajo fue de 500 °C y 30 min respectivamente, se tomaron estos valores debido a la mejor relación dureza-contenido de carbón fijo.
- El carbón activado que se produce a partir del cuesco de coco presenta propiedades adsorptivas muy satisfactorias, un índice de yodo de más de 1 000, sin embargo, el mayor problema que presenta esta materia prima es la pérdida drástica de dureza debido al gran agrietamiento producido por el vapor de agua y las altas temperaturas (850 y 950 °C).
- El diagrama de proceso obtenido consta de: trituración y clasificación de la materia prima, carbonización y activación física con vapor de agua, cianuración, enfriamiento y ensacado. Este esquema permite el ahorro de energía y costos debido al uso de un solo horno para los 2 procesos principales.
- El análisis económico realizado mostro la factibilidad económica de implementar una planta de obtención de carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua. Con una producción mensual de 10 t y un horizonte de 10 años de funcionamiento se determinó una rentabilidad del 18 % y valor actual neto de 22 000,26 USD.

4.2 RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de activación química para la producción de carbón activado de cuesco de coco, debido a la menor temperatura que se requiere para producirlo.
- Evaluar energéticamente las condiciones de operación del diseño del horno para un mejoramiento del rendimiento económico de la planta.
- Realizar estudios de activación física y química para la producción de carbón activado de cuesco de coco a menor tamaño de partícula.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdul-Khalil H., Siti-Alwani M., Mohd-Omar A., (2006). Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of malaysian plant waste fibers. *Bioresource*, 1(2), 220-232.
2. Abraham, A., y Mathew , P. (1963). Cytology of Coconut Endosperm. *Annals of Botany*, 27(107), 505-513.
3. Achaw, O. y Afrane, G. (2008). The evolution of the pore structure of coconut shells during the preparation of coconut shell-based active carbons. *Microporous and Mesoporous Materials*, 112, 284-290.
4. Argyropoulos, D., Menachem, S. (1998). *Biopolymers from Renewable Resources: Occurrence and Role of Lignin*. (1ª Ed). Berlin, Alemania: Ed. Springer.
5. Balci, S. (1992). *Kinetics of Activated Carbon Production from Almond Shell, Hazelnut Shell and Beech Wood and Characterization of Products*. (Tesis presentada como requisito para la obtención del Título de Ingeniero Químico), Middle East Technical University, Ankara, Turquía.
6. Bandosz, T. (2006). *Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation*. (1a. ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier.
7. Bastidas, M., Buelvas, L., Márquez, M. y Rodríguez, K. (2009). Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia. *Información Tecnológica*, 21(3), 87-96.
8. Biomass Energy Centre. (2011). What is Biomass? Recuperado de: http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=76,15049&_dad=portal (Abril, 2013).

9. Boateng, A. (2008). *Rotary Kilns*. (1a. ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier.
10. Bruzos, T. (2012). *Cocotero, Cocos nucifera L. Arecaceae*. Recuperado de: <http://www.sabelotodo.org/agricultura/palmas/cocotero.html> (febrero, 2013).
11. Bt Fuadi, N., Saadi Ibrahim, A., y Nor Ismail, K. (2012) Review study for activated carbon from palm shell used for treatment of waste water. *Journal of Purity, Utility Reaction and Environment*, 1(5), 222-236.
12. Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F. y Chambat, G. (2009). Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors, *Biosource Technology*, 100, 292-298.
13. Coral, J. (2011). Diseño de una herramienta computacional para el análisis del desempeño energético de reactores rotatorios para la producción de cemento. (Tesis presentada como requisito para la obtención del Título de Magíster en Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura), Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
14. Council for Mineral Technology. (1987). *Volatile content*. En Shipman, A. (Ed.). *Testing of activated carbons*, (pp.24-25). Johannesburgo, Sudáfrica: MINTEK.
15. De la Torre, E. Guevara, A. y Ríos, C. (2005). La tostación como pretratamiento de minerales auríferos refractarios: *Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados*. (pp. 40-69). Trujillo, Perú: Escuela Politécnica Nacional.
16. De la Torre, E. y Guevara, A. (2005). Recuperación de oro de soluciones cianuradas mediante carbón activado: *Recuperación de oro a partir de*

minerales refractarios polisulfurados. (pp. 104-118). Trujillo, Perú: Escuela Politécnica Nacional.

17. Evans, R. y Milne, T. (1987). Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. 1. Fundamentals. *Energy and Fuels an American Society Journal*, 1(2), 123-137.
18. Fadhil, A. y Deyab, M. (2008). Conversion of some fruits stones and shells into activated carbons. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(2A), 175-184.
19. Flores, M. (2010). *Desarrollo y caracterización de telas de carbón activado mediante activación química.* (Disertación previa a la obtención del título de Licenciado en Ciencias Químicas, especialidad Química Analítica), Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
20. Fogler, S., (2006). *Elements of Chemical Reaction Engineering.* (4ta. ed.). Westford, Estados Unidos: Prentice Hall PTR.
21. Goertzen, S., Thériault, K., Oickle, A., Tarasuk, A. y Andreas, H. (2010). Standardization of the Boehm titration. Part I. CO₂ expulsion and endpoint determination. *Carbon*, 48, 1 252-1 261.
22. Gomes, L. (2000). *Remoção do cádmio de soluções aquosas utilizando fibra de coco da baía visando o tratamento de efluentes.* (Tesis presentada como requisito para la obtención del Título de Doctor en metalurgia de minerales). Universidad Federal de Río de Janeiro, Río de Janeiro, Brasil.
23. Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S., (2008) *Pirolisis de Biomasa, Cuesco de palma de aceite*, Kessel Univesity Press, ISBN 978-3-89958-457-8. Recuperado de: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-457-8.volltext.frei.pdf> (marzo, 2013).

24. González, J., Román, S., González-García, C., Valente, J. y Ortiz, L. (2009) Porosity Development in Activated Carbons Prepared from Walnut Shells by Carbon Dioxide or Steam Activation, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48, 7 474-7 481.
25. Grassino, S. (2003). *Cellulose*. Recuperado de: <http://www.pslc.ws/spanish/cell.htm> (marzo, 2013).
26. Gupta, P. (2008). *Water vapor adsorption onto nanostructured carbide derived carbon (CDC)*. (Tesis presentada como requisito parcial para la obtención del doctorado en filosofía en materiales de ingeniería). Universidad de Illinois, Chicago, Estados Unidos. Recuperado de: http://books.google.com.my/books?id=zCA7yGE58SEC&dq=activated+carbon+surface+functional+groups&source=gbs_navlinks_s (febrero, 2013).
27. Haas, A. y Wilson, L. (1985). *Coconut Wood: Processing and Use*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. Roma, Italia: FAO.
28. Han, J. (1998). Properties of Nonwood Fibers. *TAPPI 1998 North American Nonwood Symposium*. (pp.1-11). Atlanta, Estados Unidos: USDA.
29. Hernández-Montoya, V., García-Servin, J. y Bueno-López, J., (2012) Thermal Treatments and Activation Procedures Used in the Preparation of Activated Carbon, *Lignocellulosic Precursors Used in the Synthesis of Activated Carbon-Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment*, Instituto de Aguas Calientes, México Recuperado de: http://cdn.intechopen.com/pdfs/30801/InTech-Thermal_treatments_and_activation_procedures_used_in_the_preparation_of_activated_carbons.pdf (marzo, 2013).

30. Hu, Z., Srinivasan, M. y Ni, Y. (2001). Novel activation process for preparing highly Microporous and Mesoporous activated carbons, *Carbon*, 39, 877-886.
31. Huang, Z., Zhang, J., Zhao, Y., Zhang, H., Yue, G., Suda, T. y Narukawa, M. (2010). Kinetic studies of char gasification by steam and CO₂ in the presence of H₂ and CO. *Fuel Processing Technology*, 91, 843-847.
32. Hurtado, R. y González, F. (2009). *Celulosa*. Recuperado de: <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso08-09/pls/celulosa.htm> (marzo, 2013).
33. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995a). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 991:94. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte1/1991.pdf> (enero, 2013).
34. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995b). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 233:95. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/1233.pdf> (Enero, 2013).
35. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995c). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 988:94. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/1988.pdf> (Enero, 2013).
36. Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2011). *Árboles o plantas permanentes dispersos: cocotero – fruta fresca*. Recuperado de <http://200.110.88.44/lcds-samples/testdrive-remoteobject/main.html#app=dbb7&9270-selectedIndex=1> (abril, 2013).
37. International Union of Pure and Applied Chemistry. (1985). Reporting physorption Data for gas/solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*.

- 57(4). 603-619. Recuperado de: <http://pac.iupac.org/publications/pac/pdf/1985/pdf/5704x0603.pdf> (marzo, 2013).
38. Ioannidou, O., y Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for Activated carbon production – A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11(1), 1 966-2 005.
39. Joseph, C., Bono, A., Krishnaiah, D., Yee Ling, C. y Chiew Ban, N. (2009). Morphology and Sorption kinetics Studies of L-type Activated carbons Prepared from oil palm Shells by $ZnCl_2$ and H_3PO_4 Activation, *Journal of Applied Sciences*, 9(17), 3 131-3 135.
40. Kunii, D. y Chisaki, T., (2008). *Rotary Reactor Engineering*. (1a. ed.). Tokio, Japón: Elsevier
41. Levenspiel, W., (1986). *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. (6ta. ed.). Barcelona, España: Reverté S. A.
42. Lewis, F. y Ablow, C., (1980). Thermodynamics of Pyrolysis and Activation in the Production of Waste-or Biomass Derived Activated Carbon. *Thermal Conversion of Solid Wastes and Biomass*, Chapter 23, 301-314.
43. Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S. y Xia, H. (2008). Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut Shell char and activated carbons derived from carbonized coconut Shell chars. *Industrial Crops and Products*, 28, 190-198.
44. Litz, R. (2005). *Biotechnology of Fruit and Nut Crops*. (1a. ed.). Miami, Estados Unidos: CABI Publishing.
45. López, R. (2004). *Caracterización de medios Porosos y Procesos Percolativos de Transporte*. (Tesis presentada como requisito para la obtención del Título de Doctor en Física del Departamento de Física),

Universidad Nacional San Luis, San Luis, Argentina. Recuperado de: <http://linux0.unsl.edu.ar/~rlopez/tesis.html> (marzo, 2013).

46. Luna, D., González, A., Gordon, M. y Martín, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. *ContactoS*, 64, 39-48. Recuperado de: http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n64ne/carbon_v2.pdf (marzo, 2013).
47. Mantilla, M. (1993) *Diseño de una planta para producción de carbón activado a partir de cuescos de maní árbol (inchi)*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
48. Marsh, H. y Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. (1a. ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier.
49. Mogollón, G., García, J. y León, W. (2008). *Panorama de la Industria de la Celulosa y el Papel en Iberoamérica 2008: (1ª Ed)*. Misiones: Red Iberoamericana de Docencia e Investigación en Celulosa y Papel-Riadicyp.
50. Muthulakshmi-Andal, N. y Sakthi, V. (2010). A comparative Study on the sorption Characteristics of Pb (II) and Hg (II) onto Activated Carbon. *E-Journal of Chemistry*. 7(3), 967-974.
51. Nachenius, R.W., Ronsse, F., Venderbosch, R.H. y Prins, W. (2013). Biomass Pyrolysis. *Advances in Chemical Engineering*, 42(1), 75-139.
52. Órfao, J. J. M., Antunes, F. J. A., y Figueireido, J. L. (1999) Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials – three independent reactions model, *Fuel*, 78(1), 349-358.

53. Otero, M. (1988). *Celulose e Papel. Vol. I: Tecnologia de fabricação da Pasta Celulósica: Composição Química dos Materiais Lignocelulósicos.* (1ª Ed). San Pablo, Brasil: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.
54. Parrota, J. (2000). *Palma de coco, coco, coconut palm.* Recuperado de: <http://www.fs.fed.us/global/iitf/Cocosnucifera.pdf> (febrero, 2013).
55. Prauchner, M. y Rodríguez-Reinoso, F. (2012). Chemical versus physical activation of coconut Shell: a comparative study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 152(1), 163-171.
56. Quek, A. y Balasubramanian, R. (2012). Mathematical modeling of rubber tire pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95, 1-13.
57. Rahman-Mohamed, A., Mohammadi, M. y Najafpour Darzi, G. (2010). Preparation of carbon molecular sieve from lignocellulosic biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1 591-1 599.
58. Raveendran, K., Ganesh, A. y Khilart, K. (1995). Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. *Fuel*, 74(12), 1 812-1 822.
59. Rosa, M., Santos, F., Montenegro, A., Abreu, F., Correia, D., Araújo, F. y Norões, E. (2001). Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola. *Comunicado Técnico Embrapa Agroindústria Tropical*. 54. 1-6. Recuperado de http://www.cnpat.embrapa.br/publica/pub/ComTec/cot_54.pdf (febrero, 2013).
60. Soto, F. (2007). *Evaluación Técnico Económica de una Planta de Carbón Activado.* (Proyecto de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil Industrial). Universidad de Chile, Santiago, Chile.

61. Sullivan, J., Charles, M. y Oliver, R. (1927). Passage of solid particles through rotary cylindrical kilns. En *Bureau of Mines*. (pp. 1-42). Washington, Estados Unidos: Department of Commerce. Recuperado de: <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc66410/m1/1/?q=1.77> (junio, 2013).
62. Technical Association of the pulp and paper Industry. (1970a). *TAPPI Testing Procedures: Moisture in pulp, paper and paperboard*, Test Method T-412-M(6). Chicago, Estados Unidos.
63. Technical Association of the pulp and paper Industry. (1970b). *TAPPI Testing Procedures: Alcohol-Benzene Solubility of Wood*, Test Method T-6-os-59. Chicago, Estados Unidos.
64. Technical Association of the pulp and paper Industry. (1970c). *TAPPI Testing Procedures: Cellulose in Wood*, Test Method T-17-M-55. Chicago, Estados Unidos.
65. Technical Association of the pulp and paper Industry. (1970d). *TAPPI Testing Procedures: Lignin in Wood*, Test Method T-13-os-54. Chicago, Estados Unidos.
66. Tomlinson, B., Horn, J. y Fisher, J. (2011). *The Anatomy of Palms*. (1a. ed.). Nueva York, Estados Unidos: Oxford.
67. Tsamba, A., Yang, W. y Blasiak, W. (2006). Pyrolysis characteristics and global kinetics of coconut and cashew nut shells. *Fuel Processing Technology*, 87(1). 523-530.
68. Vamvuka, D., Kakaras, E., Kastanaki, E. y Grammelis, P. (2003). Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite. *Fuel*. 82(1), 1 949-1 960.

69. Várhegyi, G., Antal Jr., M. J., Jakab, E. y Szabó, P. (1997). Kinetic modeling of biomass pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied pyrolysis*, 42(1), 73-87.
70. Wan Nik, W. B., Rahman, M. M., Yusof, A. M., Ani, F. N. y Che Adnan, C. M. (2006). Production of activated carbon from palm oil shell waste and its adsorption characteristics. *En 1st International Conference on Natural Resources Engineering & Technology* (pp. 646-654), Putrajaya, Malaysia. Recuperado de: http://eprints.utm.my/169/1/WBWan2006_Productionofactivatedcarbonfrom.pdf (febrero, 2013).
71. Warnijati, S., Agra, I., y Sudjono. (1996). Pyrolysis of coconut shells in a three concentric tubes reactor. *WREC* 1996, 934-937.
72. Wei, S., Li., Z. y Yaping, Z. (2006). Preparation of Microporous Activated Carbon from Raw coconut by two-step Procedure. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 14(2), 266-269.
73. White, J., Catallo, W. y Legendre, B. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91, 1-33.
74. Yahşi, N., (2004). *Production and Characterization of Activated Carbon from Apricot Stones*. (Tesis presentada como requisito para la obtención del Título de Máster en Ciencias del Departamento de Ingeniería Química), Middle East Technical University, Ankara, Turquía.
75. Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H. y Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*. 86(12), 1 781-1 788.
76. Yusufu, M., Ariaahu, C. y Igbabul, B. (2012). Production and Characterization of activated carbon from selected local raw materials. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 6(9), 123-131.

ANEXOS

ANEXO I

MUESTREO DE LAS CONCHAS DE COCO

Objetivo: Determinar las principales dimensiones de una muestra significativa de conchas de coco.

En la Figura Al.1 se muestran las dimensiones de la concha de coco y en la Tabla Al.1 se presentan los resultados.

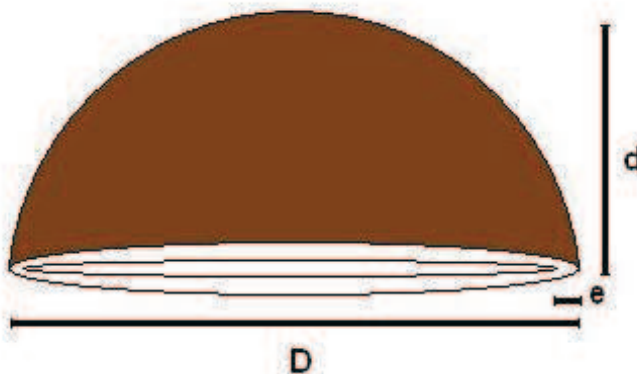


Figura Al.1 Dimensiones de la concha de coco tomadas en el muestreo

Tabla Al.1 Dimensiones de la concha de coco tomadas en el muestreo

M	Peso (g)	D (cm)	d (cm)	e (cm)	M	Peso (g)	D (cm)	d (cm)	e (cm)	M	Peso (g)	D (cm)	d (cm)	e (cm)
1	129,4	11,9	7,0	0,2	11	107,0	11,8	4,4	0,2	21	127,0	12,0	6,4	0,1
2	64,8	11,4	5,4	0,1	12	111,6	10,6	5,6	0,2	22	96,5	12,0	4,2	0,2
3	69,1	11,8	4,0	0,1	13	116,9	11,8	6,2	0,3	23	62,4	11,4	4,2	0,1
4	107,1	13,6	5,4	0,1	14	133,1	12,6	5,2	0,3	24	92,7	12,4	5,4	0,1
5	61,1	12,0	3,8	0,2	15	133,1	11,6	6,2	0,3	25	99,2	11,8	4,6	0,1
6	62,2	11,0	5,0	0,2	16	117,8	11,2	4,8	0,2	26	113,8	11,6	6,0	0,2
7	133,0	13,0	6,6	0,3	17	121,6	12,6	5,4	0,1	27	125,8	10,8	6,8	0,2
8	62,9	10,8	5,2	0,2	18	108,8	11,4	4,4	0,1	28	76,1	12,0	5,8	0,1
9	54,1	4,0	4,0	0,1	19	120,9	12,2	5,8	0,1	29	100,5	12,6	6,6	0,1
10	106,7	12,4	5,0	0,1	20	76,0	10,2	4,2	0,2	30	121,1	11,6	5,6	0,1

ANEXO II
DETERMINACIÓN DEL d_{80} PARA LA MATERIA PRIMA MOLIDA
EN LA TRITURADORA DE MANDÍBULAS

Tabla AII.1 Ensayo granulométrico del cuesco de coco triturado

Malla #	Abertura tamiz (μm)	log dp	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
3/8 in	9 500	3,98	5,2	1,74	1,74	98,26
3	6 730	3,83	24,2	8,08	9,82	90,18
4	4 760	3,68	34,9	11,65	21,47	78,53
6	3 360	3,53	64,5	21,54	43,01	56,99
8	2 380	3,38	92,7	30,95	73,96	26,04
10	1 650	3,22	60,1	20,07	94,02	5,98
14	1 400	3,15	16,1	5,38	99,40	0,60
retenido	-1 400		1,8	0,60	100,00	0,00
TOTAL			299,5	100,00		

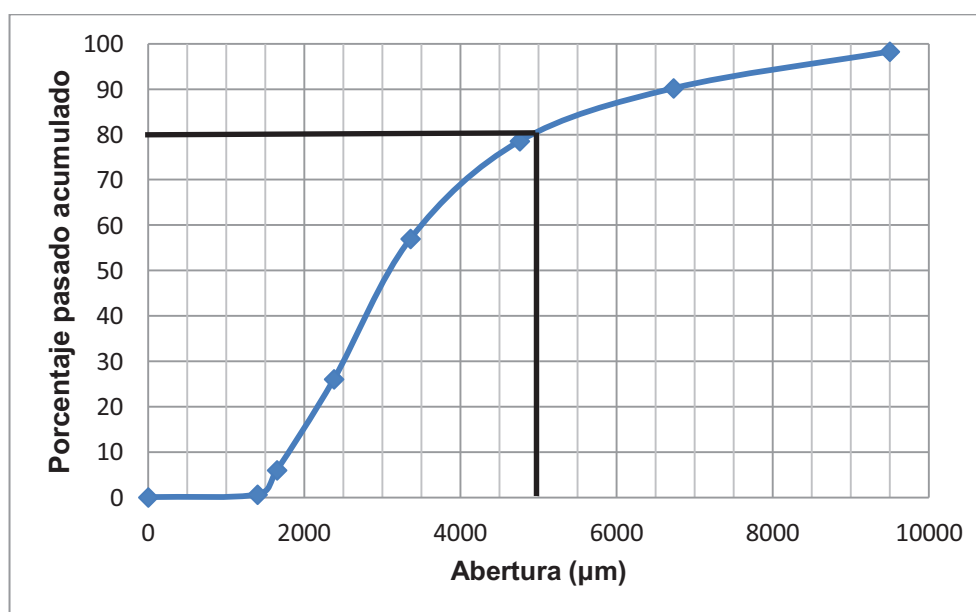


Figura AII.1 Curva granulométrica para procesadores plásticos molidos

Con base en la curva granulométrica se determinó que el d_{80} de la muestra analizada fue de 5 000 μm .

ANEXO III

FICHAS TÉCNICAS CONTENIDO DE VOLÁTILES CENIZAS Y CARBÓN FIJO

Ficha Técnica N° 1

Muestra: Conchas de coco

Ensayo No: 1

Objetivo: Determinar el contenido de volátiles cenizas y carbón fijo de la materia prima

Tabla AIII.1 Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo de la materia prima

crisol (g)	Crisol + tapa (g)	Muestra (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	carbón fijo (%)
19,9913	28,9220	1,0048	29,1379	19,9991	78,51	0,78	20,71

Donde:

M₁: peso del crisol con tapa una vez que se carbonizó a 950 °C durante 7 min

M₂: peso del crisol sin tapa una vez que se carbonizó a 950 °C durante 2 h

Ejemplo de cálculo

$$Vola(\%) = \frac{Muestra - (M_1 - P_{Crisol + tapa})}{Muestra} \times 100 \quad [AIII.1]$$

$$Vola(\%) = \frac{1,0048 - (29,1379 - 28,9220)}{1,0048} \times 100 = 78,51$$

$$Cen(\%) = \frac{(M_2 - P_{Crisol})}{Muestra} \times 100 \quad [AIII.2]$$

$$Cen(\%) = \frac{(19,9991 - 19,9913)}{1,0048} \times 100 = 0,78$$

$$C_f(\%) = 100 - Vola(\%) - Cen(\%) \quad [AIII.3]$$

$$C_f(\%) = 100 - 78,51 - 0,78 = 20,71$$

Ficha Técnica N° 2

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar el contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a escala de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

Tabla AIII.2 Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	crisol (g)	Crisol + tapa (g)	Muestra (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	carbón fijo (%)
400	60	19,9953	28,9268	1,0039	29,6420	20,1370	28,76	14,11	57,13
	90	20,0054	28,9364	0,9939	29,6475	20,1458	28,45	14,13	57,42
	120	20,0084	28,9395	1,0037	29,6677	20,1502	27,45	14,13	58,42
500	60	20,0189	28,9503	1,0065	29,7557	20,1383	19,98	11,86	68,16
	90	20,0272	28,9590	1,0096	29,7698	20,1370	19,69	10,88	69,43
	120	20,0334	28,9660	1,0027	29,7786	20,1424	18,96	10,87	70,17
600	60	20,0428	28,9755	1,0046	29,8304	20,1112	14,90	6,81	78,29
	90	20,0540	28,9875	1,0031	29,8415	20,1130	14,86	5,88	79,25
	120	20,0728	29,0072	1,0018	29,8647	20,1229	14,40	5,00	80,59

Ficha Técnica N° 3

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a diferentes temperaturas y tiempos a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera

Ensayo No: 3

Objetivo: Determinar el contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos en el horno piloto.

Tabla AIII.3 Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos

Temperatura (°C)	crisol (g)	Crisol + tapa (g)	Muestra (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	carbón fijo (%)
364	20,0663	29,0009	1,0000	29,3330	20,0751	66,79	0,88	32,33
447	20,0839	29,0186	1,0090	29,6988	20,1826	32,59	9,78	57,63
496	20,0738	29,0083	0,9812	29,7633	20,1693	23,05	9,73	67,21
546	20,0681	29,0029	1,0004	29,8655	20,1521	13,77	8,40	77,83
576	20,0689	29,0031	0,9919	29,8717	20,1307	12,43	6,23	81,34

Ficha Técnica N° 4

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a 500 y 600 °C y diferentes tiempos a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera.

Ensayo No: 4

Objetivo: Determinar el contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 500 y 600 °C y diferentes tiempos en el horno piloto Nichols.

Tabla AIII.4 Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 500 °C y diferentes tiempos en el horno Nichols

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	crisol (g)	Crisol + tapa (g)	Muestra (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	carbón fijo (%)
500	10	19,8239	31,4887	1,0062	32,1871	19,8788	30,59	5,46	63,95
	20	25,2497	37,9505	1,0032	38,6821	25,3042	27,07	5,43	67,49
	36	20,0697	29,0046	0,9986	29,7726	20,1241	23,09	5,45	71,46
	57	25,2645	37,9649	1,0022	38,7399	25,3186	22,67	5,40	71,93
	60	19,8379	31,5026	1,0005	32,2750	19,8925	22,80	5,46	71,74
	82	20,0742	29,0093	1,0010	29,7935	20,1286	21,66	5,43	72,91
	98	19,8582	31,5229	1,0033	32,3089	19,9080	21,66	4,96	73,38
	100	25,2884	37,9898	1,0000	38,7780	25,3372	21,18	4,88	73,94
	120	20,1134	29,0490	0,9994	29,8416	20,1613	20,69	4,79	74,51
600	18	19,8924	30,0874	1,0002	30,9274	19,9467	16,02	5,43	78,55
	40	20,0888	29,0099	0,9996	29,8533	20,1390	15,63	5,02	79,35
	64	25,3075	38,0098	0,9989	38,8580	25,3569	15,09	4,95	79,97
	82	20,2242	30,0016	1,0012	30,8541	20,2735	14,85	4,92	80,22
	101	25,3065	38,0082	0,9949	38,8574	25,3547	14,64	4,84	80,51
	162	20,2222	29,1591	1,0045	30,0174	20,2671	14,55	4,47	80,98
	180	19,8823	30,0677	1,0015	30,9235	19,9260	14,55	4,36	81,09

Ficha Técnica N° 5

Muestra: Carbón activado producido de cuesco de coco a 850 y 950 °C a diferentes tiempos a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera.

Ensayo No: 5

Objetivo: Determinar el contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a una temperatura constante de 850 y 950 °C a diferentes tiempos.

Tabla AIII.5 Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del cuesco de coco carbonizado a 600 °C y diferentes tiempos en el horno Nichols

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	crisol (g)	Crisol + tapa (g)	Muestra (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	carbón fijo (%)
	0	25,3152	35,5011	1,0030	36,2502	25,3348	25,31	1,95	72,73
850	30	19,9348	32,5392	1,0036	33,4116	19,9654	13,07	3,05	83,88
	60	21,2781	33,3279	0,9979	34,2017	21,3090	12,44	3,10	84,47
	90	19,9573	32,6621	1,0033	33,5438	19,9880	12,12	3,06	84,82
	120	21,2898	33,3398	1,0095	34,2352	21,3208	11,30	3,07	85,63
	150	25,3327	35,5187	1,0068	36,4132	25,3636	11,15	3,07	85,78
950	30	19,9746	32,6769	1,0038	33,5988	20,0050	8,16	3,03	88,81
	60	25,3406	35,5268	1,0044	36,4500	25,3710	8,08	3,03	88,89
	90	21,2960	33,3461	0,9973	34,2790	21,3260	6,46	3,01	90,53
	120	20,0189	28,9503	1,0095	29,8995	20,0499	5,97	3,07	90,96
	150	20,0540	28,9875	0,9984	29,9416	20,0850	4,44	3,10	92,46

ANEXO IV
FICHAS TÉCNICAS DE DENSIDAD REAL, DENSIDAD APARENTE
Y DUREZA

Ficha Técnica N° 1

Muestra: Conchas de coco

Ensayo No: 1

Objetivo: Determinar la densidad real, densidad aparente y dureza de la materia prima

Tabla AIV.1 Ensayo de determinación de la densidad real de la materia prima

Muestra	Peso muestra (g)	Peso muestra + agua (g)	Peso agua (g)	Densidad (g/cm ³)
Materia Prima	1,0069	25,5170	25,0127	2,0034

Tabla AIV.2 Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza de la materia prima

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm ³)*
Materia Prima	58,25	57,06	97,957	0,5825

* Volumen = 100 cm³

Ejemplo de cálculo

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{W_{pic+H_2O} - W_{pic+H_2O+m}}{W_m}} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad [AIV.1]$$

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{25,0127 - 25,5170}{1,0069}} = 2,0034 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Ficha Técnica N° 2

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar la densidad real del cuesco de coco carbonizado a escala de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

Tabla AIV.3 Ensayo de determinación de la densidad real del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm ³)*
400	60	1,0027	25,1217	24,9396	1,2219
	90	1,0170	25,0644	24,867	1,2408
	120	0,9941	25,0719	24,8736	1,2492
500	60	0,9970	25,1432	24,9855	1,1879
	90	0,9953	25,1180	24,9552	1,1956
	120	0,9934	25,1541	24,9904	1,1973
600	60	0,9945	25,0531	24,9221	1,1517
	90	1,0019	25,1008	24,9543	1,1713
	120	0,9967	25,1125	24,9653	1,1733

* Volumen = 100 cm³

Ficha Técnica N° 3

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 3

Objetivo: Determinar la dureza en porcentaje y densidad aparente del cuesco de coco carbonizado a escala de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

Tabla AIV.4 Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza del cuesco de coco carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm ³)*
400	60	48,62	46,98	96,627	0,4862
	90	48,75	46,82	96,041	0,4875
	120	48,98	46,55	95,039	0,4898
500	60	49,55	47,04	94,934	0,4955
	90	51,37	48,54	94,491	0,5137
	120	52,4	49,38	94,237	0,5240
600	60	51,17	48,22	94,235	0,5117
	90	52,21	49,06	93,967	0,5221
	120	53,04	49,73	93,759	0,5304

* Volumen = 100 cm³

Ficha Técnica N° 4

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a 500 y 600 °C y diferentes tiempos a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera.

Ensayo No: 4

Objetivo: Determinar la dureza en porcentaje y densidad aparente del cuesco de coco carbonizado a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a una temperatura constante de 500 y 600 °C y diferentes tiempos.

Tabla AIV.5 Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza del cuesco de coco carbonizado a 500 °C y diferentes tiempos en el horno Nichols

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm ³)*
500	10	46,63	44,36	95,132	0,4663
	20	48,01	45,62	95,022	0,4801
	36	47,98	45,57	94,977	0,4798
	57	47,95	45,48	94,849	0,4795
	60	48,25	45,74	94,798	0,4825
	82	50,43	47,71	94,606	0,5043
	98	51,28	48,37	94,325	0,5128
	100	51,32	48,37	94,252	0,5132
	120	52,04	48,88	93,928	0,5204
600	18	48,75	46,82	96,041	0,4875
	40	48,98	46,55	95,039	0,4898
	64	49,55	46,65	94,147	0,4955
	82	51,17	48,11	94,020	0,5117
	101	51,37	48,21	93,849	0,5137
	162	52,4	48,89	93,302	0,5240
	180	52,58	48,99	93,172	0,5258

* Volumen = 100 cm³

Ficha Técnica N° 5

Muestra: Carbón activado producido de cuesco de coco a 850 y 950 °C a diferentes tiempos a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera.

Ensayo No: 5

Objetivo: Determinar la dureza en porcentaje y densidad aparente del carbón activado de cuesco de coco mediante activación física con vapor de agua a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a una temperatura constante de 850 y 950 °C a diferentes tiempos.

Tabla AIV.6 Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza del carbón activado de cuesco de coco a 850 y 950 °C a diferentes tiempos en el horno Nichols

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm ³)*
	0	47,98	44,57	92,89	0,4798
850	30	44,88	40,34	89,88	0,4488
	60	45,12	39,09	86,64	0,4512
	90	45,35	34,05	75,08	0,4535
	120	45,62	32,4	71,02	0,4562
	150	45,83	32,27	70,41	0,4583
950	30	47,98	44,57	92,89	0,4798
	60	41,45	36,33	87,65	0,4145
	90	41,89	35,74	85,32	0,4189
	120	42,32	28,67	67,75	0,4232
	150	42,62	23,31	54,69	0,4262

* Volumen = 100 cm³

ANEXO V

FICHAS TÉCNICAS DE RENDIMIENTO

Ficha Técnica N° 1

Muestra: Carbón producido en el laboratorio de cuesco de coco a 400, 500 y 600 °C y diferentes tiempos

Ensayo No: 1

Objetivo: Determinar el rendimiento en lecho fijo del cuesco de coco carbonizado a nivel de laboratorio a 400, 500 y 600 °C y diferentes tiempos.

Tabla AV.1 Ensayo de determinación del rendimiento del cuesco de coco carbonizado a 400, 500 y 600 °C

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento (%)	Rendimiento Medio (%)
400	60	99,9	32,3	32,33	32,30
		99,8	32,2	32,26	
	90	100,0	32,6	32,60	32,12
		99,9	31,6	31,63	
	120	100,0	30,4	30,40	30,38
		100,1	30,4	30,37	
500	60	100,0	27,7	27,70	27,80
		100,0	27,9	27,90	
	90	100,0	26,6	26,60	27,12
		100,2	27,7	27,64	
	120	100,0	26,7	26,70	26,81
		99,9	26,9	26,93	
600	60	100,0	26,0	26,00	25,99
		100,1	26,0	25,97	
	90	100,1	25,6	25,57	25,59
		100,0	25,6	25,60	
	120	100,1	24,5	24,48	24,71
		99,8	24,9	24,95	

Ficha Técnica N° 2

Muestra: Carbón producido en el horno piloto Nichols a 500 °C y 30 min

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar el rendimiento en lecho fijo del cuesco de coco carbonizado a nivel piloto a 500 °C y 30 min.

Tabla AV.2 Rendimiento de la carbonización del cuesco de coco a 500 °C y 30 min para el cuesco de coco

Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento (%)
1 000,1	282,5	28,25

ANEXO VI
FICHAS TÉCNICAS DEL USO DEL HORNO NICHOLS
HERRESHOFF MONO SOLERA

Ficha Técnica N° 1

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a diferentes temperaturas

Ensayo No: 1

Objetivo: carbonizar el cuesco de coco a un perfil de temperatura de 400 a 600 °C en lecho agitado con una atmósfera reductora.

Tabla AVI.1 Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para determinar la temperatura de carbonización del cuesco de coco en un perfil de temperatura de 400 a 600 °C

Obs.	Temperatura (°C)	Tiempo	Tiempo (min)	ΔPa	ΔPg	λ	presión horno	Agitador	Presión alta de gas
				(mm H ₂ O)	(mm H ₂ O)		(mm H ₂ O)	RPM	PSIG
1	100	9:06	0	30	25	0,90	-0,5	4	83
2	364	10:58	112	25	25	0,81	-1,5	4	50
3	447	12:58	232	25	25	0,81	-1,5	4	38
4	496	14:20	314	25	25	0,81	-1	4	29
5	546	16:33	457	25	25	0,81	-0,5	4	20
6	576	17:40	514	25	25	0,81	-0,5	4	18
7	570	17:50	524	25	25	0,81	-0,5	4	18

Observaciones	
1	Carga 4 kg
2	Toma de muestra
3	Toma de muestra
4	Toma de muestra
5	Toma de muestra
6	Toma de muestra
7	Apagado del horno

Ficha Técnica N° 2

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a 500 °C y diferentes tiempos

Ensayo No: 2

Objetivo: carbonizar el cuesco de coco a 500 °C durante 2 horas en lecho agitado

Tabla AVI.2 Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para determinar el tiempo de carbonización de cuesco de coco para una temperatura constante de 500 °C

Obs.	Temperatura (°C)	Tiempo	Tiempo (min)	ΔPa	ΔPg	λ	presión horno	Agitador	Presión alta de gas
				(mm H ₂ O)	(mm H ₂ O)		(mm H ₂ O)	RPM	PSIG
1	86	7:40		40	25	1,05	-0,5	4	32
2	473	11:05		30	27	0,87	-0,5	4	60
3	541	12:21	0	25	20	0,90	-1,0	4	36
4	509	13:21	60	10	8	0,91	1,0	4	32
5	504	14:01	100	5	5	0,81	-1,0	4	30
6	517	15:20	179	5	5	0,81	-1,0	4	30
7	492	15:42	0	15	12	0,92	-1,0	4	28
8	498	15:52	10	10	8	0,91	-0,5	4	28
9	495	16:02	20	5	5	0,81	-0,5	4	27
10	517	16:18	36	5	5	0,81	-0,5	4	23
11	505	16:39	57	5	4	0,92	-0,5	4	23
12	505	17:04	82	5	4	0,92	-0,5	4	23
13	502	17:20	98	5	4	0,92	-0,5	4	22
14	516	17:40	118	5	4	0,92	-0,5	4	22

Observaciones	
1	Encendido
2	Cambio a atmósfera reductora
3	Se colocó 4 kg de la muestra
4	Toma de muestra
5	Toma de muestra
6	Descarga de peso muerto
7	Se colocó 4 kg de la muestra
8	Toma de muestra
9	Toma de muestra
10	Toma de muestra
11	Toma de muestra
12	Toma de muestra
13	Descarga de peso muerto
14	Apagado

Ficha Técnica N° 3

Muestra: Carbón producido de cuesco de coco a 600 °C y diferentes tiempos

Ensayo No: 3

Objetivo: carbonizar el cuesco de coco a 600 °C durante 3 horas en lecho agitado

Tabla AVI.3 Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para determinar el tiempo de carbonización de cuesco de coco para una temperatura constante de 600 °C

Obs.	Temperatura (°C)	Tiempo	Tiempo (min)	ΔPa	ΔPg	λ	presión horno	Agitador	Presión alta de gas
				(mm H ₂ O)	(mm H ₂ O)		(mm H ₂ O)	RPM	PSIG
1	134	8:32		35	20	1,09	-0,5	4	32
2	550	11:30		30	25	0,90	-0,5	4	18
3	613	12:25	0	30	25	0,90	-1,5	4	5
4	607	12:43	18	20	20	0,81	-1,5	4	2
5	613	13:05	40	25	20	0,81	-1,5	4	2
6	601	13:29	64	25	20	0,81	-1,5	4	2
7	598	13:47	82	10	10	0,81	-1,5	4	2
8	595	14:06	101	10	10	0,81	-1,0	4	2
9	598	15:07	162	10	10	0,81	-1,0	4	1
10	598	15:25	180	10	10	0,81	-1,0	4	1

Observaciones	
1	Encendido
2	Cambio a atmósfera reductora
3	Se colocó 4 kg de la muestra
4	Toma de muestra
5	Toma de muestra
6	Toma de muestra
7	Toma de muestra
8	Toma de muestra
9	Toma de muestra
10	Apagado y descarga de muestra

Ficha Técnica N° 4

Muestra: cuesco de coco carbonizado a 500 °C durante 30 min

Ensayo No: 4

Objetivo: Activar el carbón de cuesco de coco a 950 °C durante 150 min con un flujo de vapor de agua constante

Tabla AVI.4 Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para activar el carbón de cuesco de coco a 950 °C con un flujo constante de vapor de agua de 40 kg/h

Obs.	Temperatura (°C)	Tiempo	Tiempo (min)	ΔPa	ΔPg	λ	presión horno	Agitador	Presión alta de gas
				(mm H ₂ O)	(mm H ₂ O)		(mm H ₂ O)	RPM	PSIG
1	882	14:30	0	30	25	0,90	-2	4	14
2	910	15:00	30	30	25	0,90	-3	4	11
3	944	15:15	45	30	25	0,90	-3	4	9
4	947	15:30	60	30	25	0,90	-3	4	5
5	945	15:45	75	30	25	0,90	-3	4	4
6	948	16:00	90	30	25	0,90	-3	4	60
7	942	16:30	120	30	25	0,90	-2,5	4	52
8	900	17:00	150	30	25	0,90	-2,5	4	48

Observaciones	
1	Carga 5 kg de carbón
2	Toma de Muestra
3	Control de temperatura
4	Toma de Muestra
5	Control de temperatura
6	Toma de Muestra
7	Toma de Muestra
8	Toma de Muestra

Ficha Técnica N° 5

Muestra: cuesco de coco carbonizado a 500 °C durante 30 min

Ensayo No: 5

Objetivo: Activar el carbón de cuesco de coco a 850 °C durante 150 min con un flujo de vapor de agua constante

Tabla AVI.5 Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para activar el carbón de cuesco de coco a 950 °C con un flujo constante de vapor de agua de 40 kg/h

Obs.	Temperatura (°C)	Tiempo	Tiempo (min)	ΔPa	ΔPg	λ	presión horno	Agitador	Presión alta de gas
				(mm H ₂ O)	(mm H ₂ O)		(mm H ₂ O)	RPM	PSIG
1	875	17:30	0	20	15	0,94	-2,5	4	33
2	902	17:46	16	15	12	0,92	-2,5	4	30
3	861	18:01	31	15	12	0,92	-2,5	4	29
4	858	18:15	45	15	12	0,92	-2,5	4	29
5	830	18:30	60	20	15	0,94	-2,5	4	27
6	855	18:45	75	20	15	0,94	-2,5	4	25
7	857	19:00	90	20	15	0,94	-2,5	4	22
8	850	19:15	105	20	15	0,94	-2,5	4	21
9	852	19:30	120	20	15	0,94	-2,5	4	20
10	846	19:45	135	20	15	0,94	-2,5	4	19
11	836	20:00	150	20	15	0,94	-2,5	4	15

Observaciones	
1	Carga 5 kg de carbón
2	Control de temperatura
3	Toma de Muestra
4	Control de temperatura
5	Toma de Muestra
6	Control de temperatura
7	Toma de Muestra
8	Control de temperatura
9	Toma de Muestra
10	Control de temperatura
11	Toma de Muestra y apagado

ANEXO VII

FICHAS TÉCNICAS DE DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO DEL CARBÓN ACTIVADO PRODUCIDO

Ficha Técnica N° 1

Muestra: Carbón activado pulverizado a 45 μm a 850 $^{\circ}\text{C}$

Ensayo No: 1

Objetivo: Determinar el índice de yodo del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a 850 $^{\circ}\text{C}$ durante 150 min.

Tabla AVII.1 Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a 850 $^{\circ}\text{C}$ mediante activación física con vapor de agua

Tiempo (min)	Carbón (g)	Gasto Na_2SO_3 (ml)	Gasto corregido (ml)	N° yodo
0	0,5	24	26,1	162
30	0,25	14,4	15,7	772
60	0,25	12	13,0	866
90	0,25	8,8	9,6	1009
120	0,25	7,2	7,8	1095
150	0,25	5,6	6,1	1193

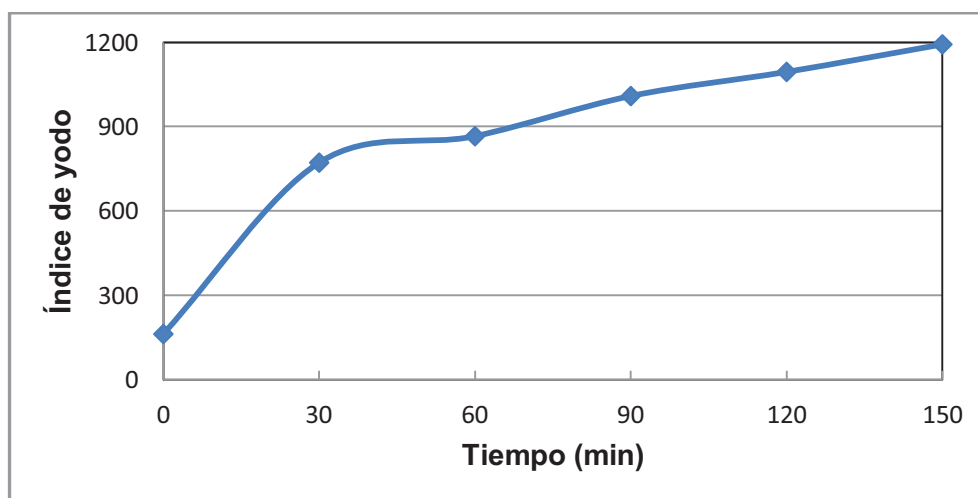


Figura AVII.1 Índice de yodo del carbón activado producido a 850 $^{\circ}\text{C}$ mediante activación física con vapor de agua en función del tiempo de activación

Ficha Técnica N° 2

Muestra: Carbón activado pulverizado a 45 μm a 950 $^{\circ}\text{C}$

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar el índice de yodo del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a 950 $^{\circ}\text{C}$ durante 150 min.

Tabla AVII.2 Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a 950 $^{\circ}\text{C}$ mediante activación física con vapor de agua

Tiempo (min)	Carbón (g)	Gasto Na_2SO_3 (ml)	Gasto corregido (ml)	N° yodo
0	0,5	18	5,88	162
30	0,25	13,6	16,6	740
60	0,25	9,6	12,5	886
90	0,25	5	8,8	1045
120	0,25	4	4,6	1297
150	0,25	18	3,7	1371

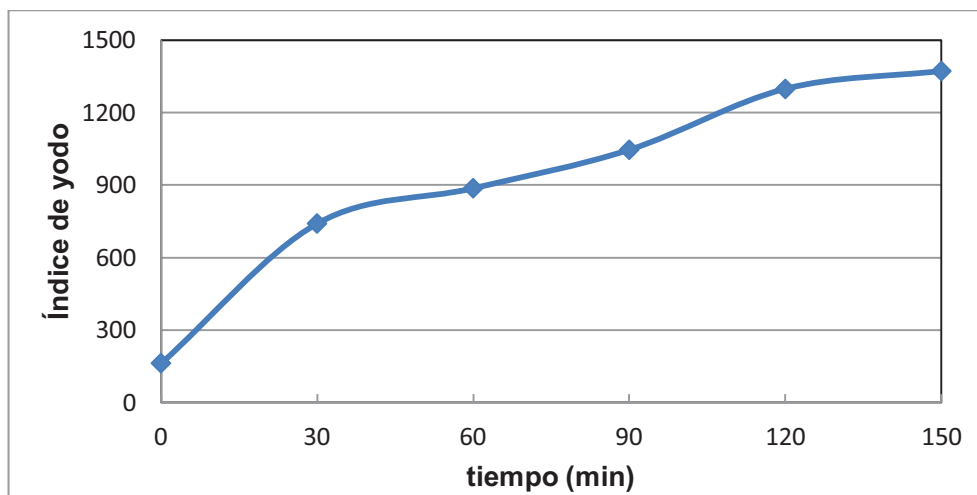


Figura AVII.2 Índice de yodo del carbón activado producido a 950 $^{\circ}\text{C}$ mediante activación física con vapor de agua en función del tiempo de activación

ANEXO VIII

CURVA DE CALIBRACIÓN DE LA ABSORBANCIA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE AZUL DE METILENO PARA CARBÓN ACTIVADO

A partir de los datos obtenidos de la Tabla AVIII.1 se realizó la curva de calibración mostrada en la Figura AVIII.1

Tabla AVIII.1 Determinación de la curva de calibración de la absorbancia para la determinación del índice de azul de metileno para carbón activado

Dilución	equivalentes de azul de metileno (g de azul de metileno/g de carbón activado)	Absorbancia
1:600	25 g/100 g	0,07
1:300	20 g/100 g	0,12
1:150	10 g/100 g	0,3
1:120	5 g/100 g	0,35

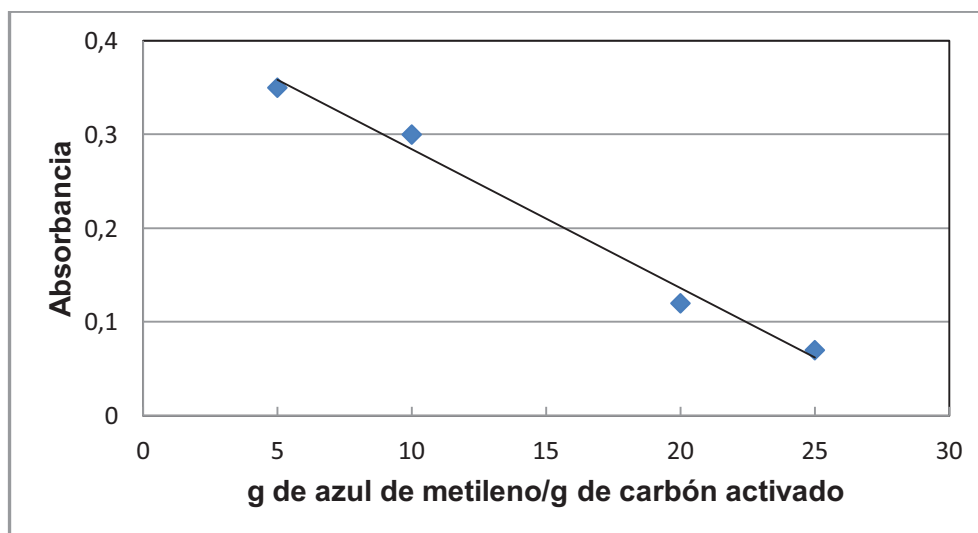


Figura AVIII.1 Curva de calibración de la absorbancia para la determinación del índice de azul de metileno para carbón activado

ANEXO IX
FICHAS TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN
ACTIVADO PRODUCIDO

Ficha Técnica N° 1

Muestra: Carbón activado pulverizado a 45 μm a 850 y 950 $^{\circ}\text{C}$

Ensayo No: 1

Objetivo: Determinar el índice de decoloración de azúcar del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a 850 y 950 $^{\circ}\text{C}$ durante 150 min y compararlo con el carbón precursor.

Tabla AIX.1 Determinación del índice de decoloración de azúcar del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols

Absorbancia	$\lambda = 430 \text{ nm}$	$\lambda = 710 \text{ nm}$	UBR
Blanco	0,20	0,15	199,7
Precursor	0,20	0,80	198,4
GSR-20	0,15	0,70	148,6
A 850 $^{\circ}\text{C}$	0,15	0,80	148,4
A 950 $^{\circ}\text{C}$	0,14	0,28	139,4

Ficha Técnica N° 2

Titulación Boehm

Muestra: Carbón activado pulverizado a 45 μm a 850 y 950 $^{\circ}\text{C}$

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar los grupos oxigenados presentes en el carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a 850 y 950 $^{\circ}\text{C}$ durante 150 min por medio de una titulación Boehm.

Tabla AIX.2 Titulación Boehm para determinar los grupos funcionales del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols

	V NaOH (ml)	V Na_2CO_3 (ml)	V NaHCO_3 (ml)	η NaOH ($\mu\text{m}/\text{g}$ CA)	η Na_2CO_3 ($\mu\text{m}/\text{g}$ CA)	η NaHCO_3 ($\mu\text{m}/\text{g}$ CA)	η carboxílicos ($\mu\text{m}/\text{g}$ CA)	η lactónicos ($\mu\text{m}/\text{g}$ CA)	η fenólicos ($\mu\text{m}/\text{g}$ CA)
Blanco	2	4,4	4,9	0	0	0	0	0	0
850 $^{\circ}\text{C}$	1,1	4,2	4,5	450	200	200	200	0	50
950 $^{\circ}\text{C}$	1,3	4,2	4,8	350	200	50	50	150	100

ANEXO X

DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE CARBONIZACIÓN Y ACTIVACIÓN

Cinética de Carbonización

Tabla AX.1 Datos obtenidos para la elaboración de la curva TGA del cuesco de coco

t (s)	T (°C)	T (K)	w mg	Dx/DT mg/min	t (s)	T (°C)	T (K)	w mg	Dx/DT mg/min
62	22,7	295,7	21,8		2612	450	723	7,33	-0,1521
222	50	323	21,8	-0,18	2763	475	748	6,8	-0,1021
374	75	348	21,2	-0,3555	2911	500	773	6,12	-0,0888
523	100	373	20,18	-0,2332	3062	525	798	6,06	-0,0755
673	125	398	20,02	-0,0289	3212	550	823	6,02	-0,0389
822	150	423	20	0,0208	3360	575	848	5,98	-0,0323
971	175	448	19,98	0,0133	3510	600	873	5,86	-0,0139
1121	200	473	19,96	-0,0467	3658	625	898	5,75	0,005
1271	225	498	19,9	-0,0835	3808	650	923	5,63	0,0289
1419	250	523	19,75	-0,2121	3957	675	948	5,55	-0,0334
1565	275	548	18,25	-0,8232	4107	700	973	5,5	0,0115
1713	300	573	17,56	-1,131	4256	725	998	5,38	0,0027
1863	325	598	14,65	-0,8324	4405	750	1023	5,36	-0,0089
2013	350	623	11,12	-1,5283	4554	775	1048	5,34	-0,0189
2162	375	648	8,02	-0,5824	4704	800	1073	5,34	-0,0345
2312	400	673	7,72	-0,2004	4853	825	1098	5,3	0,0456
2462	425	698	7,15	-0,1644	5002	850	1123	5,3	

Con los datos de la Tabla AIX.1 se elaboró la Tabla AIX.3 donde se encuentran los datos con los que se realizaron las Figuras 3.17 y 3.18. Para el cálculo de α se utilizó la Ecuación 1.22 mientras que las variaciones fueron calculadas entre 2 datos consecutivos. La Tabla AIX.2 muestra las condiciones iniciales.

Tabla AX.2 Datos obtenidos para la elaboración de la curva TGA del cuesco de coco

	Valor	Unidades
w_0	22	mg
w_f	5,3	mg
β	10	°c/min

Tabla AX.3 Datos calculados para la obtención de la pirolisis de carbonización del cuesco de coco

$1/T$ (1/K)	α	$d\alpha$	dT (K)	da/dT (1/K)	$1 - \alpha$	$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ $(1 - \alpha)$	$(1 - \alpha)^2$	$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ $(1 - \alpha)^2$
-0,0034	0,0120	0,0000	27,3	0,0000	0,9880	#N/A*	0,9762	#N/A
-0,0031	0,0120	0,0359	25,0	0,0014	0,9880	-6,5331	0,9762	-6,5210
-0,0029	0,0479	0,0611	25,0	0,0024	0,9521	-5,9654	0,9065	-5,9163
-0,0027	0,1090	0,0096	25,0	0,0004	0,8910	-7,7515	0,7939	-7,6361
-0,0025	0,1186	0,0012	25,0	0,0000	0,8814	-9,8201	0,7769	-9,6939
-0,0024	0,1198	0,0012	25,0	0,0000	0,8802	-9,8187	0,7748	-9,6912
-0,0022	0,1210	0,0012	25,0	0,0000	0,8790	-9,8174	0,7727	-9,6885
-0,0021	0,1222	0,0036	25,0	0,0001	0,8778	-8,7174	0,7706	-8,5871
-0,0020	0,1257	0,0090	25,0	0,0004	0,8743	-7,7970	0,7643	-7,6626
-0,0019	0,1347	0,0898	25,0	0,0036	0,8653	-5,4841	0,7487	-5,3394
-0,0018	0,2246	0,0413	25,0	0,0017	0,7754	-6,1510	0,6013	-5,8967
-0,0017	0,2659	0,1743	25,0	0,0070	0,7341	-4,6571	0,5389	-4,3480
-0,0017	0,4401	0,2114	25,0	0,0085	0,5599	-4,1930	0,3135	-3,6129
-0,0016	0,6515	0,1856	25,0	0,0074	0,3485	-3,8488	0,1215	-2,7947
-0,0015	0,8371	0,0180	25,0	0,0007	0,1629	-5,4235	0,0265	-3,6087
-0,0015	0,8551	0,0341	25,0	0,0014	0,1449	-4,6648	0,0210	-2,7331
-0,0014	0,8892	-0,0108	25,0	-0,0004	0,1108	#N/A	0,0123	#N/A
-0,0014	0,8784	0,0317	25,0	0,0013	0,1216	-4,5618	0,0148	-2,4544
-0,0013	0,9102	0,0407	25,0	0,0016	0,0898	-4,0100	0,0081	-1,6001
-0,0013	0,9509	0,0036	25,0	0,0001	0,0491	-5,8338	0,0024	-2,8200
-0,0013	0,9545	0,0024	25,0	0,0001	0,0455	-6,1633	0,0021	-3,0735
-0,0012	0,9569	0,0024	25,0	0,0001	0,0431	-6,1092	0,0019	-2,9653
-0,0012	0,9593	0,0072	25,0	0,0003	0,0407	-4,9535	0,0017	-1,7524
-0,0011	0,9665	0,0066	25,0	0,0003	0,0335	-4,8463	0,0011	-1,4511
-0,0011	0,9731	0,0072	25,0	0,0003	0,0269	-4,5406	0,0007	-0,9267
-0,0011	0,9802	0,0048	25,0	0,0002	0,0198	-4,6359	0,0004	-0,7119
-0,0011	0,9850	0,0030	25,0	0,0001	0,0150	-4,8283	0,0002	-0,6266
-0,0010	0,9880	0,0072	25,0	0,0003	0,0120	-3,7297	0,0001	0,6951
-0,0010	0,9952	0,0012	25,0	0,0000	0,0048	-4,6052	0,0000	0,7360
-0,0010	0,9964	0,0012	25,0	0,0000	0,0036	-4,3175	0,0000	1,3113
-0,0010	0,9976	0,0000	25,0	0,0000	0,0024	#N/A	0,0000	#N/A
-0,0009	0,9976	0,0024	25,0	0,0001	0,0024	-3,2189	0,0000	2,8154
-0,0009	1,0000	-1,0000	25,0	-0,0400	0,0000	#N/A	0,0000	#N/A

* #N/A = error de cálculo, no se tomó en cuenta el dato

Cinética de Activación

Tabla AX.4 Datos obtenidos para la determinación de la constante cinética de activación a 850 y 950 °C

T (°C)	t (s)	carbón fijo (%)	α	$d\alpha$	dt	$d\alpha/dt$	$1-\alpha$
850	0	72,73	0,0000	0,8545	1800	4,7469E-04	1,0000
	1800	83,88	0,8545	0,0452	1800	2,5099E-05	0,1455
	3600	84,47	0,8996	0,0270	1800	1,5021E-05	0,1004
	5400	84,82	0,9267	0,0618	1800	3,4345E-05	0,0733
	7200	85,63	0,9885	0,0115	1800	6,3954E-06	0,0115
	9000	85,78	1,0000				
950	0	72,73	0,0000	0,8152	1800	4,5289E-04	1,0000
	1800	88,81	0,8152	0,0039	1800	2,1510E-06	0,1848
	3600	88,89	0,8191	0,0834	1800	4,6344E-05	0,1809
	5400	90,53	0,9025	0,0214	1800	1,1870E-05	0,0975
	7200	90,96	0,9239	0,0761	1800	4,2302E-05	0,0761
	9000	92,46	1,0000				

ANEXO XI

DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

Dimensionamiento del horno rotatorio

1. Ángulo de reposo del cuesco de coco

Muestra: cuesco de coco

Ensayo No: 1

Objetivo: Determinar el ángulo de reposo del cuesco de coco.

La Tabla AX.1 muestra los datos obtenidos para la determinación del ángulo de reposo cuesco de coco. A partir de la Tabla AX.1 se construyó la Figura AX.1 en donde se señala el ángulo de reposo.

Tabla AXI.1 Datos obtenidos para la determinación del ángulo de reposo del cuesco de coco

Muestra	Altura (cm)	Largo (cm)	Ángulo de reposo (°)
Cuesco de coco	5,5	8,2	33,85

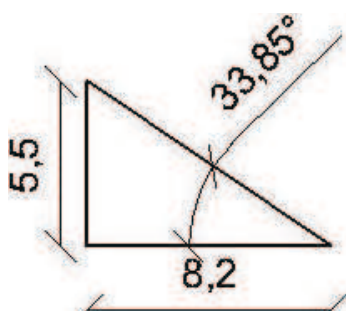


Figura AXI.1 Datos obtenidos para la determinación del ángulo de reposo del cuesco de coco

2. Cálculo de la Longitud y Diámetro interno del horno giratorio

$$t = 1,77 \frac{L \times F \sqrt{\Theta}}{D_i \times \beta \times \omega}$$

$$D_i = 1m$$

$$L = 14 \times D_i = 14m$$

$$\beta = 2^\circ$$

$$\omega = 1RPM$$

$$\Theta = 33,85$$

$$F = 2$$

$$t = 1,77 \times \frac{14 \times 2 \times \sqrt{33,85^\circ}}{1 \times 2 \times 1} = 144,17 \text{ min}$$

3. Cálculo del combustible necesario para obtener la temperatura requerida

A partir de las Ecuaciones 1.26 a 1.29 se determinó la entalpía de reacción para la activación del cuesco de coco. Se estableció que la cantidad de carbón presente en la muestra es el porcentaje de carbón fijo, el cual se encuentra en la Tabla AIII.5. Los cálculos se presentan a continuación:

$$\frac{60t \text{ coco}}{\text{mes}} \times \frac{28,25t \text{ Carbón}}{100t} \times \frac{72,73gC}{100g \text{ Carbón}} \times \frac{1molC}{12gC} \times \frac{\text{mes}}{10 \text{ días}} \times \frac{1día}{24h} \times \frac{-21,55kcal}{molC} = -92243,98 \frac{kcal}{h}$$

A partir de la Tabla AXI.2 que señala los calores de formación de los componentes de las Ecuaciones 3.4 y 3.5, se determinó el poder calórico del GLP, cuya composición es 40 % butano y 60 % propano.

La Tabla AXI.3 indica los calores de reacción de cada reacción y del GLP, con esto y a partir del balance de energía, se calculó la cantidad de GLP necesario. Se tomó en cuenta una eficiencia del horno del 40 % debido a las altas temperaturas con las que se trabaja.

Tabla AXI.2 Calores de formación estándar de los compuestos en la combustión del GLP

Elemento	Entalpía (kJ/gmol)
C ₃ H ₈	- 104,7
C ₄ H ₁₀	- 127,1
CO ₂	- 393,51
H ₂ O	- 285,83
CO	- 110,35

Tabla AXI.3 Calores de reacción de los compuestos que conforman el GLP

Reacción	Entalpía (kJ/gmol)
$C_3H_8 + 4O_2 \rightarrow H_2 + CO + 2CO_2 + 3H_2O$	-1 650,16
$2C_4H_{10} + 11O_2 \rightarrow 2H_2 + 2CO + 6CO_2 + 8H_2O$	- 2 307,10
GLP	- 1 912,94

$$Q_p = Q_g$$

$$-1\,912,94 \frac{kJ}{mol} \times \frac{1\,mol}{49,6\,g} \times \frac{1\,kcal}{4,18\,kJ} = -9\,226,64 \frac{kcal}{kg}$$

$$-92\,243,98 \frac{kcal}{h} = -9\,226,64 \frac{kcal}{kg} \times \dot{m} \times 0,40$$

$$\dot{m} = 25,00 \frac{kg}{h}$$

4. Cálculo del aire necesario para producir carbón activado de cuesco de coco, a atmósfera reductora

$$n_{GLP} = 25,00 \frac{kg}{h} \times \frac{1\,mol}{49,6\,g} = 504,03 \frac{mol\,GLP}{h} \rightarrow \begin{cases} 302,42 \frac{mol\,C_3H_8}{h} \\ 201,61 \frac{mol\,C_4H_{10}}{h} \end{cases}$$

$$302,42 \frac{mol\,C_3H_8}{h} \times \frac{4\,mol\,O_2}{1\,mol\,C_3H_8} = 1\,209,68 \frac{mol\,O_2}{h}$$

$$201,61 \frac{mol\,C_4H_{10}}{h} \times \frac{11\,mol\,O_2}{2\,mol\,C_4H_{10}} = 1\,108,86 \frac{mol\,O_2}{h}$$

$$\dot{n}_{O_2\,TOTAL} = 2\,318,54 \frac{mol\,O_2}{h}$$

$$2\,318,54 \frac{mol\,O_2}{h} \times \frac{100\,mol\,aire}{21\,mol\,O_2} \times \frac{28,96\,g}{1\,mol} = 319,74 \frac{kg\,aire}{h}$$

5. Cálculo de λ

Como la atmósfera tiene que ser reductora ($\lambda < 1$) se calcula este factor a partir de la cantidad necesaria de oxígeno que se necesita para que exista una combustión completa expresadas en la Ecuación AXI.1 para el propano y Ecuación AXI.2 para el butano.



$$302,42 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{5 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 1\,512,10 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$201,61 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{13 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 1\,310,47 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$\dot{n}_{O_2} \text{TOTAL} = 2\,822,57 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$\lambda = \frac{n_{O_2} \text{Entrada}}{n_{O_2} \text{Estequiométrico}} = \frac{2\,318,54 \frac{\text{mol } O_2}{h}}{2\,822,57 \frac{\text{mol } O_2}{h}} = 0,82$$

6. Cálculo de la composición de los gases de salida

a) Monóxido de carbono (CO)

$$302,42 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{1 \text{ mol } CO}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 302,42 \frac{\text{mol } CO}{h}$$

$$201,61 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{2 \text{ mol } CO}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 201,61 \frac{\text{mol } CO}{h}$$

$$\dot{n}_{CO} \text{TOTAL} = 504,03 \frac{\text{mol } CO}{h} = 14,11 \frac{\text{kg } CO}{h}$$

b) Dióxido de carbono (CO₂)

$$302,42 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{2 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 604,84 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

$$201,61 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{6 \text{ mol } CO_2}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 604,83 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

$$\dot{n}_{CO_2} \text{TOTAL} = 1\,209,67 \frac{\text{mol } CO_2}{h} = 53,23 \frac{\text{kg } CO_2}{h}$$

c) Gas hidrógeno (H₂)

$$302,42 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{1 \text{ mol } H_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 302,42 \frac{\text{mol } H_2}{h}$$

$$201,61 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{2 \text{ mol } H_2}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 201,61 \frac{\text{mol } H_2}{h}$$

$$\dot{n}_{H_2} \text{TOTAL} = 504,03 \frac{\text{mol } H_2}{h} = 1,02 \frac{\text{kg } H_2}{h}$$

d) Vapor de agua (H₂O)

$$302,42 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{3 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 907,26 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

$$201,61 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{8 \text{ mol } H_2O}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 806,44 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

$$\dot{n}_{H_2O} \text{TOTAL} = 1\,713,70 \frac{\text{mol } H_2O}{h} = 30,85 \frac{\text{kg } H_2O}{h}$$

e) Nitrógeno (N₂)

$$2\,318,54 \frac{\text{mol } O_2}{h} \times \frac{79 \text{ mol } N_2}{21 \text{ mol } O_2} = 8\,722,13 \frac{\text{mol } N_2}{h} = 244,22 \frac{\text{kg}}{h}$$

Dimensionamiento de equipos de Reducción de tamaño y clasificación para el cuesco de coco

La Figura AXI.2 muestra el diagrama del proceso de reducción de tamaño y clasificación del cuesco de coco.

a) Reducción de tamaño

Para la reducción de tamaño se eligió el equipo mostrado en la tabla 3.22. Se calculó la energía por tonelada corta. Se asumió que la máquina opera las 6 h de la jornada de trabajo.

$$6 \frac{h}{d} \times \frac{0,4 t}{h} = 2,4 \frac{t}{d}$$

Además se calculó el consumo energético

$$1,325 \text{ kW} \times \frac{h}{0,4 t} = 3,313 \frac{\text{kWh}}{t}$$

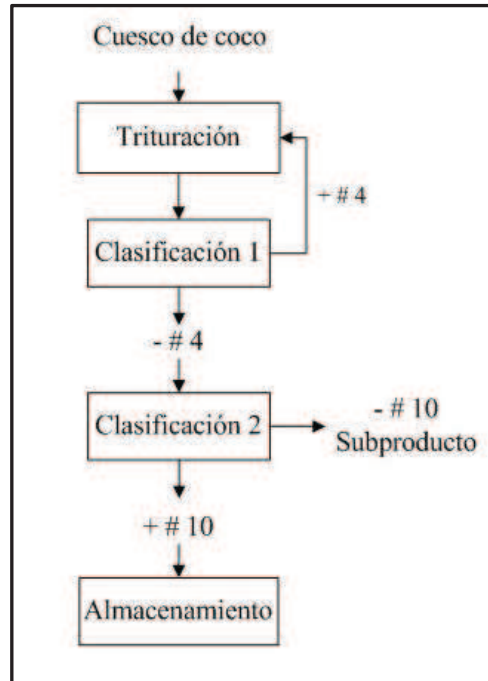


Figura AXI.2 Diagrama de bloques del proceso de reducción y clasificación

b) Tamizador Grizzly

La primera clasificación, la alimentación ingresa a un grizzly. El tiempo de operación del grizzly es el mismo que la de reducción de tamaño. La alimentación diaria es de:

$$a = 2,4 \frac{t}{d} \times \frac{1d}{6h} = 0,4 \frac{t}{h}$$

De ahí que los datos para el diseño del primer grizzly son:

- Alimentación = 0,4 t/h
- Abertura = # 4 = 4 760 μm

La constante de tamizado para esta abertura es:

$$C = 78,577 \frac{t}{m^2 \cdot h}$$

El área necesaria es:

$$A = \frac{a}{C}$$

[AXI.3]

$$A = \frac{0,4 \frac{t}{h}}{78,577 \frac{t}{m^2 \cdot h}} = 50,906 \text{ cm}^2$$

Para la segunda clasificación se consideró que el 80 % del primer tamizado va al segundo y que de este solo el 6 % del total (7,5 % de la alimentación) pasa por el segundo clasificador.

De ahí que los datos para el diseño del segundo grizzly son:

- Alimentación = 0,32 t/h
- Abertura = # 10 = 1 650 μm

La constante de tamizado para esta abertura es:

$$C = 24,865 \frac{t}{m^2 \cdot h}$$

$$A = \frac{a}{C} = \frac{0,32 \frac{t}{h}}{24,865 \frac{t}{m^2 \cdot h}} = 128,695 \text{ cm}^2$$

c) Diseño de la Pila Stock

El número de días que se desea que la planta trabaje sin alimentación son 2. Por lo tanto, la cantidad de material que se va a almacenar en la pila stock es:

$$m_{stock} = 2 \frac{t}{d} \times 2 d = 4 t$$

$$V_{stock} = 4 t \times \frac{\text{cm}^3}{2 g} = 2 m^3$$

La Figura AX.3 muestra el esquema de la pila stock

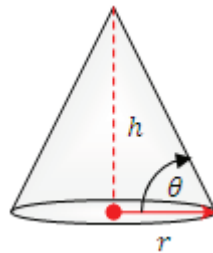


Figura AXI.3 Diagrama de la pila stock

Como se puede observar en la Figura AX.4 se va a diseñar una pila stock con forma de cono. Por lo tanto, su volumen viene dado por la ecuación AXI.4:

$$V_{stock} = \frac{1}{3} \pi \cdot r^2 h \quad \text{[AXI.4]}$$

El ángulo de reposo, se encuentra en la Tabla 3.19. Por lo tanto, la relación entre el radio de la base y la altura del cono está dada por la ecuación AXI.5:

$$\tan(\Theta) = \frac{h}{r} \Rightarrow r \tan(\Theta) = h \quad [\text{AXI.5}]$$

$$V_{stock} = \frac{1}{3} \pi \cdot r^2 (r \tan(\Theta))$$

$$2m^3 = \frac{1}{3} \pi \cdot r^3 (\tan(33,85))$$

$$r = 1,417 m$$

$$h = (\tan(33,85)) \times 1,417 = 0,951 m$$

Dimensionamiento de equipos de reducción de tamaño y clasificación para el carbón activado de cuesco de coco producido

a) Reducción de tamaño

Para la reducción de tamaño se eligió el equipo mostrado en la Tabla 3.23. Se calculó la energía por tonelada corta. Se asumió que la máquina opera las 6 h de la jornada de trabajo.

$$6 \frac{h}{d} \times \frac{0,25t}{h} = 1,5 \frac{t}{d}$$

Además se calculó el consumo energético

$$7,5kW \times \frac{h}{0,25t} = 30 \frac{kWh}{t}$$

b) Tamizador Grizzly

La primera clasificación, la alimentación ingresa a un grizzly. El tiempo de operación del grizzly es el mismo que la de reducción de tamaño. La alimentación diaria es de:

$$a = 1,5 \frac{t}{d} \times \frac{1d}{6h} = 0,25 \frac{t}{h}$$

De ahí que los datos para el diseño del primer grizzly son:

- Alimentación = 0,25 t/h
- Abertura = # 6 = 1 650 μ m

La constante de tamizado para esta abertura es:

$$C = 27,248 \frac{t}{m^2 \cdot h}$$

El área necesaria es:

$$A = \frac{a}{C} = \frac{0,25 \frac{t}{h}}{27,248 \frac{t}{m^2 \cdot h}} = 91,784 \text{ cm}^2$$

Para la segunda clasificación se consideró que el 60 % del primer tamizado va al segundo y que de este, el 10 % del total (7,5 % de la alimentación) pasa por el segundo clasificador.

De ahí que los datos para el diseño del segundo grizzly son:

- Alimentación = 0,15 t/h
- Abertura = # 12 = 1 410 μm

La constante de tamizado para esta abertura es:

$$C = 23,276 \frac{t}{m^2 \cdot h}$$

$$A = \frac{a}{C} = \frac{0,15 \frac{t}{h}}{23,276 \frac{t}{m^2 \cdot h}} = 64,444 \text{ cm}^2$$

Dimensionamiento de la cámara de enfriamiento

Se asumió que el agua de salida es de 90 °C. También se asumió que la eficiencia debido a la gran transferencia de calor es del 80 %. A partir de la Ecuación AXI.6 se calculó el flujo de agua necesario.

$$\dot{Q}_p = -\dot{Q}_g \times \varepsilon \quad [\text{AXI.6}]$$

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_{\text{Carbón}} \times CP$$

$$\dot{Q}_p = -41,67 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 2\,000 \frac{\text{kcal}}{\text{Kg}}$$

$$\dot{Q}_p = -83\,333,3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \dot{Q}_g = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} (Cp \Delta T)$$

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \times \left(1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (100 - 25) ^\circ\text{C} \right) \times 0,8$$

$$\dot{Q}_P = 60 \cdot \dot{m}_{H_2O}$$

$$83\,333,3 \frac{kcal}{h} = 60 \dot{m}_{H_2O}$$

$$1\,388,89 \frac{kg}{h} = \dot{m}_{H_2O}$$

Una vez que se obtuvo el flujo de vapor se calculó el área necesaria para el intercambiador a partir de la ecuación AXI.7.

$$\dot{Q}_P = U \times A \times LMTD \quad [AXI.7]$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$LMTD = \frac{760 - 75}{\ln\left(\frac{760}{75}\right)} = 295,79 \text{ } ^\circ C$$

$$121\,124,03 W = 10 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \times A \times 295,79 \text{ } ^\circ C$$

$$A = 41 m^2$$

$$A = 2\pi RL$$

$$L = \frac{A}{2\pi R}$$

$$R = \frac{41 m^2}{2\pi(14m)} = 0,47 m$$

Dimensionamiento del caldero

1. Cálculo del flujo de vapor requerido

$$\dot{n}_{vapor} = C_{vapor} \times V_{horno}$$

$$\dot{n}_{vapor} = 7,88 \times 10^{-6} \frac{mol}{cm^3} \times 1,17 \times 10^{10} \frac{cm^3}{h} = 92\,253,6 \frac{mol}{h} = 1\,660,53 \frac{kg}{h}$$

La Tabla AXI.4 señala las condiciones del caldero. La Tabla AX.5 indica la composición del combustible

Los valores de la Tabla AXI.4 se basan en la puesta en planta en la provincia de Esmeraldas, la misma que se encuentra a nivel del mar. Además la Figura AXI.4 muestra el diagrama de los procesos en el caldero. La Tabla AXI.5 señala las

pérdidas que posee cada parte del caldero. La Tabla AXI.6 indica la composición química del Diésel que será útil para los cálculos posteriores.

Tabla AXI.4 Condiciones iniciales del caldero

	Valor	Unidades
Vapor requerido	1 660,53	kg/h
Presión de operación	10	bar
Calidad del vapor	98	%
Temperatura vapor sobrecalentado	200	°C
Temperatura de agua precalentada	90	°C
Temperatura aire precalentado	100	°C
Temperatura ambiente	25	°C
Temperatura permisible gases de chimenea	125	°C
Presión atmosférica	760	mmHg
Exceso de aire a la entrada	20	%

Tabla AXI.5 Pérdidas en los equipos

	Porcentaje de pérdida
Caldero	8
Sobrecalentador	8
Economizador	10
Precalentador de aire	10

Tabla AXI.6 Composición del diésel II

	Porcentaje
Carbón	87,3
Hidrógeno	12,6
Oxígeno	0,04
Nitrógeno	0,006
Azufre	0,22
Cenizas	< 0,01

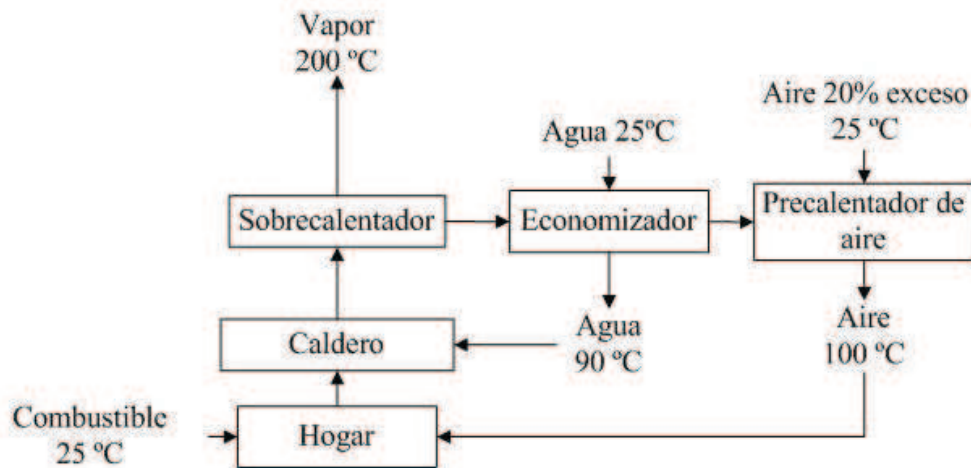


Figura AXI.4 Diagrama de bloques del caldero

2. Balance energético de los diferentes componentes del caldero

a) Caldero

P operación

$$P_{op} = P_{caldero} + P_{ATM}$$

$$P_{ATM} = 760 \text{ mmHg} = 1,01 \text{ bar}$$

$$P_{op} = 11 \text{ bar} \Rightarrow T_{op} = 184,09^\circ \text{C}$$

$$H_v = 2\,781,7 \text{ kJ/Kg}$$

$$H_l = 781,34 \text{ kJ/Kg}$$

$$\Delta H = H_{vapor\ 98\%} - H_{agua\ 90^\circ \text{C}}$$

$$H_{vapor\ 90\%} = X \cdot H_v + (1 - X) \cdot H_l$$

$$H_{vapor\ 90\%} = 0,98 \cdot 2\,781,7 + (1 - 0,98) \cdot 781,34 = 2\,741,693 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{agua\ 90^\circ \text{C}} = 376,92 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Recal\ caldero} = \frac{Q_{caldero}}{\varepsilon} = \frac{3\,926\,794,226 \text{ kJ/h}}{0,92} = 4\,268\,254,59 \text{ kJ/h}$$

$$\Delta H = 2\,364,773 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{caldero} = \dot{m}_{vapor} \times \Delta H = 1\,660,537 \text{ Kg/h} \times 2\,364,773 \text{ kJ/Kg} = 3\,926\,794,226 \text{ kJ/h}$$

b) Sobrecalentador

$$\Delta H = H_{\text{vapor } 200^{\circ}\text{C}} - H_{V 98\%}$$

$$\Delta H = 2793,5 - 2741,693 = 51,807 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{\text{util}} = \dot{m}_{\text{vapor}} \times \Delta H = 1660,537 \text{ Kg/h} \times 51,807 \text{ kJ/kg} = 86027,44 \text{ kJ/h}$$

$$Q_{\text{Real}} = \frac{Q_{\text{util}}}{\varepsilon} = \frac{86027,44 \text{ kJ/h}}{0,92} = 93508,087 \text{ kJ/h}$$

c) Economizador

$$\Delta H = H_{l 90^{\circ}\text{C}} - H_{l 25^{\circ}\text{C}}$$

$$\Delta H = 376,92 - 104,89 = 272,03 \text{ kJ/Kg}$$

$$\dot{Q}_{\text{util}} = \dot{m}_{\text{vapor}} \times \Delta H = (1660,54 - 1388,89) \text{ kg/h} \times 272,03 \text{ kJ/Kg} = 73896,95 \text{ kJ/h}$$

$$Q_{\text{Real}} = \frac{Q_{\text{util}}}{\varepsilon} = \frac{73896,95 \text{ kJ/h}}{0,8} = 92371,19 \text{ kJ/h}$$

d) Para el Precalentador de aire

$$\Delta H = H_{\text{aire } 100^{\circ}\text{C}} - H_{25^{\circ}\text{C}}$$

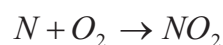
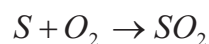
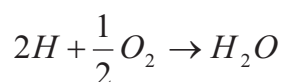
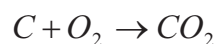
$$\Delta H = \dot{m} \times Cp \times \Delta T$$

$$\Delta H = \dot{m} \times 1,007878 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} (100 - 25)^{\circ}\text{C} = \dot{m} \times 75,591 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H_{\text{Real}} = \frac{\Delta H}{\varepsilon} = \frac{\dot{m} \times 75,591 \text{ kJ/kg}}{0,9} = \dot{m} \times 89,589 \text{ kJ/kg}$$

e) Selección del caldero

$$A_{\text{Calefacción}} = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}}}{\text{Intensidad}} = \frac{1660,537 \text{ kg/h}}{90 \text{ kg/h} \times \text{m}^2} = 18,45 \text{ m}^2$$

f) Cálculo del aire real

$$\begin{aligned}
 87,3 \text{ Kg } C &\times \frac{1 \text{ kmol } C}{12 \text{ Kg } C} \times \frac{1 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } C} \times \frac{32 \text{ kg}}{1 \text{ kmol } O_2} = 232,8 \text{ kg } O_2 \\
 12,6 \text{ kg } H &\times \frac{1 \text{ kmol } H}{1 \text{ kg } H} \times \frac{1/2 \text{ kmol } O_2}{2 \text{ kmol } H} \times \frac{32 \text{ kg}}{1 \text{ kmol } O_2} = 100,8 \text{ kg } O_2 \\
 0,22 \text{ kg } S &\times \frac{1 \text{ kmol } S}{32,064 \text{ kg } S} \times \frac{1 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } S} \times \frac{32 \text{ kg}}{1 \text{ kmol } O_2} = 0,22 \text{ kg } O_2 \\
 0,006 \text{ kg } N &\times \frac{1 \text{ kmol } N}{14 \text{ kg } N} \times \frac{1 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } N} \times \frac{32 \text{ kg}}{1 \text{ kmol } O_2} = 0,0137 \text{ kg } O_2 \\
 \text{TOTAL} &= \frac{333,874 \text{ kg } O_2}{100 \text{ kg combustible}} = 3,339 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg combustible}}
 \end{aligned}$$

g) Aire teórico

$$3,339 \text{ kg } O_2 \times \frac{1 \text{ kmol } O_2}{32 \text{ kg } O_2} \times \frac{100 \text{ kmol aire}}{21 \text{ kmol } O_2} \times \frac{28,96 \text{ kg aire}}{1 \text{ kmol aire}} = 14,516 \text{ kg aire}$$

h) Aire real = 20 % exceso

$$14,516 \text{ kg aire} \times 1,20 = 17,419 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg combustible}} = W_a'$$

$$W_a = W_a' \times W_c$$

Para el Precalentador:

$$Q_{\text{Total}} = 89,589 \times 17,419 = 1\,560,595 \cdot W_c$$

i) Calor total del sistema (Q₁)

$$Q_1 = 4\,268\,254,59 \text{ kJ/h} + 93\,508,087 \text{ kJ/h} + 92\,371,19 \text{ kJ/h} + 1\,560,595 \cdot W_c$$

$$Q_1 = 4\,454\,133,86 + 1\,560,595 \cdot W_c$$

j) Cálculo de Q₂

$$Q_2 = W_g \times \Delta H_{\text{gases}}$$

$$\Delta H_{\text{gases}} = \Delta H_{\text{gases}}(T_c, Tr) - \Delta H_{\text{gases}}(T_{gs}, Tr)$$

$$\Delta H_{\text{gases}}(T_{gs}, Tr) = C_{p_{\text{gases}}}(T_{gs} - Tr)$$

$$\Delta H_{\text{gases}}(T_c, Tr) = \frac{PC \times R_H}{W_g'}$$

$$W_g = W_g' \times W_c$$

$$R_H = 95\%$$

$$PC = 84\%C + 290\left(\%H - \frac{\%O}{8}\right) + 25\%S - 6\%H_2O$$

$$PC = 84(87,3) + 290\left(12,6 - \frac{0,04}{8}\right) + 25 \cdot 0,22$$

$$PC = 10\,991,25 \text{ kcal/kg combustible} = 45\,943,425 \text{ kJ/Kg combustible}$$

A partir de los datos de la Tabla AXI.7 se realizaron los cálculos para determinar la entalpía de los gases

Tabla AXI.7 Composición de los gases

Elemento	Composición
CO ₂	11,45
H ₂ O	9,91
SO ₂	0,011
NO ₂	0,001
O ₂	3,30
N ₂	75,31

$$\frac{87,3}{100} \text{ kg C} \times \frac{1 \text{ kmol C}}{12 \text{ kg C}} \times \frac{1 \text{ kmol CO}_2}{1 \text{ kmol C}} \times \frac{44 \text{ kg}}{1 \text{ kmol CO}_2} = 0,0728 \text{ kmol CO}_2 = 3,2010 \text{ kg CO}_2$$

$$\frac{12,6}{100} \text{ kg H} \times \frac{1 \text{ kmol H}}{1 \text{ kg H}} \times \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{2 \text{ kmol H}} \times \frac{18 \text{ kg}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} = 0,063 \text{ kmol H}_2\text{O} = 1,134 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$\frac{0,22}{100} \text{ kg S} \times \frac{1 \text{ kmol S}}{32,064 \text{ kg S}} \times \frac{1 \text{ kmol SO}_2}{1 \text{ kmol S}} \times \frac{64,064 \text{ kg}}{1 \text{ kmol SO}_2} = 6,86 \times 10^{-5} \text{ kmol SO}_2 = 4,40 \times 10^{-4} \text{ kg SO}_2$$

$$\frac{0,006}{100} \text{ kg N} \times \frac{1 \text{ kmol N}}{14 \text{ kg N}} \times \frac{1 \text{ kmol NO}_2}{1 \text{ kmol N}} \times \frac{46 \text{ kg}}{1 \text{ kmol NO}_2} = 4,29 \times 10^{-6} \text{ kmol NO}_2 = 1,97 \times 10^{-4} \text{ kg NO}_2$$

$$\left(17,419 \frac{\text{kg Air real}}{\text{kg combustible}} - 14,516 \frac{\text{kg Air teórico}}{\text{kg combustible}}\right) \times \frac{0,23 \text{ kg O}_2}{1 \text{ kg aire}} \times \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2}$$

$$= 0,021 \text{ kmol O}_2 = 0,668 \text{ kg O}_2$$

$$17,419 \frac{\text{kg Air real}}{\text{kg combustible}} \times \frac{0,77 \text{ kg N}_2}{1 \text{ kg aire}} \times \frac{1 \text{ kmol N}_2}{28 \text{ kg N}_2} = 0,479 \text{ kmol N}_2 = 13,413 \text{ kg N}_2$$

$$TOTAL = 0,636 \text{ kmol} = 18,417 \text{ kg gases} = W_g'$$

$$C_p = \sum (X_i C_{p_i}) = 1,087 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$\Delta H_{gases}(T_c, T_r) = \frac{45\,943,425 \text{ kJ/kg combustible} \times 0,95}{18,417 \text{ kgas/kg combustible}} = 2\,369,889 \text{ kJ/Kg gas}$$

$$\Delta H_{gases}(T_{gs}, T_r) = 1,087 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (125 - 100)^\circ\text{C} = 27,175 \text{ kJ/Kg gas}$$

$$\Delta H_{gases} = 2\,342,714 \text{ kJ/kg gas}$$

$$Q_2 = W_g \cdot \Delta H_{gases} = 18,417 \times W_c \times 2\,342,714 \text{ kJ/kg gas} = 43\,145,764 \times W_c \text{ kJ/Combustible}$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$43\,145,764 \times W_c = 4\,454\,133,86 + 1\,560,595 \cdot W_c$$

$$W_c = 107,11 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} = 1\,029,86 \frac{\text{gal}}{\text{mes}}$$

k) Temperatura de Combustión

$$\Delta H_{gases} = \frac{PC \times R_H}{W_g} - C_{p_{gases}}(T_{gs} - T_r)$$

$$Q_{caldero} = W_g \times \Delta H_{gases}$$

$$1\,021\,113,54 \text{ kcal} = 18,419 \frac{\text{kg}_{gas}}{\text{kg}_{comb}} \times 118,465 \left(\frac{10\,991,25 \text{ kcal}}{18,419 \text{ kg}_{gas}/\text{kg}_{comb}} \times 0,95 - C_p(T_{gs} - 25^\circ\text{C}) \right)$$

$$467,97 = 566,898 - C_p(T_{gs} - 25^\circ\text{C}) \Rightarrow 98,928 = C_p(T_{gs} - 25^\circ\text{C})$$

$$C_p = 0,26$$

$$T_{gs} = 405,493^\circ\text{C}$$

Dimensionamiento de tanques de reserva de combustibles

Los 2 tanques serán construidos para un abastecimiento semanal. Para el tanque de reserva de GLP se estableció que la mejor forma es un cilindro horizontal de 1,6 m de alto como se muestra en la Figura XI.5.

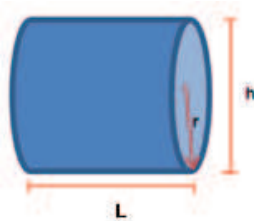


Figura AXI.5 Diagrama del tanque de reserva de GLP

Para el diseño del tanque de GLP se partió de la ecuación de los gases a las condiciones de Esmeraldas.

$$PV = nRT$$

$$V = \frac{R \cdot 298K \times 28\,379,032\text{mol}}{100\text{ ATM}}$$

$$V = 2,131\text{m}^3$$

$$V \times f = L \times \left\{ r^2 \times \cos^{-1} \left[1 - \left(\frac{h}{r} \right) \right] + (h+r) \times \sqrt{h(2 \times r - h)} \right\}$$

$$3\text{m}^3 = L \times \left\{ r^2 \times \cos^{-1} \left[1 - \left(\frac{h}{r} \right) \right] + (h+r) \times \sqrt{h(2 \times r - h)} \right\}$$

$$L = 2\text{m}^3$$

Para el dimensionamiento del tanque de combustible se estableció que fuera un cilindro vertical. Los cálculos se muestran a continuación:

$$V \times f = \pi \cdot r^2 h$$

$$1,4\text{m}^3 = \pi \cdot r^2 h$$

$$h = 1,6\text{m}$$

$$r = 0,528\text{m}$$

Dimensionamiento de la cámara de post combustión

A partir de las ecuaciones 3.4 y 3.5 se determinó la cantidad de oxígeno que se necesita. También se determinó la cantidad de oxígeno necesario para quemar el GLP, el flujo de aire y la composición final de los gases.

a) Oxígeno necesario

$$504,03 \frac{\text{mol } H_2}{h} \times \frac{1 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } H_2} = 252,015 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$504,03 \frac{\text{mol } CO}{h} \times \frac{1 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } CO} = 252,015 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$50,403 \frac{\text{mol } GLP}{h} \times \frac{49,6 \text{ g}}{\text{mol } GLP} = 2,5 \frac{\text{Kg}}{h} \rightarrow \begin{cases} 30,242 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \\ 20,161 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \end{cases}$$

$$30,242 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{4 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 120,968 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$20,161 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{11 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 110,886 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$\dot{n}_{O_2} \text{ TOTAL} = 735,884 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

b) Flujo de aire que ingresa

$$\dot{n}_{O_2} \text{ ingresa} = \dot{n}_{O_2} \text{ TOTAL} \times 1,20 = 883,061 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$883,061 \frac{\text{mol } O_2}{h} \times \frac{100 \text{ mol aire}}{21 \text{ mol } O_2} \times \frac{28,96 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 121,78 \frac{\text{Kg aire}}{h}$$

c) Composición final de los gases de salida

Dióxido de carbono (CO₂)

$$30,242 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{2 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 60,484 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

$$20,161 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{6 \text{ mol } CO_2}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 60,483 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

$$\dot{n}_{CO_2} \text{ TOTAL} = 120,967 \frac{\text{mol } CO_2}{h} = 5,323 \frac{\text{Kg } CO_2}{h}$$

Vapor de agua (H₂O)

$$30,242 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{3 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 90,726 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

$$20,161 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{8 \text{ mol } H_2O}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 80,644 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

$$\dot{n}_{H_2O} \text{ TOTAL} = 171,370 \frac{\text{mol } H_2O}{h} = 3,085 \frac{\text{Kg } H_2O}{h}$$

Oxígeno (O₂)

$$\dot{n}_{O_2} \text{ No Rx} = \dot{n}_{O_2} \text{ ingresa} - \dot{n}_{O_2} \text{ Rx}$$

$$\dot{n}_{O_2} \text{ No Rx} = 883,061 - 735,884 = 147,177 \frac{\text{mol O}_2}{h} = 4,71 \frac{\text{Kg O}_2}{h}$$

Nitrógeno (N₂)

$$\dot{n}_{O_2} \text{ ingresa} = \dot{n}_{O_2} \text{ TOTAL} \times 1,20 = 883,061 \frac{\text{mol O}_2}{h}$$

$$883,061 \frac{\text{mol O}_2}{h} \times \frac{79 \text{ mol N}_2}{21 \text{ mol O}_2} = 3\,321,991 \frac{\text{mol N}_2}{h} = 93,016 \frac{\text{Kg N}_2}{h}$$

d) Oxígeno necesario

$$504,03 \frac{\text{mol H}_2}{h} \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{2 \text{ mol H}_2} = 252,015 \frac{\text{mol O}_2}{h}$$

$$504,03 \frac{\text{mol CO}}{h} \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{2 \text{ mol CO}} = 252,015 \frac{\text{mol O}_2}{h}$$

$$50,403 \frac{\text{mol GLP}}{h} \times \frac{49,6 \text{ g}}{\text{mol GLP}} = 2,5 \frac{\text{Kg}}{h} \rightarrow \begin{cases} 30,242 \frac{\text{mol C}_3\text{H}_8}{h} \\ 20,161 \frac{\text{mol C}_4\text{H}_{10}}{h} \end{cases}$$

$$30,242 \frac{\text{mol C}_3\text{H}_8}{h} \times \frac{4 \text{ mol O}_2}{1 \text{ mol C}_3\text{H}_8} = 120,968 \frac{\text{mol O}_2}{h}$$

$$20,161 \frac{\text{mol C}_4\text{H}_{10}}{h} \times \frac{11 \text{ mol O}_2}{2 \text{ mol C}_4\text{H}_{10}} = 110,886 \frac{\text{mol O}_2}{h}$$

$$\dot{n}_{O_2} \text{ TOTAL} = 735,884 \frac{\text{mol O}_2}{h}$$

Dimensionamiento del lavador de gases de combustión

A partir de las Tabla 3.28 y de las capacidades calóricas se construyó la Tabla AXI.10.

A partir de la Tabla AXI.10 se estableció el flujo de agua necesaria, por medio de un balance de energía.

$$Q_e = Q_s$$

$$95\,006,10 \frac{\text{Kcal}}{h} = \dot{m} \times 1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \times (90 - 25)^\circ\text{C}$$

$$\dot{m} = 1\,461,63 \frac{\text{Kg}}{h}$$

Tabla AXI.8 Balance de energía de los gases de salida

Gas	Flujo (kg/h)	Cp (kcal/kg- °C)	Calor kcal/h
CO ₂	58,55	0,27	12 015,08
H ₂ O	33,94	0,5	12 895,30
N ₂	337,24	0,27	69 200,83
O ₂	4,71	0,25	894,90
TOTAL	434,43		95 006,10