ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CUESCO DE PALMISTE (*Elaeis guinéens*) MEDIANTE ACTIVACIÓN QUÍMICA CON CLORURO DE ZINC

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

CAROLINA MARIBEL JEREZ NARANJO

carolina.jereznaranjo@gmail.com

DIRECTOR: ING. ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN Msc.

ernesto.delatorre@epn.edu.ec

QUITO, Julio del 2014

© Escuela Politécnica Nacional (2014)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Carolina Maribel Jerez Naranjo 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.

_____

Carolina Maribel Jerez Naranjo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carolina Maribel Jerez Naranjo bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre Chauvin
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

Me queda corto tan solo un agradecimiento, todo se lo debo a mi Dios, que es el motor de mi vida, quien nunca me ha dejado sola, quien siempre ha sido mi motivación, mi ayuda, mi fuerza, quien ha luchado junto a mí y quien ha hecho la lucha por mí, por dejarme saber que su amor suple todo y que en los momentos difíciles nunca me ha dejado rendir para alcanzar mis sueños.

Agradezco a mi padre y mi madre, a mi familia, quienes siempre confiaron en mí, incluso cuando parecía que me iba a rendir, su continuo apoyo, estímulo y enseñanzas fueron el impulso para concluir este proceso, a Rodolfo porque nunca dejo de estar pendiente de mí y con su amor y paciencia colaboro en este logro.

A mi familia DEMEX, que en este corto período de tiempo me han demostrado apoyo incondicional y sobre todo una amistad sincera, me han hecho sentir que Uds. son mi segundo hogar.

Como no agradecer a mi profesor y director de tesis, Ernesto, aquel profesor que desde un inicio de mi carrera fue una motivación para llegar a ser la mejor, en la mejor carrera, de la mejor Universidad, quien me ayudó con ahínco y mucha sabiduría a iniciar y culminar este proyecto.

Agradezco a todas las personas que en algún momento se han cruzado en mi camino y han puesto su granito de arena para que esta tesis vea la luz.

DEDICATORIA

A mis padres, quienes son mi inspiración y mi razón de vida, y a mis amigos Andre, Luchin y Ale, quienes como hermanos en la lucha nos hemos sostenido para alcanzar nuestros sueños.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xviii
INTRODUCCIÓN	xx
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Características del cuesco de palmiste	1
1.1.1. Características de la especie	3
1.1.2. Anatomía y fisiologia de la palma	3
1.1.2.1. Raíces	3
1.1.2.2. Tallo de la palma	4
1.1.2.3. Hojas	4
1.1.2.4. Inflorescencias	4
1.1.2.5. Frutos	5
1.1.3. Tipos de palma africana de aceite	5
1.1.3.1. Tipos de acuerdo con el color del fruto	5
1.1.3.2. Tipos según el espesor del fruto	5
1.1.4. Composición química del cuesco de palmiste	7
1.1.4.1. Celulosa	8
1.1.4.2. Hemicelulosa	9
1.1.4.3. Lignina	10
1.1.5. Biomasa de Palma Africana	11
1.1.5.1. Reutilización de la biomasa	11
1.1.5.2. Biomasa con fines energéticos	13
1.1.5.3. Ventajas de uso de la biomasa	14
1.2. Carbonización de materiales lignocelulósicos	15
1.2.1. Proceso de transformación: pirólisis	15
1.2.2. Temperatura de pirólisis	16
1.2.3. Mecanismos de reacción de la pirólisis de biomasa	16
1.2.4. Parámetros de la pirólisis de biomasa	18
1.2.5. Termodinámica de pirolisis	20
1.2.6. Carbonización del cuesco de palmiste	25
1.2.7. Modelos cinéticos de reacción	26
1.2.7.1. Modelos de una reacción global sencilla	26
1.2.7.2. Modelos de reacciones múltiples	26
1.2.7.3. Modelos centrados en la formación de los productos	27
1.2.7.4. Modelos semi globales de reacción	27
1.2.8. Cinética de Activación	28
1.2.8.1. Modelo de conversión progresiva	28
1.2.8.2. Modelo de núcleo sin reaccionar	29
1.3. Influencia del cloruro de zinc en la carbonización de materiales lignocelolósicos: Activación química	30
1.3.1. Obtención de carbón activado	30

1.3.2. Precursores 31
1.3.3. Activación química 32
1.3.4. Tasa de calentamiento 41

2. PARTE EXPERIMENTAL 42

2.1. Caracterización del cuesco de palmiste (*Elaeis guinéens*) de las variedades tenera (espesor 2mm) y dura (espesor 6mm) 42
2.1.1. Caracterización física de la materia prima 42
2.1.1.1. Reducción de tamaño 42
2.1.1.2. Determinación del tamaño de partícula 42
2.1.1.3. Determinación del espesor 43
2.1.1.4. Densidad Real 43
2.1.1.5. Densidad aparente 44
2.1.1.6. Determinación de la dureza 45
2.1.2. Caracterización química de la materia prima 46
2.1.2.1. Lignina y celulosa 46
2.1.2.2. Contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo 50
2.1.3. Análisis termogravimétrico de la materia prima 50

2.2. Evaluación de la influencia del espesor de la materia prima sobre el proceso de carbonización 50

2.3. Evaluación de la influencia del cloruro de zinc sobre el proceso de carbonización-activación del cuesco de palmiste de diferente espesor 51
2.3.1. Evaluación de la activación química con cloruro de zinc a nivel laboratorio 51
2.3.2. Evaluación de la activación química con cloruro de zinc en el horno piloto 53
2.3.3. Determinación de la superficie específica del carbón activado, por medio del índice de yodo 54
2.3.4. Caracterización del carbón activado 55
2.3.4.1. Índice de Azul de metileno 55
2.3.4.2. Índice de decoloración de azúcar 56
2.3.4.3. Titulación Boehm 57
2.3.4.4. Caracterización de la porosidad del carbón activado 59

2.4. Definición del diagrama de flujo y dimensionamiento de los equipos para la producción de 20 t/mes de carbón activado químicamente. 59

2.5. Evaluación de la pre factibilidad económica de instalación de una planta de 20 t/mes 61

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 62

3.1. Caracterización del cuesco de palmiste 62
3.1.1. Caracterización física 62
3.1.2. Caracterización química 65
3.1.2.1. Determinación de humedad, contenido de ceras, grasas y aceites, celulosa y lignina de cada tipo de cuesco de palmiste 65

3.1.2.2. Determinación del contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo 66
3.1.3. Análisis termogravimétrico de la materia prima 66

3.2. Evaluación de la influencia del espesor de la materia prima sobre el proceso de carbonización 68
3.2.1. Pruebas a nivel de laboratorio en una mufla 68
3.2.1.1. Análisis de la densidad aparente y densidad real del carbón de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 68
3.2.1.2. Análisis de dureza del carbón de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 71
3.2.1.3. Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 73
3.2.1.4. Relación entre el carbón fijo y la dureza del carbón de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 75
3.2.1.5. Rendimiento de la carbonización de los dos tipos de cuesco de palmiste a nivel de laboratorio para diferentes temperaturas y tiempos 79

3.3. Evaluación de la influencia del cloruro de zinc sobre el proceso de carbonización-activación del cuesco de palmiste de diferente espesor 80
3.3.1. Pruebas de la activación química con cloruro de zinc a nivel laboratorio 80
3.3.1.1. Determinación de la superficie específica del carbón activado, por medio del índice de yodo 81
3.3.1.2. Análisis de la densidad aparente y densidad real del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 84
3.3.1.3. Análisis de dureza del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 87
3.3.1.4. Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 89
3.3.1.5. Relación entre el carbón fijo y la dureza del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 90
3.3.1.6. Rendimiento de la activación de los dos tipos de cuesco de palmiste a nivel de laboratorio para diferentes temperaturas y tiempos 94
3.3.2. Pruebas de la activación química con cloruro de zinc a escala piloto en el horno piloto nichols herreshoff mono solera 96
3.3.2.1. Análisis de la densidad aparente y densidad real del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a escala piloto 96
3.3.2.2. Análisis de dureza del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio 99
3.3.2.3. Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a escala piloto 101

3.3.2.4. Relación entre el carbón fijo y la dureza del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a escala piloto 103
3.3.2.5. Determinación de la superficie específica del carbón activado, por medio del índice de yodo 106
3.3.3. Caracterización del carbón activado a nivel piloto 108
3.3.3.1. Índice de Azul de metileno 108
3.3.3.2. Índice de decoloración de azúcar 109
3.3.3.3. Titulación Boehm 110
3.3.3.4. Caracterización de la porosidad del carbón activado 111

3.4. Definición del diagrama de flujo y dimensionamiento de los equipos principales para la producción de 20 t/mes de carbón activado químicamente a partir de cuesco de palmiste 113
3.4.1. Cinéticas de los procesos de activación y carbonización 113
3.4.2. Diseño conceptual y diseño de equipos 115
3.4.2.1. Estimación de la cantidad de cuesco de palmiste necesario para la producción de carbón activado 117
3.4.2.2. Dimensionamiento del horno rotatorio 118
3.4.2.3. Dimensionamiento de la sección de reducción y clasificación de tamaño de la materia prima 122
3.4.2.4. Dimensionamiento de la sección de reducción y clasificación de tamaño del carbón activado producido 124
3.4.2.5. Dimensionamiento del reactor 124
3.4.2.6. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de la solución de Cloruro de Zinc 125
3.4.2.7. Dimensionamiento del tanque de lavado para el carbón activado 125
3.4.2.8. Dimensionamiento de la cámara de enfriamiento 126
3.4.2.9. Dimensionamiento de la cámara de secado para el carbón activado 126
3.4.2.10. Dimensionamiento del caldero 127
3.4.2.11. Dimensionamiento de los tanques de reserva de combustible 128
3.4.2.12. Dimensionamiento de la cámara de post-combustión 129

3.5. Evaluación de la factibilidad económica de la planta para una producción de 20 t/mes 134

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 137

4.1. Conclusiones 137

4.2. Recomendaciones 140

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 141

ANEXOS 149

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

Tabla 1.1.	Clasificación del fruto de palma de aceite según el espesor del endocarpio	6
Tabla 1.2.	Oferta mundial de aceite de palma y estimativo de la biomasa residual producida	7
Tabla 1.3.	Composición química de diferentes fibras lignocelulósicas	13
Tabla 1.4.	Condiciones experimentales de pruebas de carbonización de Cuesco de palma con Análisis Termogravimétrico	23
Tabla 2.1.	Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico de los materiales molido	43
Tabla 2.2.	Normas Tappi aplicadas a la caracterización química de la materia prima	46
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)	54
Tabla 2.4.	Datos para la elaboración de la curva de calibración de azul de metileno	56
Tabla 2.5.	Reactivos utilizados para la titulación Boehm	58
Tabla 2.6.	Producción de palma africana en el Ecuador	60
Tabla 3.1.	Tratamiento de datos para ensayo de granulometría del tipo de cuesco Tenera después del proceso de reducción de tamaño con una trituradora de mandíbulas	63
Tabla 3.2.	Tratamiento de datos para ensayo de granulometría del tipo de cuesco Dura después del proceso de reducción de tamaño con una trituradora de mandíbulas	63
Tabla 3.3.	Propiedades físicas de los tipos de cuesco de palmiste	64
Tabla 3.4.	Composición química de la materia prima	65
Tabla 3.5.	Contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo de la materia prima	66
Tabla 3.6.	Tamices que definen el tamaño del cuesco de palmiste carbonizado	72
Tabla 3.7.	Tamices de dureza	72

Tabla 3.8. Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos. Pruebas de laboratorio 73

Tabla 3.9. Datos obtenidos para pruebas de laboratorio del rendimiento de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos 79

Tabla 3.10. Índice de Yodo de los carbones activado de los tipos de cuesco de palmiste para X_{Zn} = 0,4 (g Zn/g cuesco) 81

Tabla 3.11. Índice de Yodo de los carbones activado de los tipos de cuesco de palmiste para X_{Zn} = 0,5 (g Zn/g cuesco) 82

Tabla 3.12. Índice de Yodo de los carbones activado de los tipos de cuesco de palmiste para X_{Zn} = 0,6 (g Zn/g cuesco) 83

Tabla 3.13. Tamices que definen el tamaño del cuesco de palmiste 87

Tabla 3.14. Tamices de dureza 87

Tabla 3.15. Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos. Pruebas de laboratorio 89

Tabla 3.16. Datos obtenidos para pruebas de laboratorio del rendimiento de los tipos de cuesco de palmiste activado a diferentes temperaturas y tiempos 95

Tabla 3.17. Tamices que definen el tamaño del cuesco de palmiste 100

Tabla 3.18. Tamices de dureza 100

Tabla 3.19. Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos. Escala piloto 102

Tabla 3.20. Índice de Yodo de los carbones activado de los dos tipos de cuesco de palmiste 106

Tabla 3.21. Índice de azul de metileno para los carbones activados producidos a 3 h 109

Tabla 3.22. Índice de decoloración de azúcar para los carbones activados producidos a 3 h 110

Tabla 3.23. Grupos funcionales oxigenados de las muestras de carbón activado durante 3 h, datos obtenidos mediante titulación Boehm 111

Tabla 3.24. Valores cinéticos de la reacción de activación química de los tipos de cuesco de palmiste obtenidos a partir de las Figuras 3.43 y 3.44 115

Tabla 3.25. Producción de palma africana en el Ecuador 117

Tabla 3.26. Dimensiones del horno rotatorio para producir carbón activado a partir de cuesco de palmiste 118

Tabla 3.27. Número de Froude y regímenes de movimiento de material sólido 120

Tabla 3.28. Requerimientos energéticos del horno rotatorio para la producción de carbón activado a partir de cuesco de palmiste 121

Tabla 3.29. Composición de los gases de salida del horno 122

Tabla 3.30. Especificaciones de la trituradora de mandíbulas usada para la reducción de tamaño del cuesco de palmiste 123

Tabla 3.31. Especificaciones de la trituradora de rodillos usada para la reducción de tamaño del cuesco de palmiste 124

Tabla 3.32. Dimensiones del reactor 125

Tabla 3.33. Dimensiones del tanque de almacenamiento de cloruro de zinc 125

Tabla 3.34. Dimensiones del tanque de lavado del carbón activado 126

Tabla 3.35. Dimensiones de la cámara de enfriamiento 126

Tabla 3.36. Dimensiones de la cámara de secado 127

Tabla 3.37. Dimensiones del caldero 128

Tabla 3.38. Dimensiones de los tanques de reserva de combustible 128

Tabla 3.39. Dimensiones de la cámara de post-combustión 129

Tabla 3.40. Distribución de la planta según la Figura 3.46 130

Tabla 3.41. Gastos de inversión 134

Tabla 3.42. Maquinaria y equipo usado en el proceso de implementación de la planta 135

Tabla 3.43. Costos de materia prima e insumos 135

Tabla 3.44. Costos anuales de producción 136

Tabla 3.45. Indicadores económicos obtenidos para la producción de carbón activado de cuesco de palmiste 136

Tabla AI.1. Dimensiones del cuesco de palmiste tipo Tenera tomadas en el muestreo 151

Tabla AI.2. Dimensiones del cuesco de palmiste tipo Dura tomadas en el muestreo 152

Tabla AII.1. Ensayo granulométrico del cuesco de palmiste triturado tipo Tenera 153

Tabla AII.2. Ensayo granulométrico del cuesco de palmiste triturado tipo Dura 154

Tabla AIII.1. Ensayo de determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo de la materia prima 156

Tabla AIII.2. Resultados del ensayo de determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo de la materia prima 156

Tabla AIII.3. Ensayo de determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo de ambos tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos 158

Tabla AIII.4. Resultados de los ensayos de determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo de ambos tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos 159

Tabla AIII.5. Ensayo de determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado producido a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos 160

Tabla AIII.6. Resultados de los ensayos de determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado producido a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos 161

Tabla AIII.7. Ensayo de determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado producido a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos 163

Tabla AIII.8. Resultados de los ensayos de determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado producido a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos 164

Tabla AIV.1. Ensayo de determinación de la densidad real de la materia prima 165

Tabla AIV.2. Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza de la materia prima 165

Tabla AIV.3. Ensayo de determinación de la densidad real de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio 166

Tabla AIV.4. Ensayo de determinación de la densidad aparente y dureza de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio 167

Tabla AIV.5. Ensayo de determinación de la densidad real del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio 168

Tabla AIV.6. Ensayo de determinación de la densidad aparente y de la dureza Del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio 169

Tabla AIV.7. Ensayo de determinación de la densidad real del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos a escala de piloto 171

Tabla AIV.8. Ensayo de determinación de la densidad aparente y de la dureza del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos a escala de piloto 173

Tabla AV.1. Ensayo de determinación del rendimiento del cuesco de palmiste carbonizado a 400, 500 y 600 ºC 174

Tabla AV.2. Rendimiento de la activación de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos 175

Tabla AVI.1. Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para activar los tipos de cuesco de palmiste 176

Tabla AVII.1. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,4 179

Tabla AVII.2. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,5 181

Tabla AVII.3. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,6 183

Tabla AVII.4. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido en atmósfera reductora (λ=0,9) 185

Tabla AVII.5. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido en atmósfera oxidante (λ=1,1) 187

Tabla AVIII.1. Determinación de la curva de calibración de la absorbancia para la determinación del índice de azul de metileno para carbón activado 189

Tabla AIX.1. Determinación del índice de decoloración de azúcar del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols 190

Tabla AIX.2. Titulación Boehm para determinar los grupos funcionales del cuesco de palmiste tipo Tenera y Dura carbonizado 191

Tabla AIX.3. Titulación Boehm para determinar los grupos funcionales del carbón activado producido a nivel laboratorio 192

Tabla AIX.4. Titulación Boehm para determinar los grupos funcionales del a escala piloto en el horno Nichols 194

Tabla AX.1. Datos obtenidos para la elaboración de la curva TGA de los tipos de cuesco de palmiste 195

Tabla AXI.1. Datos obtenidos para la determinación del ángulo de reposo de los tipos de cuesco de palmiste 196

Tabla AXI.2. Calores de formación estándar de los compuestos en la combustión del GLP 198

Tabla AXI.3. Calores de reacción de los compuestos que conforman el GLP 199

Tabla AXI.4. Condiciones iniciales del caldero 218

Tabla AXI.5. Pérdidas en los equipos 218

Tabla AXI.6. Composición del diésel II 218

Tabla AXI.7. Composición de los gases 224

Tabla AXI.8. Balance de energía de los gases de salida 229

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1.1. Partes del fruto de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) 2

Figura 1.2. Tipos y partes del fruto de palma de aceite 6

Figura 1.3. Estructura química de la celulosa 9

Figura 1.4. Estructura química de la hemicelulosa 9

Figura 1.5. Estructura química de la lignina 10

Figura 1.6. Esquema del balance de masa del proceso de extracción del aceite de palma 12

Figura 1.7. Esquema de rutas de reacción durante la pirólisis de celulosa 18

Figura 1.8. Secuencia de reacciones de pirolisis de biomasa, esquema propuesto por Evans y Milne 19

Figura 1.9. Pirólisis de lignina, celulosa y hemicelulosa tomadas con un DSC 20

Figura 1.10. Carbonización de cuesco de palma de aceite en un equipo de Termogravimetría 22

Figura 1.11. La sección transversal de diferentes tipos de fibras bajo aumento (4x) 22

Figura 1.12. Curvas experimentales de la variación de la masa y las curvas correspondientes del flujo de masa de reacción durante la pirólisis de cuesco de palma en atmósfera inerte de N_2 y en una atmósfera de vapor de agua (30% H_2O Vol.) en función de la temperatura 24

Figura 1.13. a) Generación de CO_2, CO, b) Generación de CH_4 y H_2, durante la pirólisis de cuesco en atmósfera inerte (N_2) y de vapor de agua en función de la temperatura 24

Figura 1.14. Modelo de conversión progresiva 28

Figura 1.15. Modelo de núcleo sin reaccionar 29

Figura 1.16. Estructura química del carbón activado 33

Figura 1.17. Esquema general de la preparación de carbón activado mediante activación química 34

Figura 1.18. Pérdida de peso durante la carbonización de dos materias primas, pepas de durazno y cáscaras de almendras, y la evolución de la densidad aparente de las pepas de durazno 37

Figura 1.19. Efecto de la temperatura de carbonización sobre el área de superficie y la densidad aparente de pepas de durazno impregnadas con $ZnCl_2$ 38

Figura 1.20. Efecto del contenido de Zn en el precursor (X_{Zn}) y efecto de la evaporación después de la impregnación 39

Figura 1.21. Rendimiento de carbonización (residuo sólido) en función de la temperatura de impregnado con $ZnCl_2$ lignina kraft 40

Figura 2.1. Esquema del horno Nichols-Herreshoff mono solera 53

Figura 3.1. Curva TGA y DTGA del cuesco de palmiste 67

Figura 3.2. Densidad aparente del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a diferentes temperaturas, pruebas de laboratorio 69

Figura 3.3. Densidad aparente del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a diferentes temperaturas, pruebas de laboratorio 69

Figura 3.4. Densidad real del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a diferentes temperaturas, pruebas de laboratorio 70

Figura 3.5. Densidad real del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a diferentes temperaturas, pruebas de laboratorio 71

Figura 3.6. Porcentaje de dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en pruebas de laboratorio en función del tiempo a diferentes temperaturas 72

Figura 3.7. Porcentaje de dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en pruebas de laboratorio en función del tiempo a diferentes temperaturas 73

Figura 3.8. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a 400ºC para pruebas de laboratorio 75

Figura 3.9. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a 400ºC para pruebas de laboratorio 75

Figura 3.10. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a 500ºC para pruebas de laboratorio 76

Figura 3.11. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a 500ºC para pruebas de laboratorio 77

Figura 3.12. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste Carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a 600ºC para pruebas de laboratorio 78

Figura 3.13. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a 600 ºC para pruebas de laboratorio 78

Figura 3.14. Densidad aparente del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes temperaturas en función del tiempo, pruebas de laboratorio 84

Figura 3.15. Densidad aparente del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes temperaturas en función del tiempo, pruebas de laboratorio 85

Figura 3.16. Densidad real del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes temperaturas en función del tiempo, pruebas de laboratorio 86

Figura 3.17. Densidad real del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes temperaturas en función del tiempo, pruebas de laboratorio 86

Figura 3.18. Porcentaje de dureza del cuesco de palmiste activado tipo Tenera en pruebas de laboratorio en función del tiempo a diferentes temperatura 88

Figura 3.19. Porcentaje de dureza del cuesco de palmiste activado tipo Dura en pruebas de laboratorio en función del tiempo a diferentes temperaturas 88

Figura 3.20. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a 450ºC para pruebas de laboratorio 91

Figura 3.21. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a 450ºC para pruebas de laboratorio 91

Figura 3.22. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a 500ºC para pruebas de laboratorio 92

Figura 3.23. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a 500ºC para pruebas de laboratorio 92

Figura 3.24. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a 600ºC para pruebas de laboratorio 93

Figura 3.25. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a 600ºC para pruebas de laboratorio 94

Figura 3.26. Densidad aparente del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto 97

Figura 3.27. Densidad aparente del carbón activado a partir del cuesco de Palmiste tipo Dura a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto 97

Figura 3.28. Densidad real del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto 98

Figura 3.29. Densidad real del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto 99

Figura 3.30. Porcentaje de dureza del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto 100

Figura 3.31. Porcentaje de dureza del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto 101

Figura 3.32. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a λ= 0,9, escala piloto 104

Figura 3.33. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a λ= 0,9, escala piloto 104

Figura 3.34. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a λ= 1,1, escala piloto 105

Figura 3.35. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a λ= 1,1, escala piloto 105

Figura 3.36. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo, escala piloto 107

Figura 3.37. Índice de yodo del carbón activado tipo Dura en función del tiempo, escala piloto 108

Figura 3.38. Fotografías MEB del carbón activado de cuesco de palmiste tipo Tenera a 3 h a diferentes aumentos: a) 500, b) 1000 112

Figura 3.39. Fotografías MEB del carbón activado de cuesco de palmiste tipo Dura a 3h a diferentes aumentos: a) 500, b) 1000 112

Figura 3.40. $\frac{dx}{dt}$ en función de $(1-x)$ para los datos obtenido del porcentaje de carbón fijo en el carbón activado de cuesco de palmiste tipo Tenera 114

Figura 3.41. $\frac{dx}{dt}$ en función de $(1-x)$ para los datos obtenido del porcentaje de carbón fijo en el carbón activado de cuesco de palmiste tipo Dura 114

Figura 3.42. Diagrama de bloques del proceso de producción de carbón activado a partir de cuesco de palmiste mediante activación química con cloruro de zinc 116

Figura 3.43. Esquemas de los diferentes regímenes de movimiento de material sólido al interior de un horno 120

Figura 3.44. Distribución en planta 131

Figura 3.45. Corte en "A" de la planta de producción 132

Figura 3.46. Diagrama de flujo 133

Figura AI.1. Dimensiones del cuesco de palmiste tomadas en el muestreo 150

Figura AII.1. Curva granulométrica para el cuesco de palmiste tipo Tenera 154

Figura AII.2. Curva granulométrica para el cuesco de palmiste tipo Dura 155

Figura AVII.1. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,4 180

Figura AVII.2. Índice de yodo del carbón activado tipo Dura producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,4 180

Figura AVII.3. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,5 182

Figura AVII.4. Índice de yodo del carbón activado tipo Dura producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,5 182

Figura AVII.5. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,6 184

Figura AVII.6. Índice de yodo del carbón activado tipo Dura producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,6 184

Figura AVII.7. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera y Dura producido a escala piloto en atmósfera reductora (λ=0,9) 186

Figura AVII.8. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera y Dura producido a escala piloto en atmósfera oxidante (λ=1,1) 188

Figura AVIII.1. Curva de calibración de la absorbancia para la determinación del índice de azul de metileno para carbón activado 189

Figura AXI.1. Gráfico para la determinación del ángulo de reposo de los tipos de cuesco de palmiste 196

Figura AXI.2. Diagrama de bloques del proceso de reducción y clasificación 202

Figura AXI.3. Diagrama de la pila stock 204

Figura AXI.4. Diagrama del tanque de reserva de la solución de cloruro de zinc 209

Figura AXI.5. Diagrama del tanque de lavado para el carbón activado 210

Figura AXI.6. Diagrama de bloques del caldero 219

Figura AXI.7. Diagrama del tanque de reserva de GLP 226

ÍNDICE DE ANEXOS

PÁGINA

ANEXO I
Muestreo del cuesco de palmiste 150

ANEXO II
Determinación del d_{80} para la materia prima molida en la trituradora de mandíbulas 153

ANEXO III
Fichas técnicas contenido de volátiles cenizas y carbón fijo 156

ANEXO IV
Fichas técnicas de densidad real, densidad aparente y dureza 165

ANEXO V
Fichas técnicas de rendimiento 174

ANEXO VI
Fichas técnicas del uso del horno Nichols Herreshoff mono solera 176

ANEXO VII
Fichas técnicas de determinación del índice de yodo del carbón activado producido 179

ANEXO VIII
Curva de calibración de la absorbancia para la determinación del í ndice de azul de metileno para carbón activado 189

ANEXO IX
Fichas técnicas de caracterización del carbón activado producido 190

ANEXO X
Determinación de la cinética de carbonización y activación 195

ANEXO XI
Dimensionamiento de equipos 196

RESUMEN

Se estudia la alternativa de producción de carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste Tenera y Dura, mediante la activación química con cloruro de zinc. Se estableció la influencia del espesor de cada tipo de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, sobre las condiciones de carbonización con respecto a la dureza y a la superficie específica del carbón obtenido. Para dicho proceso 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 ($\lambda < 1$) y atmósfera oxidante ($\lambda > 1$).

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 y temperatura de carbonización a partir de la relación entre el porcentaje de carbón fijo y la dureza en función del tiempo, la concentración óptima de solución química activante y el tiempo de activación a partir de la superficie específica por medio del índice de yodo.

Se realizaron pruebas de activación para los dos tipos de cuesco de palmiste en diferentes temperaturas, 450, 500 y 600 ºC, en un tiempo de 90 minutos producidos a nivel de laboratorio en una mufla SEPOR INC obteniendo un porcentaje de carbón fijo producido para el cuesco tipo Tenera de 26,1 % y para el cuesco tipo Dura de 46,8 %, y una dureza de 72,4 % para el cuesco tipo Tenera y de 63,6 % para el cuesco tipo Dura.

El carbón activado producido en atmosfera reductora y oxidante a 500 ºC durante 180 minutos en el horno Nichols Herreshoff posee grandes propiedades adsortivas, sin embargo no existe una diferencia significativa entre ambas atmosferas, por lo cual solo se consideró la atmosfera reductora para su estudio, obteniendo para el cuesco tipo Tenera un índice de yodo de 582 mg I_2/g CA, índice de azul de metileno de 23/100 g CA y un índice de decoloración de azúcar de 149 UBR, para el cuesco tipo Dura un índice de yodo de 657 mg I_2/g CA, índice de azul de metileno de 28/100 g CA y un índice de decoloración de azúcar

de 149 UBR, lo que significa que el cuesco de palmiste es un material muy poroso.

Con los datos de la carbonización obtenidos en el equipo de termogravimetría se obtuvo la cinética de pirolisis. La constante cinética de activación en el horno Nichos Herreshoff para el cuesco tipo Tenera fue de 7,70 10^{-2} cm^3 gas/mol*s y para el cuesco tipo Dura fue de 1,30 10^{-1} cm^3 gas/mol*s.

Con estos parámetros definidos se diseñó una planta de producción de carbón activado para una producción de 20 t/mes. Se diseñó un reactor para la impregnación de la solución de cloruro de zinc en el cuesco de palmiste y un horno rotatorio que active el cuesco.

Se realizó un estudio económico preliminar de la implementación de la planta. Se determinó que con una inversión de 156 000 USD, se tendría una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 15 % con un Valor Actual Neto (VAN) de 51 956,03 USD, calculados a un horizonte de 10 años, lo que significa que el proceso es rentable.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la fibra y el cuesco de la palma africana son materiales llamados desechos, estos son causantes de contaminación ambiental debido a la carencia de alternativas que conlleven al aprovechamiento en procesamientos industriales. Debido a la dureza del cuesco se lo ha utilizado como sub-base granular en las vías de acceso a las plantaciones (Reyes y Ortiz, 2008, p. 2).

La utilización de tecnologías de energías renovables como la obtenida a partir de la biomasa se presenta como alternativas para el reemplazo de los combustibles fósiles. La palma africana hoy en día se presenta como una excelente opción cuando las fuentes alternas de abastecimiento energético (Borrero, 2006, p. 2).

La producción de palma africana en el Ecuador, según FEDAPAL, fue de 152 537 t en el año 1993, desde la fecha señalada la producción de palma africana se ha incrementado en un 293 % y llegando a ser de 447 667 t en el año 2009. El consumo de palma africana a nivel nacional está alrededor de los 210 000 t, dejando aproximadamente 235 667 t de excedentes, mismos que son exportados a otros países (Muñoz, 2010, p. 2). Para el 2019 se considera que la superficie sembrada de palma africana en el Ecuador sea de alrededor de 391 000 ha (Muñoz, 2010, p. 3).

La biomasa que produce la palma africana es de 200 millones de toneladas por año (la biomasa se puede elaborar a partir de cascarilla de arroz, aserrín, bagazo de caña, palma africana, cáscaras de frutos secos y desechos de la industria alimentaria) y de ello tan solo se utiliza el 10 % (Borrero, 2006, p. 2)

La utilización de la biomasa residual que se genera durante el proceso de extracción del aceite de palma puede ayudar a hacer más eficiente dicho proceso al proveer la energía térmica necesaria para el mismo y puede ayudar al desarrollo de aplicaciones comerciales y ambientalmente limpias para productos que actualmente se consideran desechos.

Este es el caso del endocarpio del fruto de la palma de aceite, que se lo conoce como cuesco de palmiste (Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 2).

Entre los principales usos que se pueden dar a esta biomasa residual está la producción de carbón activado, el mismo que da un valor económico a la materia prima, permite la reutilización del cuesco y genera una alternativa de menor costo, lo 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 (Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2011, p. 164).

El consumo mundial de carbones activados en el año 2007 se aproximó a 0,9 millones de toneladas, con un crecimiento estimado de 5,2 % por año, en el año 2012 se tuvo un consumo de 1,2 millones de toneladas (Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 1)

La producción de carbón activado se realiza por activación física con H_2O y CO_2 y activación química con H_3PO_4 y Cl_2Zn, sin embargo la información respecto a este último es bastante limitado.

El objetivo general del presente proyecto de titulación consiste en el diseño de una planta de producción de 20 t/mes de carbón activado de cuesco de palmiste mediante activación química con cloruro de zinc. Para esto es importante encontrar las mejores condiciones de carbonización y activación. 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

1.1. CARACTERÍSTICAS DEL CUESCO DE PALMISTE

La Palma Africana está en el orden *Palmales,* familia *Palmaceae,* género *Elaeis* y especie *Eleia. guineensis Jac.* Es una monocotiledónea. Su nombre se deriva del griego *Eleia*, que quiere decir oliva, por sus frutos ricos en aceite, y de *guineensis* por la procedencia de su zona de origen. (Industrializadora Oleofinos, 2010)

Además de la especie *Elaeis guineensis,* se debe mencionar al nolí o palma americana de aceite. Este último se ha cruzado con la palma de aceite produciendo híbridos en los cuales se mejoran las características de ambos progenitores.

La palma africana proviene del Golfo de Guinea (África occidental) y su siembra se extiende hasta 15° de latitud norte y sur. Es propia de la región tropical calurosa, crece a altitudes por debajo de los 500 m sobre el nivel del mar, aunque en regiones pantanosas se desarrolla bien. Es una planta perenne, vive más de 100 años, pero bajo cultivo solo se le permite llegar hasta los 25 años, ya que es ahí cuando alcanza los 12 m de altura. En su estado natural llega a superar los 40 metros. (Industrializadora Oleofinos, 2010)

Su tallo es erguido y tiene la forma de un cono invertido. Antes de envejecer es áspero, pero cuando llega a la vejez se vuelve liso y se presenta segmentado por las cicatrices que le imprimen sus cerca de cuarenta hojas al marchitarse y caer.

La clasificación de la palma africana en variedades se basa principalmente en la forma, color y composición del fruto, y en la forma de la hoja.

Se representa el fruto de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*) con sus partes constitutivas. El cuesco o endocarpio es un material duro que protege la almendra y constituye un residuo del proceso de extracción del aceite de palma. (Industrializadora Oleofinos, 2010)

Las partes del fruto son:

1) Estigma
2) Exocarpo
3) Mesocarpo o pulpa
4) Endocarpo o cuesco
5) Endospermo o almendra
6) Embrión

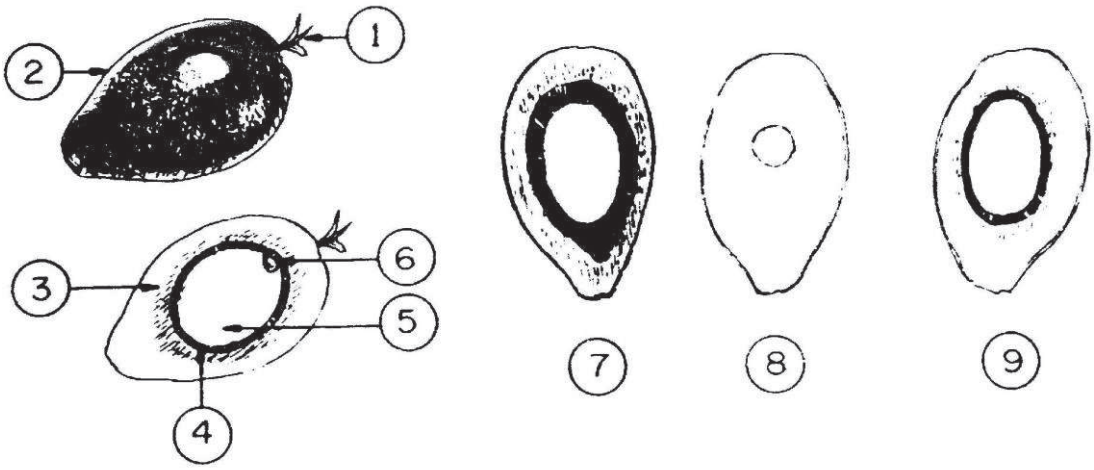


Figura 1.1. Partes del fruto de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*)
(Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 6)

El pericarpio está conformado por el epicarpo y mesocarpo juntos, de donde se extrae la mayor proporción de aceite. Los frutos son de color violeta oscuro, casi negro, luego adquieren un llamativo color anaranjado rojizo dado por la madurez de este (Industrializadora Oleofinos, 2010). El fruto maduro tiene un peso de 10 g, forma ovalada de aproximadamente 3 a 5 cm de largo y es de color rojo amarillento; en su interior guardan una única semilla, la almendra o palmiste, que protegen con el cuesco, que es un endocarpio o hueso leñoso rodeado a su vez por una pulpa carnosa. Ambas, almendra y pulpa, proveen aceite con generosidad. La primera, el de palmiste y la segunda, el aceite de palma propiamente dicho.

Una palma puede producir de 12 a 13 racimos por año, con peso promedio de 20 a 30 kg, de 1 000 a 3 000 frutos por racimo y un rendimiento industrial que varía entre el 20 y 25 % del peso en kg de aceite por racimo.

Dentro del cultivo de una gama de semillas de oleaginosas, el cultivo de la palma africana es aquel que mayor cantidad de aceite produce por hectárea. El fruto posee un contenido del 50 %, existe la posibilidad de que rinda de 3 000 a 5 000 kg de aceite de pulpa por hectárea, más 600 a 1 000 kg de aceite de palmiste.

La producción mundial de aceite de palma se estima en más de 3 000 millones de toneladas métricas. Los principales países productores de este son: Malasia, Nigeria, Indonesia, Zaire, Costa de Marfil. En la actualidad existen plantaciones con alta tecnificación en Colombia, Ecuador, Perú, Brasil, Costa Rica, Venezuela y México (Industrializadora Oleofinos, 2010).

1.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

- Tiene 16 pares de cromosomas
- Pertenece a la familia Palmaceae
- Es una planta monocotiledónea (Su semilla tiene un solo Cotiledón o almendra)
- Pertenece al orden de las Palmales
- Es una planta Monoica (las flores femeninas y masculinas, se producen independientes, en una misma planta)
- Es Alogama, pues su polinización es cruzada (Borrero C., 2006)

1.1.2. ANATOMIA Y FISIOLOGIA DE LA PALMA

1.1.2.1. Raíces

Al tratarse de una planta monocotiledónea, el sistema radicular se expande a partir de un bulbo que está ubicado debajo del tallo. Su función es la absorción de nutrientes y agua del suelo.

1.1.2.2. Tallo de la palma

También llamado estípite, es la estructura encargada de comunicar las raíces con el penacho de hojas que lo coronan. Contiene en su interior los haces basculares (floema y xilema), por donde circula el agua y los nutrientes. En su parte central alberga el punto de crecimiento o meristemo apical (Borrero C., 2006)

Las palmas crecen en promedio de 30 a 60 cm por año. La función del tallo es la conducción de nutrientes y agua hacia órganos.

1.1.2.3. Hojas

Las hojas funcionales están compuestas de un pecíolo de 1.5 m aproximadamente, con espinas laterales, luego está el Raquis, que soporta los 200 a 300 folíolos insertos en las caras laterales, donde se alternan. En condiciones normales las palmas adultas tienen entre 30 y 49 hojas funcionales.

La filotaxia o distribución de las hojas indica que ellas están dispuestas en 8 espirales respecto del eje vertical. Su función es la fotosíntesis y producción.

1.1.2.4. Inflorescencias

Por su condición de Monoica, la palma de aceite produce separadamente flores masculinas y femeninas sobre el mismo árbol. Cada hoja que produce la palma trae en su axila una inflorescencia sin sexo definido (Borrero C., 2006)

Las flores masculinas, están compuestas de 100 a 160 espigas, cada una de ellas tiene entre 10 y 20 cm de largo y de 700 a 1 200 flores, son las encargadas de proveer el polen, en conjunto proveen entre 30 y 60 gramos de polen.

Las flores femeninas, también insertadas en espiguillas y dispuestas en espiral alrededor del raquis o pinzote, pueden estar distribuidas hasta 110 espigas y alcanzar la cantidad de 4 000 flores aptas para ser polinizadas.

1.1.2.5. Frutos

Son de forma ovoide, con una longitud de 3 a 6 cm y cuentan con un peso aproximadamente de 5 a 12 gramos. Tienen la piel lisa y brillante (exocarpio), las células con aceite son parte de una pulpa o tejido fibroso (mesocarpio), una nuez o semilla compuesta por un cuesco lignificado (endocarpio), y una almendra aceitosa o palmiste (endospermo) (Borrero C., 2006)

1.1.3. TIPOS DE PALMA AFRICANA DE ACEITE

Los tipos más relevantes de palma africana se disponen según el grosor del cuesco o endocarpio del fruto, el grosor del cuesco es muy importante porque está íntimamente relacionada con la producción de aceite. Se establece una clasificación de palma con el color de los frutos.

1.1.3.1. Tipos de acuerdo con el color del fruto

Racimos nigrescens: En los racimos jóvenes los frutos son de color violeta oscuro a negro y rojo ladrillo en estado de madurez.

Racimos virescens: En los racimos jóvenes los frutos son de color verde oliva y cuando maduran son anaranjado-rojizo claro.

1.1.3.2. Tipos según el espesor del fruto

Según el espesor del endocarpio, se sugiere una clasificación de la palma de aceite en tres tipos: Dura, Tenera y Psífera, que se ilustran en la Figura 1.2.

- Pisífera (P x P): Son palmas cuyos frutos son un cartílago blando, es decir no tienen cuesco. Palma gigante, carece de interés comercial.

- Dura (D x D): Se caracteriza por tener un cuesco de gran espesor, de 2 a 8 milímetros. Son poco rentables y competitivas.

- Tenera (D x P): Es una especie híbrida que tiene su origen en el cruzamiento de Dura con Pisífera, el cuesco del fruto es delgado y la proporción de la fruta bastante mayor, por ende el contenido de aceite es más abundante (Borrero C., 2006). La variedad Tenera tiene un potencial genético de rendimiento mayor que el de la Dura, esto se debe a que en ella la relación sexual es más amplia y además al mayor porcentaje de pulpa en los frutos, es decir, el porcentaje de inflorescencia femenina que produce es mayor que el de las masculinas. Se observa un anillo de fibras oscuras adyacente al cuesco que son su principal característica (Chávez y Rivadeneira, 2003, p. 9).

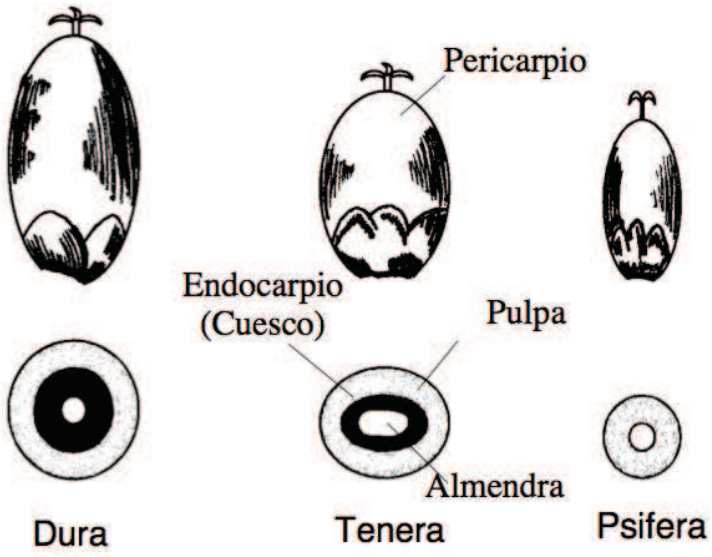


Figura 1.2. Tipos y partes del fruto de palma de aceite
(Gómez, Klose y Rincón, 2008, p. 8)

Tabla 1.1. Clasificación del fruto de palma de aceite según el espesor del endocarpio

Tipo	Espesor del Endocarpio (mm)	Fracción de la masa total (%)		
		Pulpa	Endocarpio (Cuesco)	Almendra
Dura	2 - 8	35-55	25-55	7-20
Macrocarya	6 - 8	30-40	40-60	10-15
Deli	2 - 5	60-65	30-32	8
Tenera	0,5 - 3	60-95	1-32	3-15
Psífera	Sin endocarpio	100	0	Mínimo

(Gómez, Klose y Rincón, 2008, p. 7)

En esta tabla se presenta la distribución de las fracciones de masa de pulpa, cuesco y almendra para cada uno de estos tipos.

1.1.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CUESCO DE PALMISTE

Se realizaron estudios comparativos entre algunos materiales lignocelulósicos, obteniendo los siguientes resultados.

La Tabla 1.2 muestra el porcentaje de varios componentes químicos presentes en aceite de hoja de palma, fibra de coco, hoja de piña, y fibra de tallo de plátano. En cuanto a la transformación de la madera, mayor contenido de extractos de etanol-benceno en la fibra de tallo de plátano puede ser ventajoso para la resistencia a la descomposición y proporcionará una buena resistencia en el procesamiento de la fibra, debido a su mayor peso específico.

Tabla 1.2. Composición química de diferentes fibras lignocelulósicas

	Palma	**Coco**	**Hoja 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
α-celulosa (%)	49,8	44,2	73,4	63,9	30 – 60	31 – 64
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)

Generalmente, las fibras de coco contienen el porcentaje más alto de lignina (32,8 %) siguiéndole las fibras de la palma (20,5 %). En general, el alto contenido de lignina en fibra de palma hace que la fibra sea resistente y más rígida, en comparación con otras fibras. Esto es debido a la lignina proporciona tejido de la planta y fibras individuales con resistencia a la compresión y se endurece la pared celular de las fibras, para proteger a los hidratos de carbono de productos químicos y el daño físico (Abdul-Khalil et al., 2006, p. 223, modificado).

La composición química del cuesco de palmiste depende de varios factores, que en primera instancia influencian el crecimiento de la planta y la producción del fruto.

Como se observa en la Tabla 1.2, el material orgánico que posee el cuesco de palmiste es significativo, lo que es muy importante para la producción de carbón activado, o simplemente para su uso como combustible.

En el cuesco de palmiste se encuentran 3 biopolímeros que están presentes en casi todos los materiales lignocelulósicos: lignina, celulosa y hemicelulosa.

A continuación se presentará de una manera más detallada la estructura química y propiedades de estas biomoléculas:

1.1.4.1. 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. 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 1.3 (Mogollón et al., 2008, p. 20); además forma fibras en los tallos y frutos (Grassino, 2003, p. 2).

La unión entre moléculas de glucosa se da a través de los enlaces ß-1,4-glucosídico, esto produce que la celulosa sea insoluble en agua (Hurtado y Gonzáles, 2009, p. 3). 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).

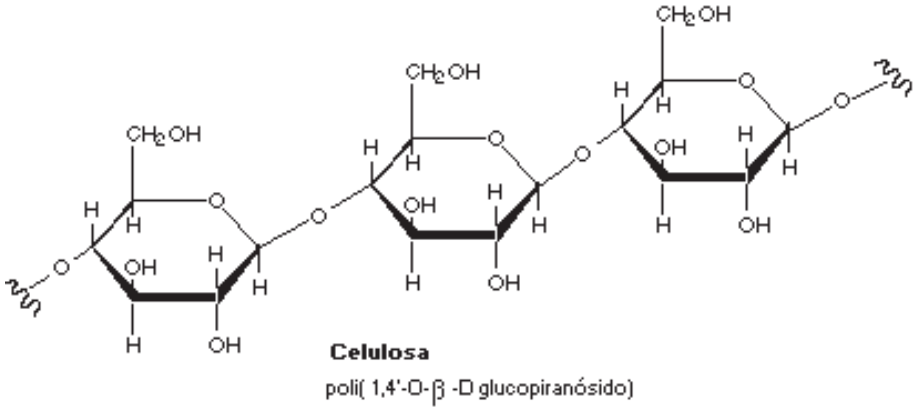


Figura 1.3. Estructura química de la celulosa
(Mogollón et al., 2008, p. 20)

1.1.4.2. 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, forma parte de las paredes de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace con la pectina (Mogollón et al., 2008, p. 23).

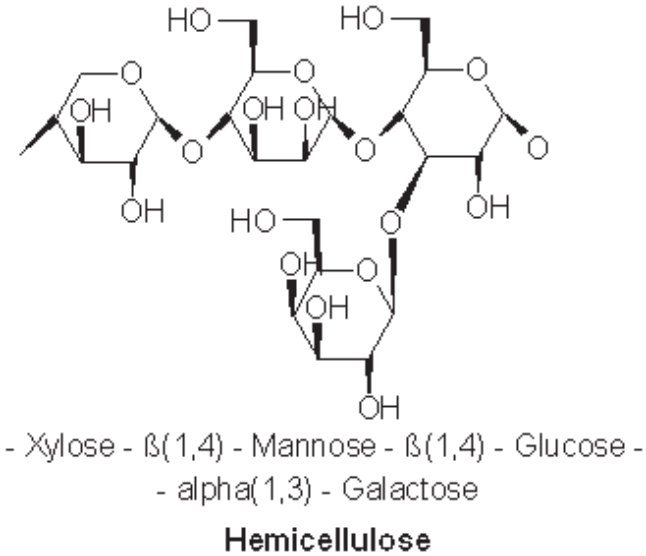


Figura 1.4. Estructura química de la hemicelulosa. (Mogollón, et al., 2008, p. 20)

1.1.4.3. 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 1.5.

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).

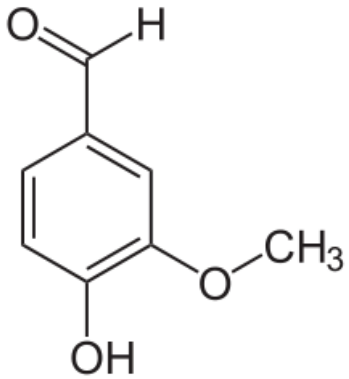


Figura 1.5. Estructura química de la lignina
(Mogollón et al., 2008, p. 20)

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

- Grupos metoxi (-OCH3): grupo más característico de las ligninas
- Grupos Hidroxilo (-OH): vienen de naturaleza variada, pueden ser provenientes de fenoles, alifáticos primarios, secundarios o terciarios.
- Grupos carbonil y carboxil
- Grupos éter (R-O-R), pueden ser de origen alifático o aromático
- Enlaces dobles (-C=C-)
- 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). La lignina es un polímero no deseable, y su extracción durante la fabricación de pasta requiere grandes cantidades de energía y de productos químicos.

1.1.5. BIOMASA DE PALMA AFRICANA

1.1.5.1. Reutilización de la biomasa

La biomasa (abreviatura de masa biológica) es la energía producida a partir de la madera, ya sea de árboles, deshechos de agricultura, deshechos animales o de residuos urbanos.

La palma africana produce 200 millones de toneladas de biomasa por año, de la cual se utiliza tan sólo el 10 %. Los frutos se los obtiene tan solo después de 4 a 5 años, estos árboles tienen un máximo de producción a la edad de 20 a 30 años. Se estima que cada hectárea produce 25 toneladas de desechos vegetales que pueden ser utilizadas para producir energía a partir de la biomasa (Industrializadora Oleofinos, 2010, p. 2).

El cuesco se obtiene de manera concentrada, lo que es una ventaja respecto a otros tipos de desechos (biomasa residual) que se presentan de manera dispersa y que implican costos elevados para su recolección y transporte hasta los sitios de procesamiento. La humedad con que se obtiene el cuesco depende de las condiciones del proceso de extracción y de la región geográfica. Un promedio para el porcentaje de humedad en el cuesco, se encuentra entre 5 – 20 % en relación a su propio peso. El cuesco es similar a las cáscaras de coco en su dureza y textura. Estas propiedades hacen del cuesco un material apropiado para la producción de carbón activado, como el que se obtiene a partir de las cáscaras de coco, las cáscaras de las nueces y las pepas de algunas frutas como el durazno y las olivas (Abdul-Khalil et al., 2006, p. 223, modificado)

En Malasia se ha producido carbón activado a partir del cuesco de palma desde hace varios años, aunque a bajas escalas de producción. Otros estudios recientes a nivel de laboratorio, hechos especialmente por investigadores de Malasia,

indican igualmente las buenas propiedades del cuesco para la producción de carbón activado a través de procesos de activación química y con gases.

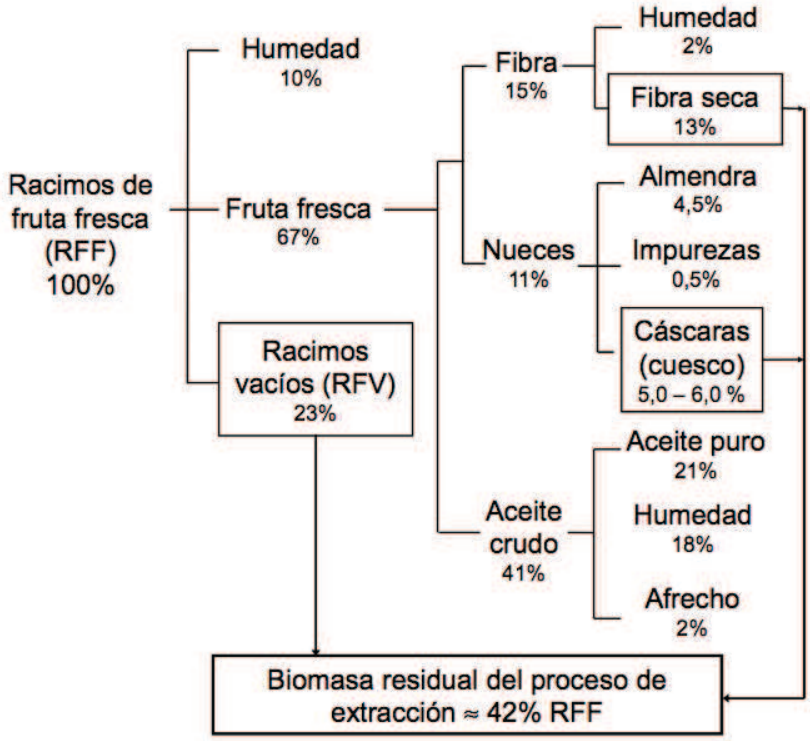


Figura 1.6. Esquema del balance de masa del proceso de extracción del aceite de palma (Gómez, Klose y Rincón, 2008, p.9)

La biomasa generada directamente en la plantación como plantas muertas y hojas de la palma no se han considerado en este trabajo en los balances presentados.

La biomasa residual del proceso, formada por los racimos de fruta vacíos, la fibra y el cuesco, constituye una cantidad aproximada del 42 % en masa de los racimos de fruta fresca (RFF). A través de los valores de las fracciones de masa indicadas en esa figura se hace un estimativo de la cantidad de biomasa residual según la producción de RFF para algunos países (Gómez, Klose y Rincón, 2010).

Tabla 1.3. Oferta mundial de aceite de palma y estimativo de la biomasa residual producida

Región	Aceite crudo (kt/año) (2009)	Participación (%)	Biomasa residual total (kt/año) (2009)			
			Total	Racimos vacíos	Fibra	Cuesco
Indonesia	21 500	47	44 080	24 730	13 980	5 380
Malasia	18 500	40	37 930	21 280	12 030	4 630
Tailandia	1 345	3	2 760	1 550	870	340
Nigeria	850	2	1 740	980	550	210
Colombia	780	2	1 600	900	510	200
Otros	3 100	7	6 360	3 570	2 020	780
Total	46 075	100	94 450	52 990	29 950	11 520

(Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 9)

1.1.5.2. Biomasa con fines energéticos

La eficiencia del proceso de extracción del aceite de palma puede verse mejorada con el uso del cuesco de palmiste con fines energéticos, además esto implica beneficios de carácter ambiental puesto que ayuda a la disminución del consumo de combustibles de origen fósil y su correspondiente emisión de dióxido de carbono.

Si se analiza a la biomasa en términos energéticos, esta se la emplea como energía renovable, como por ejemplo la leña, biodiesel, bioalcohol, biogas y bloque sólido combustible.

El contenido de la biomasa, como todos los seres vivos, es de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno, y por consiguiente la biomasa presenta potencial para la combustión. La energía en forma de calor y electricidad proviene de la combustión. Hoy en día esta fuente energética, entre la producción energética mundial (30 % en los países en desarrollo), representa el 14 % (Industrializadora Oleofinos, 2010, p. 2).

Si comparamos el rendimiento de la palma africana a nivel mundial expresado en su equivalente energético de la biomasa producida con el de otros cultivos, es

considerablemente mayor. Este rendimiento alcanza un valor de 156 000 MJ, mientras que la raíz de la batata (*Ipomoea batatas)* de 57, la raíz de la yuca (*Manihot esculenta)* de 49 y el grano de maíz de 51.

Cabe mencionar que cuando se presentan inconvenientes de abastecimiento energético por el petróleo, gas y carbón natural y demás fuentes naturales, es ahí donde las fuentes alternas empiezan a tener gran importancia, la palma africana se presenta como una buena alternativa.

1.1.5.3. Ventajas de uso de la biomasa

- Es una fuente de energía no contaminante.
- Eliminación de residuos orgánicos e inorgánicos, al mismo tiempo que les provee de una utilidad.
- Nos da el mismo confort con un 60% de ahorro.
- Es una fuente de energía renovable.
- Se limpian los bosques creando puestos de trabajo.
- Los precios de la biomasa son precios competitivos y no varían.
- CO_2 y CO neutro.
- Permite el autoconsumo, ya que con ella no se depende de la energía del exterior.
- Las emisiones que crea el efecto invernadero se ven disminuidas.

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 carbonización es un proceso que, partiendo de una determinada materia prima elimina las sustancias volatilizables no carbonáceas, produciendo una estructura fija de carbón con una porosidad primaria (Salvador, 1999, p. 15).

La carbonización y la pirólisis, ambos son términos que se refieren a la degradación térmica de la materia prima (biomasa), haciendo énfasis la carbonización en la formación del carbonizado y sus propiedades y la pirólisis en la formación y propiedades de la fase volátil.

1.2.1. PROCESO DE TRANSFORMACIÓN: PIRÓLISIS

En la transformación termoquímica de la biomasa, el proceso de pirólisis es de carácter fundamental. Las condiciones del proceso son trascendentales porque por una parte, determinan la distribución y características de los productos sólidos (incluyendo su estructura porosa), líquidos y gaseosos generados; por la otra, la pirólisis constituye las reacciones de inicio y acompañamiento de los procesos de combustión y gasificación del carbonizado. El desarrollo de la pirólisis define en gran medida las características y fracciones de los productos generados en los procesos secundarios (Gómez, Klose y Rincón, 2008, p. 10).

Parte de los estudios realizados han intentado asociar la degradación térmica de la biomasa en su estado original con la degradación térmica independiente de sus principales componentes: la hemicelulosa, la celulosa y la lignina. Sin embargo, en el proceso de extracción de estos componentes de la biomasa se rompen enlaces químicos y se modifica parcialmente su estructura. Este hecho impide obtener resultados representativos durante la pirólisis de cada uno de estos componentes, en comparación con su estado original en la biomasa. A estas dificultades se suman los efectos debidos a los extractos y a la ceniza presentes en la biomasa. Estos materiales catalizan las reacciones que se presentan durante el desarrollo de la pirólisis e influyen en la manera y proporción en que se generan sus productos: carbonizado, gas y condensado. Otros factores como el intervalo estrecho de temperatura en que se presenta la degradación térmica y el cambio simultáneo y rápido de las propiedades físicas y químicas del material procesado también complican los estudios para establecer los mecanismos y la cinética de reacción de la biomasa (Gómez, Klose y Rincón, 2008, p. 10).

1.2.2. TEMPERATURA DE PIRÓLISIS

En términos generales, la temperatura de pirólisis de cualquier material lignocelulósico oscila entre 450 y 750 ºC, sin embargo, dicha temperatura marca una serie de etapas por las que la materia prima a carbonizar debe pasare entre la temperatura ambiente y la temperatura final del proceso.

En el caso de materiales lignocelulósicos, dichas etapas pueden resumirse del siguiente modo:

- Hasta los 200 ºC, partiendo de la temperatura ambiente, se produce una etapa endotérmica en la que la materia prima pierde humedad.
- Entre los 200 y 270-280 ºC, se genera la producción y salida de gases oxidantes como CO, CO_2, vapor de agua, ácido acético, metanol, etc.
- A partir de los 280 ºC se da una etapa exotérmica que eleva la temperatura del proceso hasta los 350-380 ºC, etapa en donde existe la producción de alquitrán ligero.
- Entre 380 y 500 ºC, se tiene la formación de hidrocarburos gaseosos, observándose la formación de alquitranes pesados. En esta etapa la composición de la materia prima se ha transformado a un 85 % de carbón fijo.
- Finalmente cuando la temperatura oscila entre 500 y 700 ºC, se da una fase de disociación en la cual los gases aumentan su composición de hidrógeno con el aumento de la temperatura, produciéndose un incremento del porcentaje de carbón fijo (Salvador, 1999, p. 16).

La temperatura es el parámetro más influyente en el proceso de pirólisis, determinando la composición del material y sus características físico-químicas.

1.2.3. MECANISMOS DE REACCIÓN DE LA PIRÓLISIS DE BIOMASA

Un mecanismo de reacción describe de manera detallada la forma como se presentan las reacciones químicas durante un proceso y permite establecer la

variación de las propiedades químicas como la composición, la estructura y la energía de los reactantes, sus productos intermedios y los estados de transición durante el proceso. El mecanismo de reacción es además consistente con la estequiometria, que establece la relación entre las cantidades de sustancias que reaccionan en una reacción química particular y los productos que se forman; con la ley de velocidad o tasa de reacción y con el curso estereoquímico (referente a la química de los sólidos) de la reacción. En el caso de la pirólisis de la biomasa no se ha establecido un mecanismo de este tipo.

Una clasificación inicial de las variables del proceso de pirólisis puede hacerse entre aquellas que dependen de la estructura de la biomasa y las que dependen de su composición química. Se ha evaluado la influencia de la cristalinidad, el grado de polimerización (DP) y la orientación de las cadenas del material celulósico. Estos estudios han indicado que estas características afectan los mecanismos de reacción de la biomasa durante la pirólisis. No obstante, los efectos estructurales de la biomasa en la pirólisis rápida son mucho menores que los debidos a las impurezas inorgánicas presentes en la materia prima. La biomasa es muy sensible a los efectos catalíticos de la materia mineral o ceniza. La presencia de extractos también afecta el desarrollo de las reacciones durante la pirólisis.

A continuación se muestra un esquema de la secuencia de reacciones propuesta por Antal para la pirólisis de celulosa. (Gómez, Klose y Rincón, 2008, p. 29).

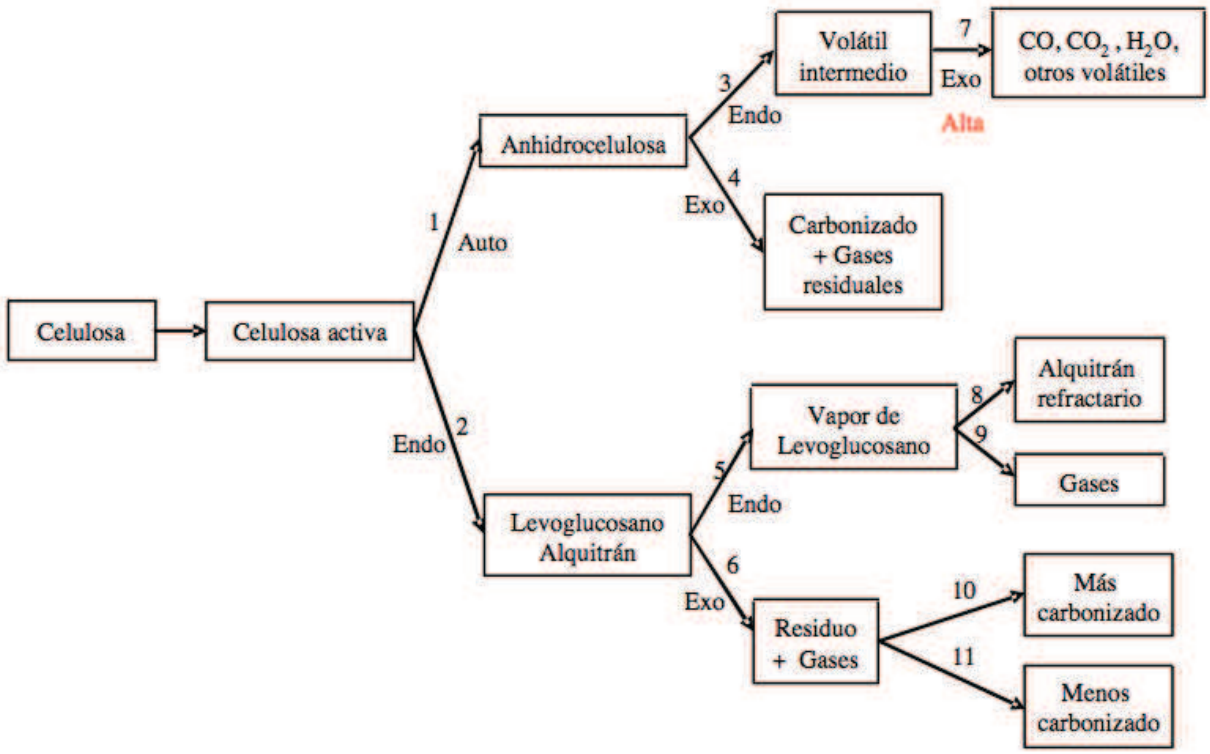


Figura 1.7. Esquema de rutas de reacción durante la pirólisis de celulosa. Los términos auto, endo y exo se refieren a reacciones autotérmicas, endotérmicas y exotérmicas, respectivamente
(Gómez, Klose y Rincón, 2008, p. 29)

1.2.4. PARÁMETROS DE LA PIRÓLISIS DE BIOMASA

Características físico - 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 1.8 muestra una secuencia de reacciones de pirolisis 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 et al., 2008, p. 33).

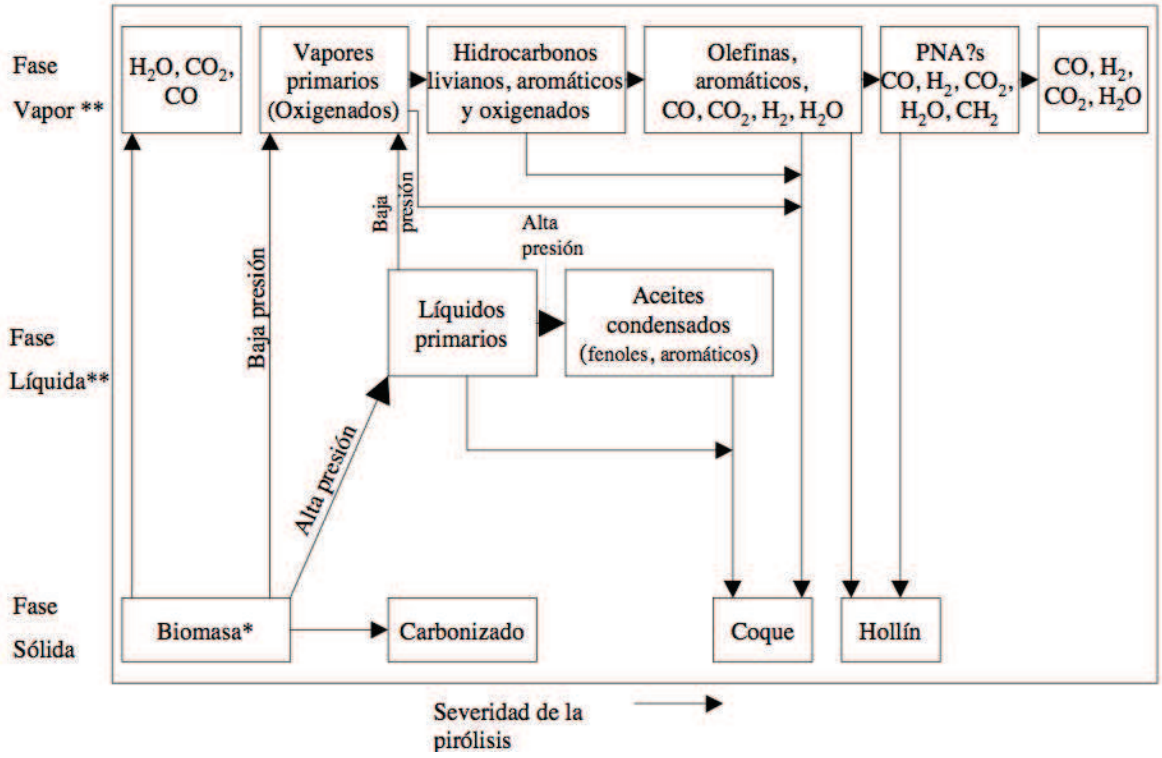


Figura 1.8. Secuencia de reacciones de pirolisis de biomasa, esquema propuesto por Evans y Milne (1987, p. 136, modificado)

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 pirolisis (Gómez et al., 2008, p. 33).

Del trabajo desarrollado ha sido posible establecer cualitativamente que la hemicelulosa es el componente más inestable térmicamente, siendo el primero en reaccionar. Luego lo hace la celulosa y a mayores temperaturas la lignina. El estudio del comportamiento de la degradación térmica de la celulosa ha recibido especial atención. Por una parte este es el mayor componente en peso de la biomasa y por la otra, se consigue en forma natural con elevados niveles de pureza. Este hecho permite aislar los efectos de catálisis ocasionados por el material inorgánico presente en la biomasa en su estado original.

1.2.5. TERMODINÁMICA DE PIROLISIS

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

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

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.

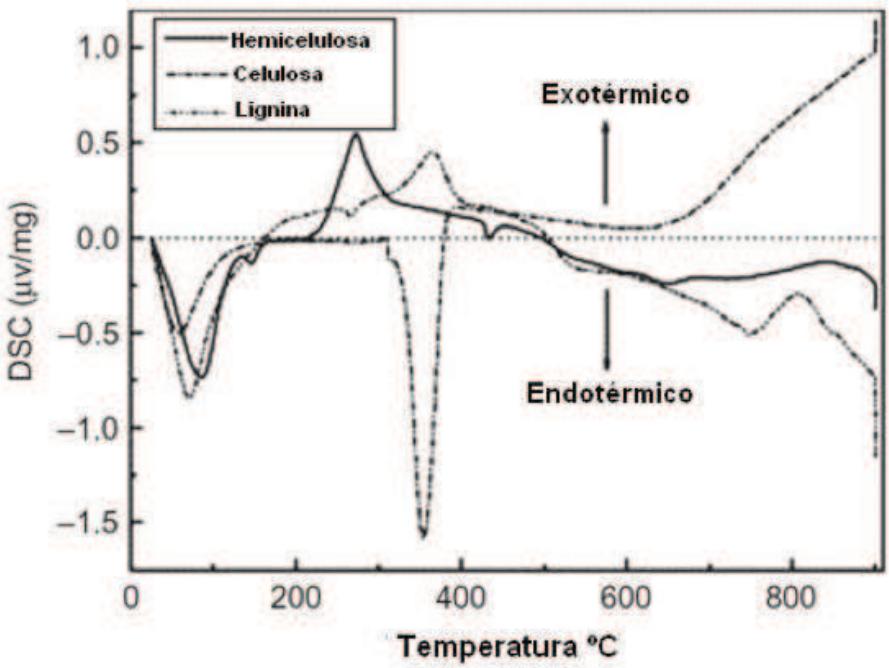


Figura 1.9 Pirolisis de lignina, celulosa y hemicelulosa tomadas con un DSC
(Yang, Yan, Chen, Lee y Zheng, 2007, p. 1 784, modificado)

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.

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \qquad \Delta H = -94{,}05 \quad kcal/mol \qquad 1.1$$

$$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO \qquad \Delta H = -26{,}40 \quad kcal/mol \qquad 1.2$$

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \qquad \Delta H = 41{,}25 \quad kcal/mol \qquad 1.3$$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 \qquad \Delta H = -67{,}65 \quad kcal/mol \qquad 1.4$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \qquad \Delta H = -57{,}80 \quad kcal/mol \qquad 1.5$$

$$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO \qquad \Delta H = 31{,}40 \quad kcal/mol \qquad 1.6$$

$$C + 2H_2O \rightarrow 2H_2 + CO_2 \qquad \Delta H = 21{,}55 \quad kcal/mol \qquad 1.7$$

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O \qquad \Delta H = 9{,}85 \quad kcal/mol \qquad 1.8$$

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \qquad \Delta H = -17{,}9 \quad kcal/mol \qquad 1.9$$

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.

1.2.6. CARBONIZACIÓN DEL CUESCO DE PALMISTE

Esta etapa del proceso es importante en la preparación de la estructura porosa para su posterior activación. También se debe resaltar que las condiciones en que se realiza la pirólisis de terminan la fracción en masa del material carbonizado.

En la Figura 1.10 se presenta la variación de la masa del cuesco de palma y la generación de productos durante un experimento de carbonización en un equipo de termogravimetría.

Durante la pirólisis se forma la estructura básica del carbonizado, que se consolida a temperaturas mayores (500-850 ºC). Simultáneamente durante el proceso de carbonización se presenta la contracción volumétrica de la partícula.

Al medir la capacidad de adsorción del material carbonizado se encuentran valores muy bajos, esto se debe a que tiene una estructura porosa poco

desarrollada ocupada parcialmente por alquitranes condensados durante la carbonización. Con la gasificación parcial y controlada se evacua este material de la estructura porosa y se permite la reacción adicional de la estructura carbonosa.

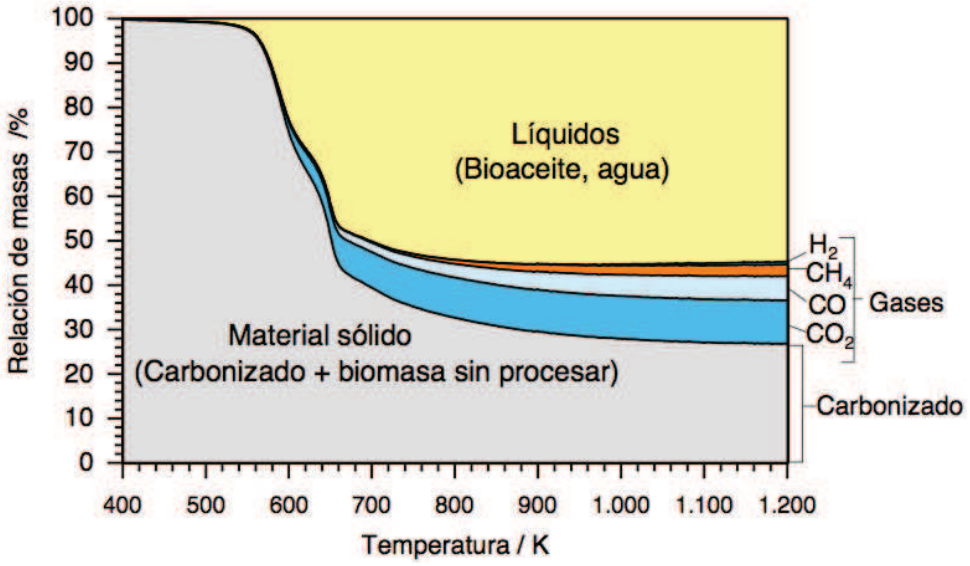


Figura 1.10. Carbonización de cuesco de palma de aceite en un equipo de termogravimetría (tasa de calentamiento 3 K/min)
(Gómez, Klose y Rincón, 2008, p. 12)

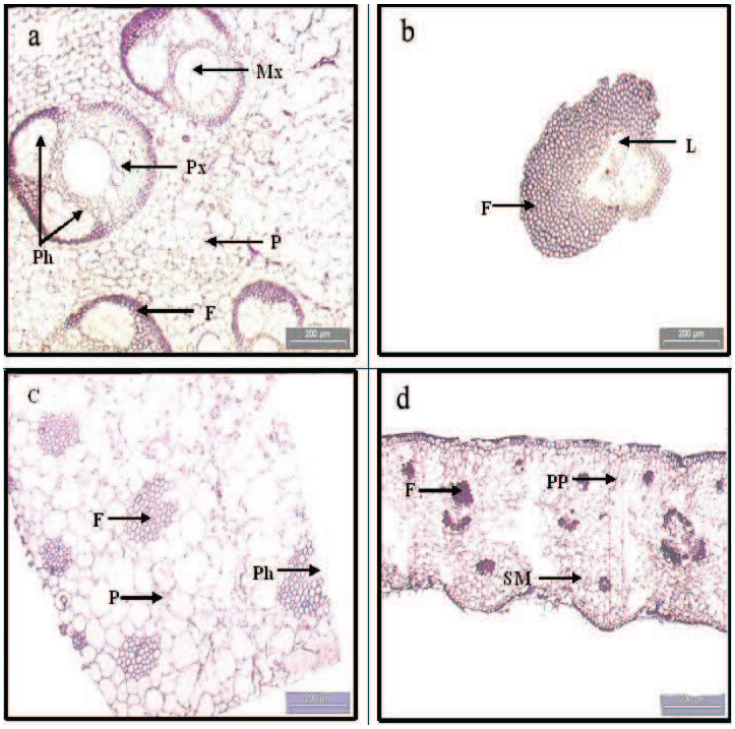


Figura 1.11. La sección transversal de diferentes tipos de fibras bajo aumento (4x). a)Aceite de hoja de palma b)Coco c)Tallo del plátano d)Hoja de piña. F Fibra; P parénquima; Mx metaxilema; Px protoxilema; Ph floema; L Lacuna, PP parénquima en empalizada; SM mesófilo esponjoso
(Abdul-Khalil et al., 2006, p. 224, modificado)

Análisis Termogravimétrico (TGA)

Este tipo de análisis permite la medición en continuo de la variación de la masa de una muestra de material en función de la temperatura, que puede incrementarse de manera continua o incluir escalones de tratamientos isotérmicos. Los análisis de termogravimetría se pueden realizar a nivel de laboratorio en diferentes escalas de procesamiento que van desde pocos miligramos hasta varios gramos de materia prima.

A continuación se presentan las características principales del proceso, obtenidas de un estudio de la pirólisis del cuesco de palma. Las condiciones experimentales de las pruebas presentadas se resumen en la Tabla 1.4. En las Figuras 1.12 y 1.13 se puede observar la variación de la pérdida de la masa y la generación de gases (CO_2, CO, CH_4 y H_2) para la carbonización con una tasa de calentamiento de 3 K/min, en atmósfera inerte y con vapor de agua.

Tabla 1.4. Condiciones experimentales de pruebas de carbonización de cuesco de palma con análisis termogravimétrico

Experimento	κ (K/min)	x (mm)	H (mm)	T_E (ºC)	a_{wf} (%)	H_2O (%)
TAG6	3	2 - 3	6	983	1,4	0
TGA14	10	2 - 3	6	268	1,5	0
TGA15	10	2 - 3	6	345	1,5	0
TGA16	10	2 - 3	6	500	1,5	0
TGA17	10	2 - 3	6	960	1,5	0
TGA18	10	2 - 3	6	855	1,5	0

(Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 13)

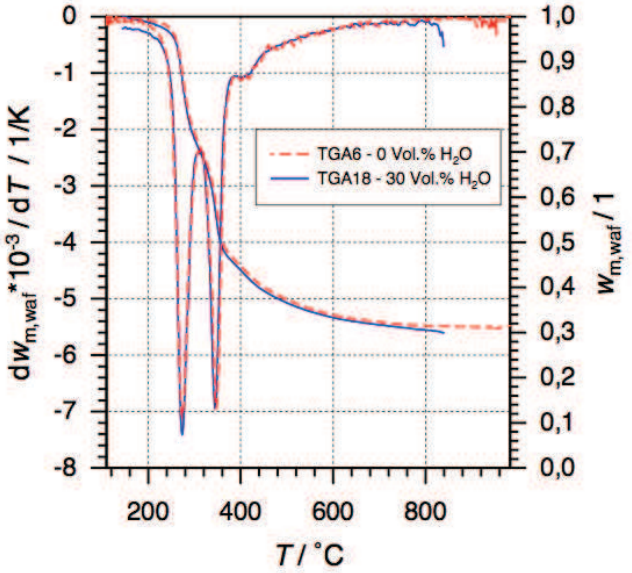


Figura 1.12. Curvas experimentales de la variación de la masa y las curvas correspondientes del flujo de masa de reacción durante la pirólisis de cuesco de palma en atmósfera inerte de N_2 y en una atmósfera de vapor de agua (30 % H_2O Vol.) en función de la temperatura

(Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 13)

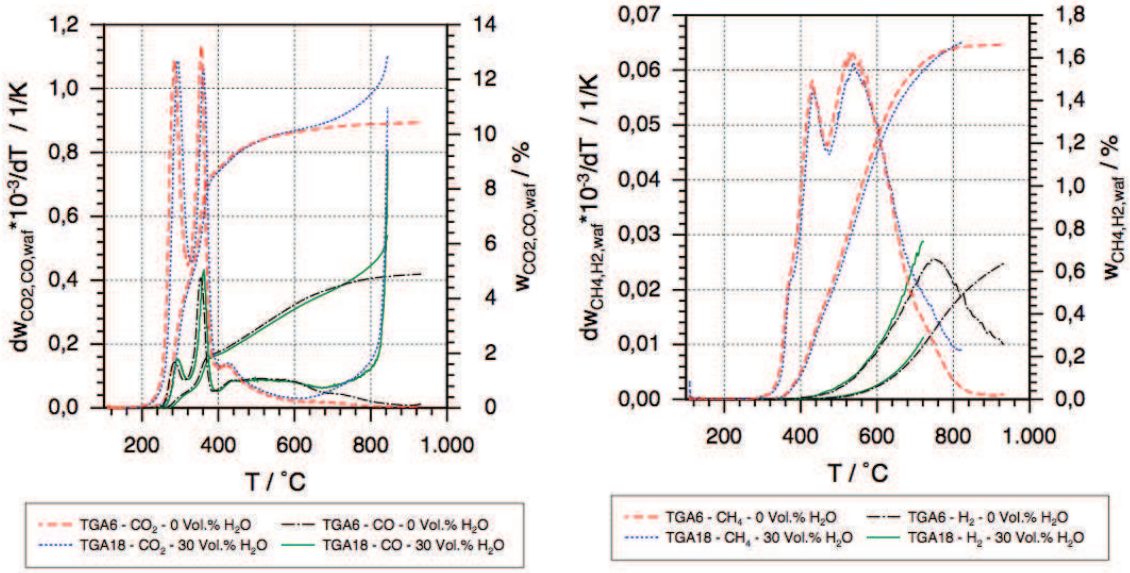


Figura 1.13. a) Generación de CO_2, CO, b) Generación de CH_4 y H_2, durante la pirólisis de cuesco en atmósfera inerte (N_2) y de vapor de agua (30 % H_2O Vol.) en función de la temperatura

(Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 14)

De ese estudio se concluye que:

- Conservando los demás parámetros constantes, el aumento de la tasa de calentamiento del cuesco durante la pirólisis ocasiona la producción de fracciones menores de carbonizado.
- Las curvas de evolución del CO y del CO_2, como muestra la Figura 1.13 a y b presentan picos de reacción simultáneos con la curva diferencial de la variación de la masa del residuo sólido hasta temperaturas cercanas a 500 ºC.
- La figura 1.13 a, muestran las curvas de evolución del CO y CO_2 que se presentan asociadas hasta temperaturas cercanas a 500 ºC. Se identifican dos picos bien definidos y un tercer pico de menor tamaño para temperaturas cercanas a 380 ºC.
- En la figura 1.13 b las curvas de generación de CH_4 y de H_2 inician su evolución de manera notable a temperaturas superiores a 400 ºC.
- Las reacciones durante la pirólisis del cuesco de palma se presentan a temperaturas menores para velocidades de calentamiento menores. Este efecto se considera que es ocasionado principalmente por los efectos de la catálisis de la ceniza presente en el cuesco.
- El efecto del tamaño de grano es más notable en el desarrollo de las reacciones de la pirólisis y la formación de los productos del proceso que los efectos externos a las partículas, debidos a la altura del lecho del material sólido. (Gómez, Klose y Rincón, 2010, p. 12).

1.2.7. MODELOS CINÉTICOS DE REACCIÓN

En la descomposición térmica de la biomasa se presentan una variedad infinita de reacciones químicas sucesivas, paralelas y competitivas. El estudio de un problema de estas características es posible mediante simplificaciones que contemplan la descripción de la reacción o grupo de reacciones que limitan la tasa global de reacción. La interpretación más plausible para una cinética global de este tipo es asumir que existe un paso limitante de la tasa de reacción, que tiene una elevada energía de activación, dentro de un mecanismo complejo de reacción. Algunas de las posibles transformaciones que pueden contribuir al paso limitante en la tasa de reacción son las siguientes:

- La disminución en el grado de polimerización.
- El rompimiento inter e intramolecular de los enlaces de hidrógeno para formar una estructura menos rígida, como una zona de transición vidriosa.
- La formación de un reactivo intermedio a partir del rompimiento del enlace de la glucosa, como una especie de radical libre o iónica.
- Algún tipo de conversión interna en la conformación molecular de la estructura de carbohidratos de la biomasa.

Dentro de los modelos que se han propuesto se puede hacer una clasificación de acuerdo a su estructura. Los modelos propuestos para la pirólisis de celulosa y biomasa se describen brevemente a continuación y se pueden clasificar en cuatro grupos: los modelos de una reacción global sencilla; los modelos de reacciones múltiples; los modelos centrados en la formación de productos y el modelo semi global de reacción con múltiples reacciones.

1.2.7.1. Modelos de una reacción global sencilla

Los modelos de este tipo utilizan una reacción de un paso y una energía de activación. Presentan el inconveniente de requerir una masa final de carbonizado. Estos modelos han sido empleados en la descripción de la velocidad de reacción de la celulosa. Son modelos sencillos que se ajustan bien a la información experimental obtenida durante la pirólisis de la biomasa en equipos de termogravimetría. Estos modelos tampoco permiten la predicción del comportamiento de generación de los productos de la pirólisis en función de la temperatura, debido a que se establece una relación fija entre los productos en las ecuaciones para determinar los parámetros cinéticos de reacción.

1.2.7.2. Modelos de reacciones múltiples

Las secuencias de reacción para este tipo de modelos constituyen la base de los primeros esquemas de reacción para la pirólisis de la celulosa y fueron formulados según los estudios iniciales de los cambios estructurales de la celulosa durante la pirólisis y de acuerdo a los productos obtenidos mediante su procesamiento. Estos modelos consideran dos reacciones básicas, de carácter

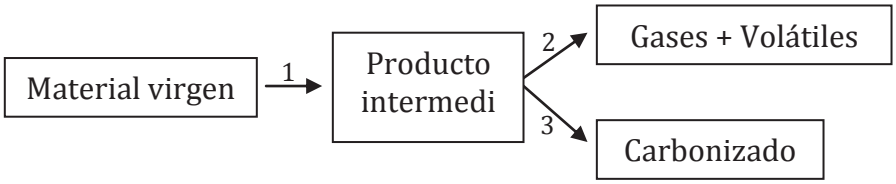
paralelo y competitivo. Una de estas reacciones es de deshidratación y es la principal responsable de la formación de carbonizado. A esta reacción también se asocian la producción de CO, CO_2 y H_2O. La otra reacción toma lugar a través de la despolimerización y conduce a la formación de materia volátil condensable, especialmente de levoglucosano. Otros modelos se han formulado a partir de algunas modificaciones en las secuencias de reacción de los modelos originales. En este sentido, se han incluido reacciones adicionales a las reacciones de deshidratación y despolimerización, o se han empleado esquemas de reacciones en cadena en lugar de las reacciones competitivas.

1.2.7.3. Modelos centrados en la formación de los productos

En estos modelos se asumen reacciones competitivas separadas para describir la formación y distribución de productos, pero no se considera la composición química de la biomasa. Este tipo de modelos permite la predicción del comportamiento de la generación de los productos en función de las variables del proceso, como el incremento de la temperatura y de la tasa de calentamiento, estos modelos no pertenecen al grupo de los modelos que intentan representar los mecanismos reales de reacción.

1.2.7.4. Modelos semi globales de reacción

Estos modelos describen la secuencia de las reacciones durante la pirólisis 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). De esta manera intentan relacionar las características químicas de la biomasa con la formación de las fracciones de los productos de la pirólisis. Se suponen reacciones de primer orden para describir la descomposición de las fracciones de hemicelulosa, celulosa y lignina, y la formación de productos líquidos, gaseosos y sólidos.



$$(\text{Biomasa}) = a(\text{Celulosa}) + b(\text{Lignina}) + c(\text{Hemicelulosa})$$

1.2.8. CINÉTICA DE ACTIVACIÓN

Kunii y Chikasu (2008, p. 27) y Levenspiel (1986, p. 393) definen a las reacciones de carbonización-activación como reacciones sólido-fluido, las mismas que se pueden representar por la Ecuación 1.10.

$$A\ fluido\ + bB\ \ sólido\ \rightarrow Productos\ fluidos\ y/o\ sòlidos \qquad 1.10$$

1.2.8.1. Modelo de conversión progresiva

Levenspiel (1986) considera, que en este modelo el gas reaccionante penetra y reacciona simultáneamente en toda la partícula sólida, de forma que el reactivo sólido se está convirtiendo continua y progresivamente en toda la partícula como se muestra en la Figura 1.14.

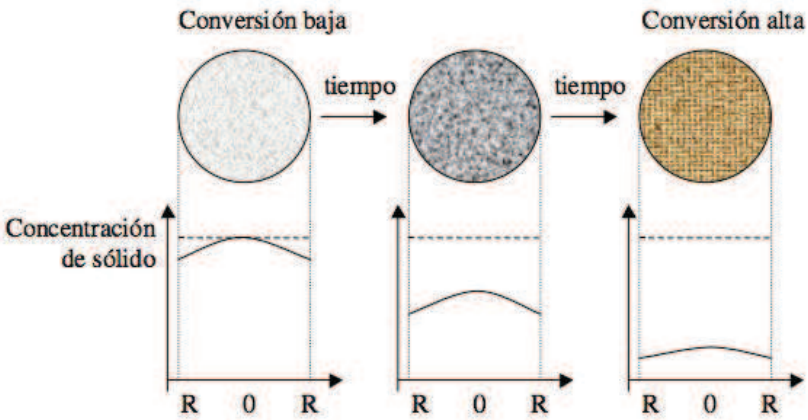


Figura 1.14. Modelo de conversión progresiva

Kunii y Chikasu (2008) definen la velocidad de reacción según la Ecuación 1.11 (p. 31).

$$\frac{d\alpha_B}{dt} = k_r C_A\ \ 1 - \alpha_B \qquad 1.11$$

Donde:

k_r: constante cinética de la reacción

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

C_A: concentración del fluido

1.2.8.2. Modelo de núcleo sin reaccionar

El proceso es definido por Levenspiel (1986), una reacción primero se da en la superficie exterior de la partícula sólida, después la zona de reacción se desplaza hacia el interior del sólido, de esta manera se da lugar a el material completamente convertido y sólido inerte (llamado también cenizas), de este modo durante la reacción existirá un núcleo de material sin reaccionar, cuyo tamaño irá disminuyendo a medida que ocurre la reacción como muestra la Figura 1.15.

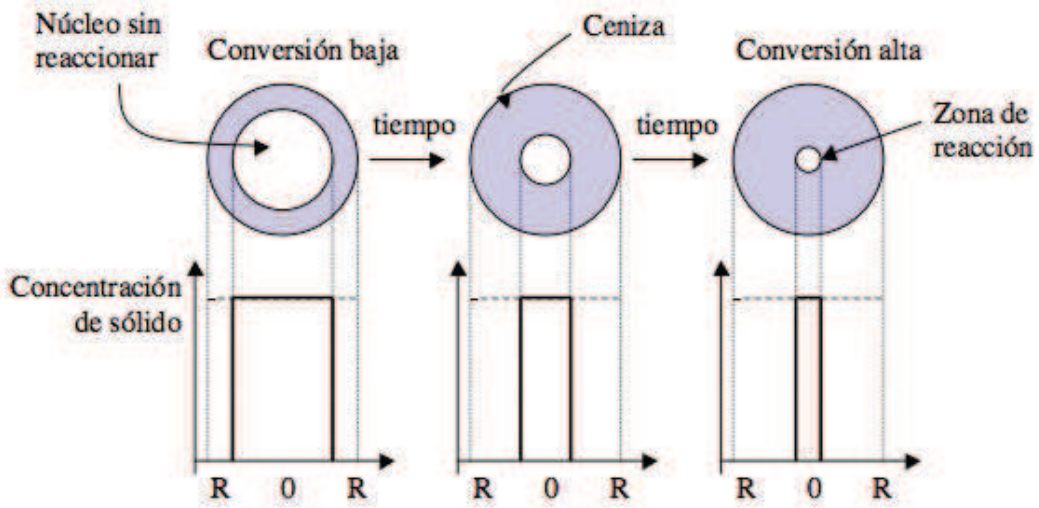


Figura 1.15. Modelo de núcleo sin reaccionar

Para este modelo Kunii y Chikasu (2008) definen la velocidad de reacción según la Ecuación 1.12 (p. 31).

$$-\frac{1}{4\pi {r_c}^2}\frac{dN_A}{dt} = k_c C_A \qquad 1.12$$

Donde:

K_c: constante cinética de la reacción química

r_c: radio del sólido

C_A: concentración del fluido

dN_A/dt: velocidad de reacción

1.3. INFLUENCIA DEL CLORURO DE ZINC EN LA CARBONIZACIÓN DE MATERIALES LIGNOCELOLÓSICOS: ACTIVACIÓN QUÍMICA

1.3.1. OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado se obtiene mediante un proceso denominado activación, en el cual se convierte un precursor de baja o nula porosidad en un material de elevada capacidad adsorbente. Casi cualquier material con un contenido en carbono medio-alto se puede utilizar como precursor para la preparación de carbón activado. Por ejemplo madera, cáscaras y semillas de frutos, turba, carbón vegetal, carbón mineral, productos de aceites minerales y algunos subproductos industriales. No obstante, precursores como el coque, de petróleo o de carbón mineral, son difíciles de activar, mientras que el carbón vegetal se activa muy fácilmente. Además, la pureza del carbón activado obtenido, así como la distribución de su porosidad dependen, como se ha indicado anteriormente, del precursor utilizado (Almansa, 2004, p. 29).

Los métodos de obtención del carbón activado se dividen en dos grandes grupos: activación física y activación química, en los cuales el desarrollo de la porosidad se produce por mecanismos distintos. En la activación física la porosidad se crea por reacción del carbón (generalmente un carbonizado, obtenido por carbonización previa del precursor) a alta temperatura, entre 800 y 1 000 °C, con gases oxidantes como vapor de agua, CO_2, etc. El rendimiento de la carbonización del material lignocelulósico es algo inferior al 30 % y la pérdida de peso producida durante la activación puede estar entre el 30 y el 60 %, por lo que el rendimiento global de obtención de carbón activado a partir de precursores lignocelulósicos puede ser tan bajo como el 10 % (Almansa, 2004, p. 29).

La activación química requiere la acción de una agente deshidratante como el ácido fosfórico, el cloruro de zinc, el hidróxido potásico, etc. que impregna el precursor. Posteriormente se trata térmicamente a una temperatura no muy elevada, generalmente por debajo a 800 °C y después se elimina el reactivo

químico mediante un intensivo lavado dejando un carbón activado altamente poroso listo para ser utilizado. El rendimiento puede llegar al 40 %, más elevado que el de la activación física. El precursor más utilizado es madera (o serrín) pero también se utilizan otros materiales lignocelulósicos. En algunos casos particulares el material de partida se encuentra en forma de fibras, tela o fieltro y el carbón activado final mantiene su misma forma física.

1.3.2. PRECURSORES

La selección del material precursor se basa principalmente en los siguientes criterios:

- Alto contenido de carbón
- Que tenga un bajo contenido en materia inorgánica
- Su disponibilidad y costo
- Que no sufra degradación durante el almacenamiento
- Su facilidad de activación

Los materiales lignocelulósicos presentan elevada densidad y elevado contenido en materia volátil, estos son parámetros importantes ya que la elevada densidad contribuye a aumentar la resistencia del carbón activado final y el elevado contenido en material volátil, no sólo puede ahorrar energía en el proceso de producción, sino que permite un mayor control del rendimiento. Materiales ligeros como la madera, que contienen una gran cantidad de materia volátil, producen carbones activados con un alto volumen de poros pero con baja densidad por lo que se emplean principalmente para obtener carbón activado en polvo. Por otro lado, la cáscara de coco, los huesos (o semillas) de los frutos y materiales similares, que poseen una elevada densidad y son ricos en materia volátil, conducen a carbones activados granulares que son duros y con elevada porosidad y, por tanto, adecuados para muchas aplicaciones (Almansa, 2004, p. 30).

1.3.3. ACTIVACIÓN QUÍMICA

La activación es un proceso que busca aumentar el volumen y diámetro de los poros que, de manera natural, se forman previamente en la etapa de carbonización de la materia prima, provocando inclusive la creación de porosidad adicional (Salvador, 1999, p. 17).

Este proceso interno puede dividirse en dos fases características: en una primera fase, las “hojas” aromáticas del carbón, como se observa en la figura 1.16, son expuestas a la acción del agente activante para lograr el desarrollo de la estructura microporosa; mientras que en una segunda fase dichos poros aumentan su tamaño debido a la combustión de las paredes entre poros adyacentes. Es por esta razón que el grado de combustión (%Burn-off) es determinante en la distribución de tamaño de poro en un carbón activado, tal como se ha explicado anteriormente.

A pesar de que el método utilizado en el proceso de activación puede ser determinante para la naturaleza de las superficies oxidadas que se formen y también para la superficie específica del producto; la distribución de tamaño de poro y la estructura de dicha porosidad son función, principalmente, de la materia prima utilizada y de las condiciones de operación presentes durante la carbonización.

El proceso de activación puede ser visualizado como una interacción entre el agente activante y los átomos de carbón del producto intermedio de la carbonización. La reactividad de estos átomos dependerá de su posición dentro del arreglo espacial en la estructura aromática. Aquellos átomos situados en los bordes o en la periferia de las hojas aromáticas, o aquellos que estén en posiciones aisladas, están asociadas con electrones desapareados o tienen valencias residuales, lo cual hace que posean una alta energía potencial, convirtiéndose en altamente reactivos con tendencia a formar compuestos superficiales por oxidación (Salvador, 1999, p. 17).

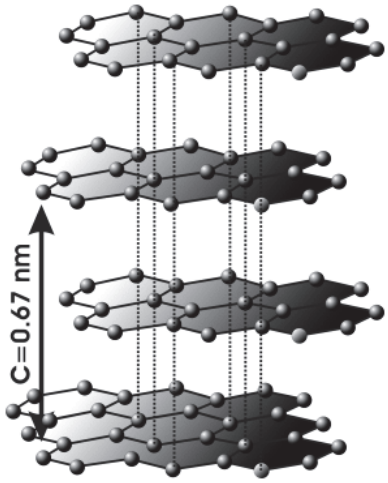


Figura 1.16. Estructura química del carbón activado
(Desotec, 2011, p. 2)

La activación química consiste en la carbonización de una materia prima en presencia de sustancias químicas que actúan como agentes activantes. Las materias primas utilizadas para este proceso son generalmente de carácter celulósico y se someten a procesos de impregnación en donde se añaden determinados compuestos químicos con fines deshidratantes u oxidantes, propiciando el aumento de volumen y el desarrollo de una estructura porosa en la materia prima (Salvador, 1999, p. 18).

Básicamente el precursor finamente dividido se mezcla con una disolución concentrada del reactivo químico deshidratante. La mezcla se seca y se piroliza en un horno, entre 400 y 600 °C, ocurriendo una deshidratación con el resultado final de la creación de una estructura porosa y una ampliación del área superficial. Después, el producto se lava para extraer el exceso de agente activador y el carbón activado se seca y se clasifica. El agua de lavado que contiene el reactivo químico se trata, bien para reutilizarlas de nuevo, o bien para el reciclaje de los residuos. La figura 1.17 muestra un esquema general de la preparación de carbón activado mediante activación química (Almansa, 2004, p. 35).

El principio de la activación química consiste en mantener las distancias entre los átomos de carbón existentes en materias primas orgánicas como madera, turba, etc.; procurando eliminar las sustancias no carbonáceas de su estructura a la vez que se da un proceso de deshidratación.

La porosidad se desarrolla debido a las transformaciones que ocurren durante el tratamiento térmico. La economía del proceso depende en gran parte de la eficiencia en la recuperación del reactivo químico, lo que necesita una etapa de cuidadoso lavado (Almansa, 2004, p. 37).

El proceso es controlado fundamentalmente por los parámetros de activación química y el producto a obtener, estos son: la relación de impregnación del agente químico, la temperatura de activación y el tiempo de residencia (Moreno, 2011, p. 15).

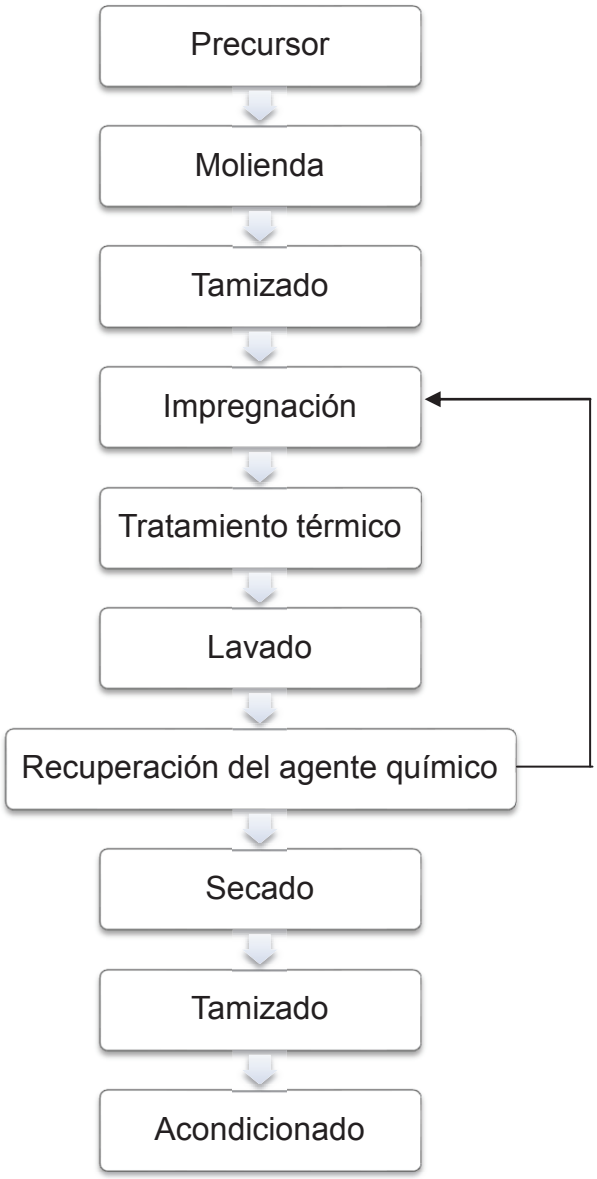


Figura 1.17. Esquema general de la preparación de carbón activado mediante activación química
(Almansa, 2004, p. 36)

Activación con cloruro de zinc

El reactivo clásico que se ha utilizado a gran escala en la activación química ha sido el cloruro de zinc, aunque se ha disminuido su uso debido a problemas de baja eficiencia en la recuperación, problemas de corrosión, presencia de zinc residual en el carbón, y especialmente, problemas medioambientales asociados con los compuestos de zinc, a pesar de la eficiencia y simplicidad del proceso.

Este proceso conduce a carbones activados con elevada porosidad y aunque la distribución del tamaño de los poros está determinada en gran medida por el precursor, la cantidad de cloruro de zinc que se utilice también tiene gran influencia en la porosidad del producto final. Así, cuanto mayor sea la cantidad de cloruro de zinc utilizada en la impregnación, mayor será el tamaño de los poros del carbón activado resultante. En el caso de materiales lignocelulósicos la activación con cloruro de zinc produce materiales con un elevado rendimiento y una porosidad bien desarrollada en una sola etapa. Las variables que tienen mayor incidencia en el desarrollo de la porosidad son la cantidad de cloruro de zinc y la temperatura del tratamiento térmico (Almansa, 2004, p. 39).

El mecanismo sugerido para la activación mediante cloruro de zinc se puede resumir de la manera siguiente:

Durante la impregnación, el reactivo químico se introduce en el interior de las partículas del precursor y produce algunas reacciones de hidrólisis que se aprecian en una pérdida de peso, en la salida de material volátil, en el debilitamiento de la estructura y en el aumento de la elasticidad, y además el agente químico produce el hinchamiento de las partículas. Ambos fenómenos se hacen más marcados al aumentar la concentración de cloruro de zinc en la disolución (Almansa, 2004, p. 40).

Durante el tratamiento térmico, el cloruro de zinc previene la formación de materia volátil aumentando así el rendimiento del proceso. La mínima pérdida de peso producida durante la impregnación y la carbonización ocurre a relaciones de impregnación bajas ya que la pequeña cantidad de cloruro de zinc se puede

distribuir de modo uniforme en el precursor con una gran dispersión en el interior de las partículas dando lugar a carbones activados, después de un exhaustivo lavado, con una micro porosidad uniforme y poca macro porosidad.

A relaciones de impregnación más elevadas, la hidrólisis y el hinchamiento se acentúan, el cloruro de zinc no se puede distribuir uniformemente en el interior de las partículas y, aunque el volumen de poros total aumenta, la distribución de tamaños de poros es más heterogénea, cobrando más importancia la meso y macroporosidad.

La característica común de este impregnante es su capacidad para la carbonización y por lo tanto, el desarrollo de una estructura de poro. La degradación del material celulósico y la aromatización del esqueleto de carbono sobre los resultados del tratamiento con Cl_2Zn en la creación de la estructura de poros. Caturla et al. mostraron que el cloruro de zinc actúa como un agente deshidratante que promueve la descomposición de material carbonoso durante el proceso de pirólisis, restringe la formación de alquitrán, y aumenta el rendimiento de carbono. Esencialmente, intersticios vacantes en la matriz de carbono se forman sobre un extenso lavado de los poros posterior a la pirólisis.

El grado de activación química puede alterar significativamente las características de los carbones producidos. De acuerdo con Cartula, a altas concentraciones de Cl_2Zn, algunos restos de Cl_2Zn permanecen en la parte externa de las partículas de carbono y ensancha la porosidad por medio de una descomposición localizada de la materia orgánica. Gonzales-Serrano et al. probaron diferentes relaciones de concentraciones para la activación química y mostraron que el carbón activado con una estructura porosa formada de microporosidad estrecha se puede conseguir mediante el uso de Cl_2Zn en una relación menor a 1.

Según los estudios de Caturla et al., los cambios en el área de la superficie y densidad aparente producidos por el aumento de la temperatura de carbonización en la materia prima impregnada, se muestran para dos concentraciones diferentes de Zn. Hay una disminución en el área superficial con el aumento de temperatura

de carbonización y un ligero aumento de la densidad aparente, que es más acentuada en las muestras con menor carga de Zn.

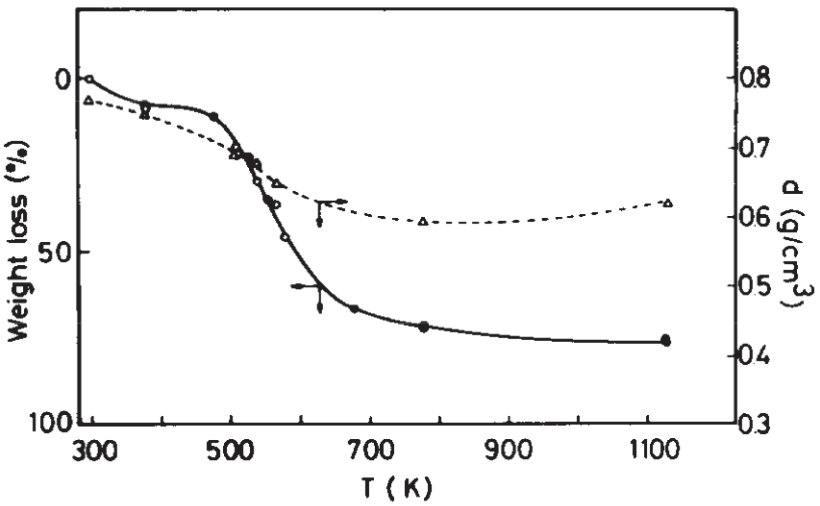


Figura 1.18. Pérdida de peso durante la carbonización de dos materias primas, pepas de durazno y cáscaras de almendras, y la evolución de la densidad aparente de las pepas de durazno
(Caturla et al, 1991, p. 1 000)

El aumento en la temperatura del tratamiento térmico, de 773 – 1 073 K (500 - 800 ºC) produce una ligera pérdida de peso, una organización de la estructura, y encogimiento de las partículas del carbón, se reduce considerablemente la porosidad y se da un aumento de la densidad aparente; aumentando la concentración de Zn en la activación no afecta a la pérdida (aproximadamente 23 %) en la porosidad total, pero la pérdida de peso aumenta (el rendimiento de los carbonos son: A = 37 % y B = 35 %, C = 37 % y D = 32 %). Esta es la razón por la variación en la densidad aparente como una función de la temperatura de carbonización para X_{Zn} = 0,96 es más ligera, como se muestra en la figura 1.19.

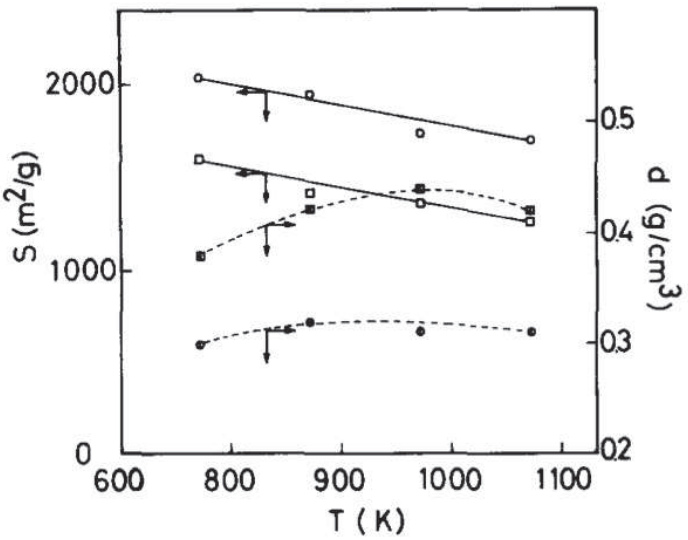


Figura 1.19. Efecto de la temperatura de carbonización sobre el área de superficie y la densidad aparente de pepas de durazno impregnadas con Cl_2Zn
(Caturla et al, 1991, p. 1 001)

Cartula en su estudio señala que a baja concentración de Zn, hasta X_{Zn}= 0,30, los carbones activados resultantes tienen una estructura porosa constituida principalmente por microporos estrechos. El área de superficie aumenta considerablemente con respecto al precursor impregnado no carbonizado como también lo hace el rendimiento, ya que el Cl_2Zn disminuye la cantidad de alquitranes producidos, además el gran desarrollo de la porosidad produce una rápida disminución de la densidad aparente. Un carbón activado típico obtenido utilizando alrededor de 0,20 g $_{Zn}$/g cuesco (X_{Zn}= 0,20) tendría aproximadamente 1 000 m^2/g de área de superficie BET, una densidad aparente de 0,52 g/cm^3 y un rendimiento de alrededor de 40 %.

En el rango de X_{Zn}= 0,30 a 1,0 se da la creación y, especialmente, la ampliación de microporos y el área de superficie aumenta con la concentración de Zn. Este ensanchamiento de la microporosidad produce una disminución simultánea de rendimiento y densidad aparente debido a una evolución más amplia de componentes gaseosos. Es de señalar que tal evolución de la materia volátil se produce principalmente durante la etapa de impregnación, cuando la muestra se lleva a sequedad por evaporación completa en alrededor de 160 ºC. Por lo tanto, para X_{Zn}= 0,24 este proceso produce una pérdida de peso inicial de 38 % y una pérdida de peso de 45 % y 50 % para X_{Zn}= 0,48 y X_{Zn}= 0,96, respectivamente.

Los carbones activados obtenidos en este rango de concentración de Zn pueden tener hasta 2 000 m^2/g en área de superficie y una densidad aparente de alrededor de 0,30 g/cm^3, con un rendimiento superior al 30 %.

Concentraciones de Zn más altos a X_{Zn} = 1,0 producen una pequeña disminución en el rendimiento y la densidad aparente pero una pérdida considerable de la superficie, debido a la ampliación de la porosidad es aún más notable.

Los resultados de la Figura 1.20 para concentraciones de Zn alrededor 0,20 – 0,30 son las más significativas, ya que la evolución de los datos sugiere máximos para el rendimiento y la densidad aparente. En vista de esto, la etapa de impregnación se modificó y en lugar de evaporar a sequedad, se empleó la evaporación parcial y la ausencia de evaporación.

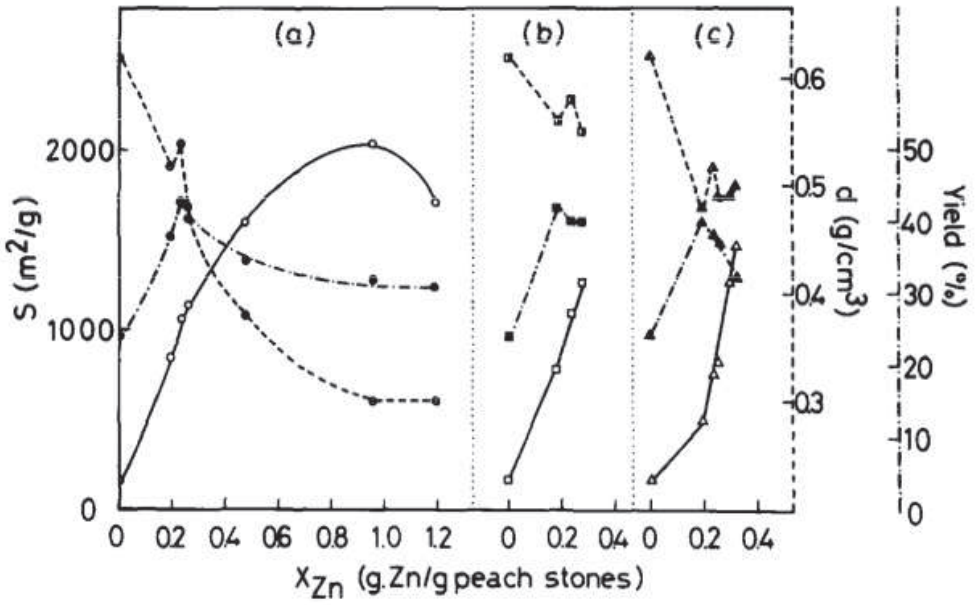


Figura 1.20. Efecto del contenido de Zn en el precursor (X_{Zn}) y efecto de la evaporación después de la impregnación en el área superficial (——), densidad aparente (------) y en el rendimeinto (-·-·-·-). (a) Evaporación a sequedad, (b) Evaporación parcial, (c) Sin evaporación
(Caturla et al, 1991, p. 1 001)

Los resultados obtenidos que se incluyen en la Figura 1.20 (b) y (c), muestran que la evolución es similar a la Figura 1.20 (a), con un máximo de rendimiento y de densidad aparente para valores similares de X_{Zn}. Sin embargo, mientras que el

rendimiento máximo es de alrededor de 40 – 43 % en todos los casos, el valor máximo de la densidad aparente es menor cuando hay existe evaporación en el proceso. Esta densidad inferior corresponde a un mayor volumen de microporos, pero las áreas superficiales y las isotermas de adsorción de carbono muestran un efecto opuesto.

Gonzales-Serrano estudia el efecto de dos variables principales en el proceso de activación con respecto al desarrollo de la estructura porosa: la relación de impregnación y la temperatura de tratamiento térmico.

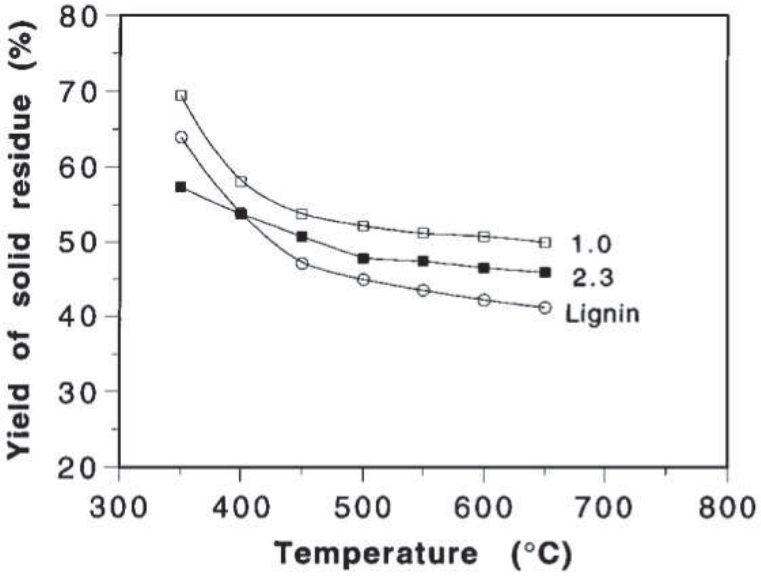


Figura 1.21. Rendimiento de carbonización (residuo sólido) en función de la temperatura de impregnado con Cl_2Zn lignina kraft (relaciones de impregnación 1 y 2,3) y lignina Kraft pura
(Gonzales-Serrano et al, 1997, p. 4 833)

La Figura 1.21 muestra los valores de rendimiento obtenidos en los experimentos llevados a cabo por Gonzales-Serrano en el horno de activación. Para efectos de comparación incluyeron también los valores de rendimiento correspondientes a la carbonización de lignina kraft a las mismas temperaturas y el tiempo de lavado. Los valores del estudio de Gonzales-Serrano confirman que la descomposición pirolítica que da lugar a la pérdida de materia volátil tiene efecto principalmente dentro del rango de temperatura que se extiende hasta los 400 °C y por encima de esa temperatura el enfoque de valores de rendimiento a un nivel de

prácticamente constante que es algo dependiente de la relación de impregnación. En la ausencia de agentes químicos la lignina kraft produce un rendimiento de carbonización significativamente más alto que los precursores lignocelulósicos. El uso de Cl_2Zn aumenta el rendimiento de carbonización, pero el efecto cuantitativo es notablemente menos importante para la lignina en comparación con la lignocelulosa.

1.3.4. TASA DE CALENTAMIENTO

Este parámetro influye sobre el rendimiento del carbón obtenido, así como también en la velocidad de deshidratación de la materia prima, determinando la estabilidad de los compuestos poliméricos formados.

Cuando la tasa de calentamiento baja, se obtiene altos rendimientos y polímeros con estructuras más estables, pero por otro lado se da un mayor “encogimiento” de la materia prima, produciéndose una disminución en el volumen de los poros. Esto no constituye un problema en materiales como maderas suaves donde dichos poros llegarán a un tamaño adecuado por una activación posterior; pero cuando se trata de materiales duros como carbones minerales (antracitas), este fenómeno puede provocar una excesiva reducción del volumen de los poros. Para estos materiales es más conveniente una carbonización con una tasa alta de calentamiento (Salvador, 1999, p. 20).

A pesar de que existe una relación entre la tasa de calentamiento y el volumen de los poros del carbón, esto no significa que este parámetro sea necesariamente el único factor influyente sobre la creación de la porosidad en un carbón activado.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL CUESCO DE PALMISTE (*ELAEIS GUINÉENS*) DE LAS VARIEDADES TENERA (ESPESOR 2MM) Y DURA (ESPESOR 6MM)

2.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA MATERIA PRIMA

Para la caracterización física se determinó de cada tipo de cuesco de palmiste: el tamaño de partícula, el espesor, la densidad real, la densidad aparente y la dureza. El procedimiento se detalla a continuación:

2.1.1.1. Reducción de tamaño

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.

Una vez que el material fue triturado, se realizó un ensayo granulométrico para determinar el tamaño de partícula de la materia prima a ser carbonizada.

2.1.1.2. Determinación del tamaño de partícula

Después que cada tipo de cuesco de palmiste haya pasado por el 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 100 g de cuesco de palmiste triturado, cuya numeración y abertura se muestran en la Tabla 2.1. El material fue tamizado durante 15 min, después de lo cual se pesó cada muestra retenida en cada tamiz.

Una vez con el tamaño de partícula definido se realizaron las pruebas de dureza y la densidad aparente de la materia prima triturada

Tabla 2.1. Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico de los materiales molido

Malla Tyler (#)	Abertura (mm)
3/8 in	9,50
3	6,73
4	4,75
6	3,35
8	2,36
10	2,00
12	1,70
14	1,40
16	1,18
Fondo	-

2.1.1.3. Determinación del espesor

Para la determinación del espesor del cuesco de palmiste se realizó un muestreo, para lo cual se tomó 300 g de cada tipo de cuesco, a continuación de esta población se tomó una muestra significativa de 100 g, posteriormente una muestra de 50 g de donde se apartó los cuescos más representativos de la especie, mismos que fueron sometidos a una medición del espesor de cada una de los tipos de cuesco empleando un calibrador tipo DRION.

2.1.1.4. Densidad Real

Para la medición de la densidad real se empleó el método del picnómetro.

- Se empleó el picnómetro Boeco de Gay Lussac con tapón capilar, de una capacidad de 25 ml, se midió la masa del mismo en una balanza analítica marca SARTORIUS modelo TE 124S, capacidad 120 g.

- Se pesó 1 g de muestra pulverizada, aproximadamente, esta se agregó al picnómetro y se registró la masa del picnómetro más la muestra.
- Se llenó el picnómetro añadiendo agua destilada, se colocó el tapón capilar y el exceso de agua que emergió se lo limpia. Se registró la masa del picnómetro con muestra y agua.
- Se lavó el picnómetro con agua destilada y se secó por fuera, luego se agregó agua destilada hasta llenarlo y se colocó el tapón capilar, el exceso de agua se lo eliminó y se registró la masa del picnómetro con agua.

La determinación de la densidad se efectuó mediante la Ecuación 2.1:

$$D_r = \frac{d_w \; W_s - W_a}{W_s - W_a \; - \; W_{sw} - W_w} \quad \frac{g}{ml} \qquad 2.1$$

Donde:
Dr: Densidad real (g/ml)
d_w: Densidad del agua a 4 ºC (1,00 g/ml)
W_s: Masa del picnómetro con muestra (g)
W_a: Masa del picnómetro vacío (g)
W_{sw}: Masa del picnómetro con muestra y agua (g)
W_w: Masa del picnómetro con agua (g)

2.1.1.5. Densidad aparente

Para la medición de la densidad aparente se empleó el método de la probeta.

- Se empleó una probeta graduada de 50 ml, ésta se lavó con metanol absoluto y se lo llevó a secado con corriente de aire hasta obtener un peso constate y se registró la masa de la probeta vacía.
- Se colocó el cuesco de palmiste reducido de tamaño, en la probeta hasta la marca máxima de la misma y se registró la masa de la probeta con muestra.

Se calculó la densidad aparente mediante la ecuación 2.2:

$$D_a = \frac{W_{pr+m} - W_{pr}}{100\ ml} \quad \frac{g}{ml} \qquad 2.2$$

Donde:

D_a: Densidad aparente (g/ml)

W_{pr+m}: Masa de la probeta con la muestra (g).

W_{pr}: Masa de la probeta vacía (g).

2.1.1.6. Determinación de la dureza

Para la determinación de la dureza se adaptó la norma NTE INEN 1 989:94 (1995a).

- Se tomó una muestra de aproximadamente 110 cm^3 de material, que se encontraba entre las mallas 12 (1,70 mm) y 16 (1,18 mm), de este volumen se tomaron 100 cm^3, los cuales se colocaron en una probeta, se pesó el volumen de la materia.
- Los 100 cm^3 pesados se colocaron en el fondo de una serie de tamices con 30 bolas de acero: 15 con un diámetro de ½ in y 15 con un diámetro de 3/8 in.
- Se tamizó la muestra durante 30 min en un Rot-Tap.
- Transcurrido el tiempo se retiraron las bolas de acero y se colocó la muestra en el tamiz de dureza (malla 12), se tamizó la muestra 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 el peso tamizado con las 30 bolas de acero en los tamices de dureza (malla 12, 14 y 16).

2.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA PRIMA

2.1.2.1. Lignina y celulosa

Para la caracterización química de la materia prima se realizó como pretratamiento, un proceso de pulverización para reducir su tamaño hasta un tamaño de partícula menor a 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 2.2. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de Pulpa y Papel de la EPN. Los análisis se detallan a continuación:

Tabla 2.2. 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)

Humedad

- Se pesaron sobre una luna de reloj tarada 5 g de cada tipo de cuesco de palmiste pulverizado.

- La muestra fue colocada en la estufa a 110 °C por 2 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 2.3:

$$\%H = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \qquad 2.3$$

Dónde:
M_i: peso muestra inicial (g)
M_f: peso muestra final (g)

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

- Se pesaron 2 g de cuesco de palmiste 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 volúmenes de alcohol etílico al 70 % y 67 volúmenes 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 una temperatura de 105 °C.
- Después de este tiempo, los balones fueron retirados y enfriados en un desecador para posteriormente ser pesados.

Los resultados se obtuvieron, por medio de la Ecuación 2.4:

$$\%CRG = \frac{M_i - M_f}{M_T \ 1 - H} \times 100 \qquad 2.4$$

Donde:

%CRG = contenido de ceras, resinas y grasas solubles

M_i: masa inicial del balón (g)

M_f: masa final del balón (g)

M_T: masa inicial del timble (g)

H: humedad del análisis (%)

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.
- Se agregaron 50 mL de hipoclorito de sodio (NaClO) al 10 % y se dejó la muestra en reposo a temperatura ambiente durante 16 h.
- 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 (SO_2) al 3 %, 50 mL de agua y 50 mL de sulfito de sodio (Na_2SO_3) 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 ºC por 3 h, enfriadas en el desecador y pesadas.

El contenido de celulosa se determinó con la Ecuación 2.5:

$$\%Celulosa = \frac{M_{iC} - M_{fC}}{M_m \ 1 - H} \times 100 \qquad 2.5$$

Donde:

M_{Ic}: masa inicial del crisol (g)

M_{fC}: masa final del crisol (g)

M_m: masa inicial de la muestra (g)

H: humedad del análisis (%)

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 ºC se agitó continuamente la mezcla durante 8 h para después ser trasvasada a un balón de 1000 mL donde se agregaron 560 mL de agua y se hirvió por 8 h a reflujo.
- 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 ºC y se colocó en el desecador hasta que se enfrió.
- Luego la muestra fue pesada.

Se determinó el contenido de lignina con la Ecuación 2.6:

$$\%Lignina = \frac{M_{iC} - M_{fC}}{M_m \ 1 - H} \times 100 \qquad 2.6$$

Donde:

M_{iC}: masa inicial del crisol (g)

M_{fC}: masa final del crisol (g)

M_m: masa inicial de la muestra (g)

H: humedad del análisis (%)

2.1.2.2. 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 taró un crisol por 30 minutos en una mufla Thermolyne a 950 ºC
- Se pesó aproximadamente 1 g de cuesco de palmiste pulverizada y se agregó al crisol tarado previamente.
- Se introdujo el crisol con su tapa a una mufla a 950 ºC 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 sin tapa por 2 h en la mufla a 950 ºC
- 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.

2.1.3. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA MATERIA PRIMA

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

2.2. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA MATERIA PRIMA SOBRE EL PROCESO DE CARBONIZACIÓN.

Para determinar la influencia del espesor sobre la temperatura y el tiempo de carbonización del cuesco de palmiste, se realizaron pruebas a nivel de laboratorio en la mufla SEPOR INC.

- Se pesaron 80 g de cada tipo de cuesco de palmiste y se colocaron en diferentes crisoles.
- Se pesó aproximadamente 5 g de aserrín y se agregó a cada crisol para crear una atmósfera reductora y se tapó el crisol con papel aluminio.
- Se encendió la mufla eléctrica (Linderberg-Blue M) a 400 ºC 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 ºC.

A cada muestra obtenida, se realizó análisis de: densidad real, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.4; densidad aparente según la sección 2.1.1.5, dureza según el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.6 y contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.2.2. Finalmente se tomó el peso final para determinar el rendimiento.

2.3. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CLORURO DE ZINC SOBRE EL PROCESO DE CARBONIZACIÓN-ACTIVACIÓN DEL CUESCO DE PALMISTE DE DIFERENTE ESPESOR

2.3.1. EVALUACIÓN DE LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON CLORURO DE ZINC A NIVEL LABORATORIO

Para determinar la influencia del agente químico, cloruro de zinc sobre la activación del cuesco de palmiste, primero se realizaron pruebas a nivel de laboratorio en la mufla SEPOR INC.

- Se preparó una solución de cloruro de zinc X_{Zn} = 0,4 (g Zn/g cuesco)
- Se pesaron aproximadamente 300 g de materia prima y se colocó en un vaso de precipitación junto con la solución de Cl_2Zn. Se impregnó las dos variedades de cuesco de palmiste con la solución de Cl_2Zn utilizando 2 mL de esta solución por cada g de cuesco.

- Para la impregnación, se colocó el vaso en una plancha eléctrica (PMC) a 85 ºC durante 2 h, finalizado este tiempo se elevó la temperatura al punto de ebullición (aproximadamente 150 °C) hasta completar la evaporación total de la solución.
- Se pesó 100 g del cuesco de palmiste impregnado y se colocó en distintos crisoles.
- Se agregaron aproximadamente 5 g de aserrín para crear una atmósfera reductora y se tapó el crisol con papel aluminio.
- Se prendió la mufla eléctrica (Linderberg-Blue M) a 450 ºC y cuando la temperatura se mantuvo constante, se colocaron 3 crisoles.
- Se tomaron muestras sacando cada crisol a 1, 1,5 y 2 h respectivamente.
- El carbón obtenido fue lavado con agua destilada en ebullición para eliminar el exceso de Cl_2Zn, hasta que alcance un pH aproximado de 6.
- Se repitió el procedimiento para una solución de cloruro de zinc X_{Zn} = 0,5 y 0,6 (g Zn/g cuesco), además para 500 y 600 ºC.

A cada muestra obtenida, se realizó análisis de: densidad real, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.4; densidad aparente según la sección 2.1.1.5, dureza según el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.6, contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.2.2 y se analizó la capacidad de adsorción mediante la técnica de Índice de yodo descrito en la sección 2.3.3. Finalmente se tomó el peso final para determinar el rendimiento.

2.3.2. EVALUACIÓN DE LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON CLORURO DE ZINC EN EL HORNO PILOTO

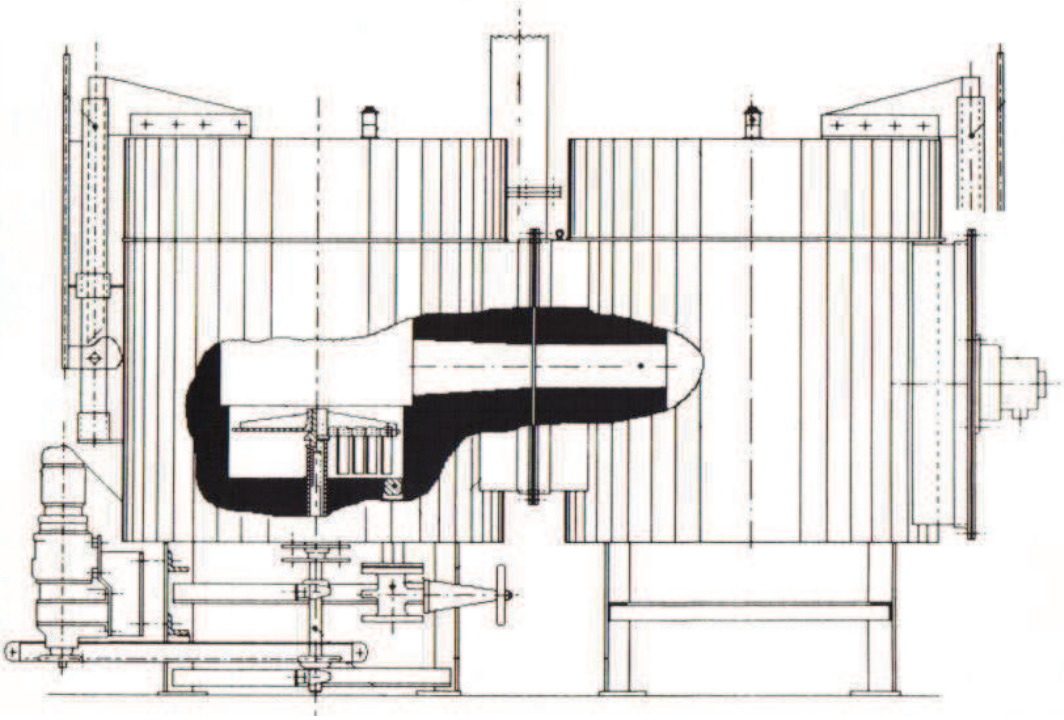


Figura 2.1. Esquema del horno Nichols-Herreshoff mono solera
(De la Torre y Guevara, 2005, p. 54)

Con los datos obtenidos en el laboratorio se escaló a nivel piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera, en base a los mejores resultados obtenidos con los distintos parámetros empleados en las pruebas a nivel laboratorio.

- Se preparó una solución de cloruro de zinc X_{Zn} = 0,5 (g Zn/g cuesco)
- Se pesaron aproximadamente 1 kg de materia prima y se colocó en un vaso de precipitación junto con la solución de Cl_2Zn. Se impregnó las dos variedades de cuesco de palmiste con la solución de Cl_2Zn utilizando 2 mL de esta solución por cada gramo de cuesco.
- Para la impregnación, se colocó el vaso en una plancha eléctrica (PMC) a 85 ºC durante 2 h, finalizado este tiempo se elevó la temperatura al punto de ebullición (aproximadamente 150 °C) hasta completar la evaporación total de la solución.
- Se colocó el cuesco impregnado en un crisol apropiado para su uso en el horno Nichols Herreshoff

- Se estableció en el horno Nichols Herreshoff mono solera de lecho agitado un λ= 0,90 y una temperatura de 500 ºC controlando tanto el flujo de gas y de aire. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento con un λ= 1,10
- Se introdujo el crisol en el horno Nichols Herreshoff
- Se carbonizó durante 3 horas, tomando muestras cada media hora.

A cada muestra obtenida, se realizó análisis de: densidad real, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.4; densidad aparente según la sección 2.1.1.5, dureza según el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.6, y contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo, según el procedimiento descrito en la sección 2.1.2.2.

Cada muestra fue sometida a un análisis de índice de yodo para determinar la superficie específica del carbón activado producido según el procedimiento descrito en la sección 2.3.3 y se les realizó la caracterización según el procedimiento realizado en la sección 2.3.4.

2.3.3. 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 que se emplearon 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)

	Fórmula Química	**Concentración**
Solución de yodo	I_2	0,1 N
Ácido Clorhídrico	HCl	5% en peso
Solución de tiosulfato de sodio	$Na_2S_2O_3$	0,1 N
Solución de almidón*	$C_5H_{10}O_5$	1 g/L

* Se usó como indicador

- Los carbones activados obtenidos se pulverizaron para que alcancen un tamaño de partícula menor a 45 µm (malla 325)

- Se colocaron 2,5 mL de HCl al 5 % en peso en un Erlenmeyer
- Se pesaron 0,25 g de cada muestra pulverizada y se agitó constantemente
- La solución se sometió a ebullición, una vez alcanzado este punto se dejó enfriar
- Se adicionó 25 mL de solución de yodo [0,1 N]
- Se agitó constantemente durante 30 s
- Se filtró en un papel Whatman grado 42 cuantitativo
- Se desechó los primeros 5 mL y el resto se recogió en un Erlenmeyer
- Se tomó una alícuota de 12,5 mL del filtrado y se titularon con una solución [0,1 N] de $Na_2S_2O_3$ [0,1 N], se utilizó una solución de almidón de 1 g/L como indicador

Los mL gastados en la titulación se compararon con las tablas establecidas en la norma NTE INEN 1 988:94 (1995c) y así se obtuvo No. de iodo de cada carbón.

2.3.4. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado producido a 500 ºC en el horno Nichols Herreshoff fue sometido a varias pruebas de caracterización, con el fin de determinar sus propiedades adsortivas y características químicas. Además se realizó un análisis de la estructura y porosidad mediante microscopía electrónica de barrido con un equipo Tescan- Vega.

2.3.4.1. 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 hizo 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 pulverizada hasta alcanzar un tamaño de partícula

menor a 45 µm, de los que se tomaron 0,1 g

- Se agregaron 25 mL de la solución madre.
- Se agitó durante 30 min aproximadamente a 1 000 rev.
- 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)

2.3.4.2. 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 60º Brix para esto se mezclaron 60 g de azúcar morena en 100 g de agua destilada y se agitó hasta una completa disolución.
- Cada muestra de carbón activado fue pulverizada hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a 45 µm de los que se tomaron 0,6 g

- Se agregaron 100 mL de la solución de sacarosa.
- Se agitó durante 45 min a aproximadamente 1 000 rev y a una temperatura constante de 80 ºC.
- Se filtró la solución al vacío con la ayuda de un kitasato, embudo de 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 la solución de 60º Brix

Se calculó las unidades básicas de referencia (UBR) de acuerdo a la Ecuación 2.7

$$UBR = 1000 \times A_{430nm} - 2 \times A_{710nm} \qquad 2.7$$

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

2.3.4.3. 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 (Na_2CO_3) neutraliza grupos lactónicos y ácidos carboxílicos y el bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) 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.

Tabla 2.5. Reactivos utilizados para la titulación Boehm

Reactivo	Fórmula Química	Normalidad [N]
Ácido Clorhídrico	HCl	0,1
Carbonato de Sodio	Na_2CO_3	0,1
Bicarbonato de sodio	$NaHCO_3$	0,1
Hidróxido de sodio	NaOH	0,1
Fenolftaleína*	$C_{20}H_{14}O_4$	---

*Se usó como indicador

- La muestra fue pulverizada hasta alcanzar un tamaño de partícula menor a 45 µm, de los que se tomaron 0,6 g
- Se agregaron en 3 matraces, 0,2 g en cada uno.
- A cada matraz se agregaron 50 mL de soluciones de: NaOH, Na_2CO_3 y $NaHCO_3$ [0,1 N], respectivamente.
- Se agitaron durante 48 h, aproximadamente a 1 500 rev.
- Terminado 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].
- Este procedimiento se realizó a los blancos de las soluciones de NaOH, Na_2CO_3 y $NaHCO_3$ [0,1 N].

Los resultados se obtuvieron con la diferencia de los mL gastados de los blancos de NaOH, Na_2CO_3 y $NaHCO_3$ y los mL gastados de las muestras de NaOH, Na_2CO_3 y $NaHCO_3$, correspondientemente y para la identificación de los grupos presentes en el carbón se empleó la Ecuación 2.8, 2.9 y 2.10:

$$\boldsymbol{Grupo\ carboxílico} = mL\ blanco_{NaHCO_3} - mL\ muestra_{NaHCO_3} \qquad 2.8$$

$$\boldsymbol{Grupo\ lactona} = diferencia_{Na_2CO_3} - diferencia_{NaHCO_3} \qquad 2.9$$

$$\boldsymbol{Grupo\ fenólico} = diferencia_{NaOH} - diferencia_{Na_2CO_3} \qquad 2.10$$

2.3.4.4. Caracterización de la porosidad del carbón activado

El carbón activado de cuesco de palmiste a 500 ºC 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 a diferentes grados de aumento (2 000, 4 000, 8 000).

2.4. DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PARA LA PRODUCCIÓN DE 20 T/MES DE CARBÓN ACTIVADO QUÍMICAMENTE.

Para poder definir el diagrama de flujo del proceso de producción de carbón activado mediante activación química a partir de cuesco de palmiste, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas a nivel piloto, realizadas en el horno Nichols Herreshoff mono solera determinando así la cinética de carbonización-activación y el tiempo de residencia en el horno Nichols Herreshoff.

Se planteó una producción mensual de 20 t/mes de carbón activado, tomando como referencia que, según reportes del Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), en Ecuador una pequeña planta extractora de aceite de palma produce diariamente una tonelada de cuesco de palma (Roldán, 2009, p. 148).

Se consideró también que la producción de palma africana en el Ecuador, según FEDAPAL, fue de 152 537 t en el año 1993, desde la fecha señalada la producción de palma africana se ha incrementado en un 293 % y llegando a ser de 447 667 t en el año 2009. El consumo de palma africana a nivel nacional está alrededor de los 210 000 t, dejando aproximadamente 235 667 t de excedentes, mismos que son exportados a otros países (Muñoz, 2010, p. 2).

Tabla 2.6. Producción de palma africana en el Ecuador (FEDAPAL, 2010)

PRODUCCIÓN DE PALMA AFRICANA EN EL ACUADOR	
Año	***Producción t***
2007	396 301
2008	418 379
2009	428 594
2010	380 301
2011	472 988
2012	480 000

(Muñoz, 2010, p. 3)

Con los antecedentes presentados en la Tabla 2.6 se considera que la superficie de palma africana sembrada en el Ecuador para el 2019 será de alrededor de 391 000 ha (Muñoz, 2010, p. 3). Además, el cultivo de palma africana es uno de los principales cultivos en el Ecuador, se cultiva principalmente en las provincias de Esmeraldas, Los Ríos, Pichincha, Santo Domingo y en las provincias orientales de Sucumbíos y Orellana (Muñoz, 2010, p. 2).

Con estas consideraciones y los resultados obtenidos en las pruebas a nivel piloto se realizaron los balances de masa y energía para el proceso y se determinó el tamaño de la planta y se diseñaron los principales equipos.

Se diseñó un reactor para impregnar la materia prima con la solución química, un horno rotatorio que active la materia prima, para esto se utilizó la ecuación propuesta por Sullivan, Charles y Oliver (1927, p. 30) aplicable a hornos de producción de cemento.

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.

Para el cálculo del combustible necesario para la carbonización del cuesco de palmiste se determinó que a pesar de que existe una zona de impregnación y activación, la mayor energía se necesitará para activar el carbón.

2.5. EVALUACIÓN DE LA PRE FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE 20 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 2.11 y la Tasa Interna de Retorno (TIR), señalada en la Ecuación 2.12.

$$VAN = \sum_{t=1}^{n} \frac{BN_t}{1+i^{\,t}} - I_0 \qquad 2.11$$

Donde:
VAN: Valor Actual Neto
I_0: Valor de inversión Inicial
BN_t: Beneficio neto del periodo
i: Tasa de retorno del periodo
n: Número de periodos considerados

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

$$TIR = \sum_{t=1}^{n} \frac{BN_t}{1+i^{\,t}} - I_0 = 0 \qquad 2.12$$

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 el proceso de investigación, el diagrama de flujo del proceso de activación del cuesco de palmiste, el diseño de la planta para la producción de carbón activado mediante activación química con cloruro de zinc y el análisis de pre-factibilidad económica.

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL CUESCO DE PALMISTE

La caracterización de cada tipo de cuesco de palmiste se realizó en cuatro etapas. La primera etapa donde se determinó propiedades físicas como: tamaño de partícula, espesor, densidad real, densidad aparente y dureza. La segunda etapa que es la caracterización química, donde se determinó el contenido de biopolímeros presentes en los tipos de cuesco (lignina y celulosa), la humedad, contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo. La tercera etapa consistió en un análisis termogravimétrico para medir la variación del peso con relación a la temperatura y finalmente la cuarta etapa que fue la caracterización de la estructura de los tipos de cuesco observando la porosidad de los mismos.

3.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Para la caracterización física se determinó ciertas propiedades, tales como: tamaño de partícula, espesor, densidad real, densidad aparente y dureza.

La reducción de tamaño de los tipos de cuesco de palmiste 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). Para los ensayos que se realizaron en esta investigación se trabajó con un tamaño de partícula en un rango de 6,7 – 2,4 mm para producir carbón activado granular.

Tabla 3.1. Tratamiento de datos para ensayo de granulometría del tipo de cuesco Tenera después del proceso de reducción de tamaño con una trituradora de mandíbulas

Malla #	Abertura tamiz (mm)	Peso Retenido Tenera (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
3/8 in	9,50	6,0	6,02	6,02	93,98
3	6,73	42,3	42,47	48,49	51,51
4	4,75	22,0	22,09	70,58	29,42
6	3,35	16,6	16,67	87,25	12,75
8	2,36	11,7	11,75	99,00	1,00
10	2,00	0,2	0,20	99,20	0,80
12	1,70	0,3	0,30	99,50	0,50
14	1,40	0,2	0,20	99,70	0,30
16	1,18	0,2	0,20	99,90	0,10
-16	-1,18	0,1	0,10	100,00	0,00
Peso total retenido		99,6	100,0		
d80		8,6 mm			

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

Malla #	Abertura tamiz (mm)	Peso Retenido Dura (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
3/8 in	9,50	9,1	9,13	9,13	90,87
3	6,73	32,8	32,90	42,03	57,97
4	4,75	20,5	20,56	62,59	37,41
6	3,35	19,2	19,26	81,85	18,15
8	2,36	12,2	12,24	94,08	5,92
10	2,00	5,1	5,12	99,20	0,80
12	1,70	0,2	0,20	99,40	0,60
14	1,40	0,2	0,20	99,60	0,40
16	1,18	0,2	0,20	99,80	0,20
-16	-1,18	0,2	0,20	100,00	0,00
Peso total retenido		99,6	100,0		
d80		8,6 mm			

En la Tabla 3.1 y 3.2 se presentan los datos obtenidos del ensayo de granulometría realizado con la trituradora de mandíbulas (Braun Chipmunk). El

procesamiento gráfico usado para la determinación del tamaño de partícula se muestra en el Anexo II. Para cada muestra del cuesco de palmiste Tenera y Dura, el d_{80} (tamaño de grano) fue de 8,6 mm, lo que permite afirmar que el 80 % de las partículas tienen un tamaño menor o igual al valor antes señalado.

Para determinar el espesor de cada tipo de cuesco de palmiste se realizó un muestreo de la materia prima. Los datos promedios obtenidos tanto del espesor como de las densidades y dureza de cada uno de los tipos de cuesco se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades físicas de los tipos de cuesco de palmiste

	Espesor (mm)	**Densidad aparente (g/cm^3)**	**Densidad real (g/cm^3)**	**Dureza (%)**
Cuesco Tenera	2,03	0,33	1,27	95,89
Cuesco Dura	5,07	0,48	1,23	97,06

Como se puede observar en la Tabla 3.3, el espesor de cada tipo de cuesco de palmiste corresponde a un espesor pequeño, sin embargo se puede establecer la diferencia entre ambos tipos, es decir, el espesor del cuesco Tenera es aproximadamente 3 mm más pequeño que el espesor del cuesco Dura.

La densidad aparente fue calculada para un tamaño de partícula, para cada tipo de cuesco, entre malla 3 (6,73 mm) y la malla 8 (2,36 mm). La Tabla 3.3 muestra la densidad real de cada tipo de cuesco de palmiste, mismos que son bastante considerables y similares para ambos tipos de cuesco, lo que es beneficioso ya que en poco volumen se obtiene considerables cantidades de cuesco de palmiste, lo que confirma que es un material bastante denso, como para el tratamiento que se requiere aplicarlo. La dureza de cada tipo de cuesco es muy elevada, para ambos tipos de cuesco, aunque este dato no asegura que el carbón activado producido a partir de cada uno de éstos también duro.

3.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Para la caracterización química se realizaron pruebas en el laboratorio de Pulpa y Papel de la EPN, para determinar: humedad, contenido de celulosa, lignina y material soluble en alcohol benceno, según la normativa Tappi aplicable a maderas. Además se analizó cada tipo de cuesco de palmiste para determinar la cantidad de carbón fijo de la materia prima, esta información fue muy importante ya que ayudó a determinar si el proceso es viable.

3.1.2.1. Determinación de humedad, contenido de ceras, grasas y aceites, celulosa y lignina de cada tipo de cuesco de palmiste

Los datos obtenidos de los análisis realizados en el laboratorio de Pulpa y Papel de la EPN se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Composición química de la materia prima

Analito	Composición Tenera (%)	Composición Dura (%)
Humedad	6,88	6,10
Ceras, grasas y aceites solubles en alcohol-benceno	6,24	5,65
Celulosa	34,60	34,25
Lignina	44,65	41,19
Hemicelulosa*	7,63	12,81

* La hemicelulosa se calculó por diferencia

La cantidad de lignina y celulosa es bastante relevante, lo cual indica que estos componentes son la parte esencial del cuesco de palmiste. De igual manera para cada tipo de cuesco de palmiste la cantidad de material soluble en alcohol-benceno no es tan significativo; 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 1.2.6 de la Revisión Bibliográfica, 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.

3.1.2.2. Determinación del contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo

Los datos obtenidos en el ensayo se muestran en la Tabla 3.5. Se puede observar que la muestra tiene gran cantidad de porcentaje de volátiles, lo cual significa que a temperaturas controladas, estos compuestos podrían formar microporos, además, el porcentaje de cenizas es bastante pequeño lo cual se traduce en que no posee una cantidad de metales considerables y finalmente el porcentaje de carbón fijo es bastante considerable lo cual indica que la materia prima utilizada es adecuada para la obtención de carbón activado.

Tabla 3.5. Contenido de cenizas, volátiles y carbón fijo de la materia prima

	Volátiles (%)	Ceniza (%)	Carbón fijo* (%)
Cuesco Tenera	79,8	5,0	15,2
Cuesco Dura	80,8	3,5	15,7

* Se calcula por diferencia

3.1.3. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA MATERIA PRIMA

La muestra de cuesco de palmiste, fue sometida a un análisis termogravimétrico. La Figura 3.1 muestra la curva TGA y su primera derivada con respecto al tiempo.

La Figura 3.1 muestra que la muestra con el pasar del tiempo van perdiendo peso, lo que se traduce en la pirólisis del cuesco como la producción de gases. Se observa en la Figura 3.1 que el cuesco de palmiste presenta la mayor descomposición entre los 270 a 380 ºC.

Además se observa en la Figura 3.1 la presencia de 3 picos: el primero pico que corresponde a la eliminación de humedad de la muestra se da a una temperatura aproximada de 271 ºC, la misma que empieza aproximadamente a los 200 ºC. El segundo pico se da a una temperatura aproximada de 350 ºC, este corresponde a la eliminación de hemicelulosa de la muestra y finalmente el tercer pico que

corresponde a la eliminación de la celulosa y lignina se da a una temperatura de 385 ºC.

La figura 3.1 señala características importantes ya que se observa que el cuesco de palmiste presenta bajo contenido de hemicelulosa, dato que se confirma con la Tabla 3.4, por lo tanto va a necesitar un menor gasto energético para poder descomponer la hemicelulosa y al mismo tiempo llegar más rápidamente a la temperatura de descomposición de la lignina y celulosa.

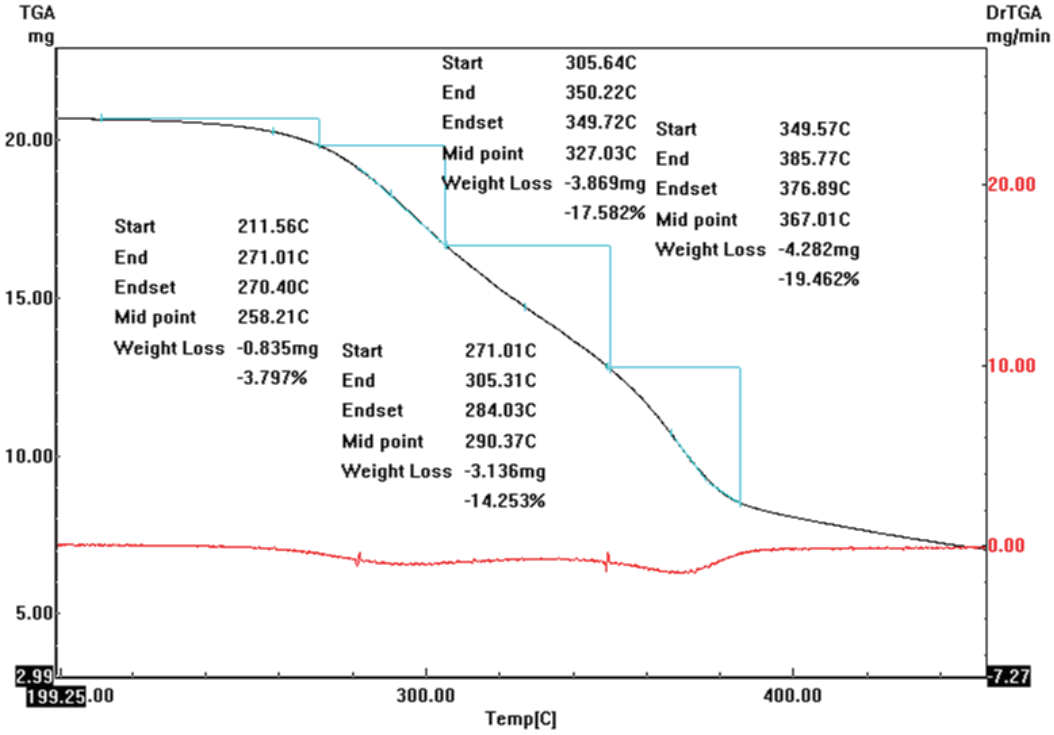


Figura 3.1. Curva TGA y DTGA del cuesco de palmiste

La pérdida de peso del cuesco de palmiste, es mayor en el intervalo de 250 a 400 ºC, por lo que se podría presumir que a temperaturas mayores se puede tiene la mejor opción para la producción del carbón ya que aún se tiene presente la lignina y como se dijo anteriormente esta es la biomolécula que produce la rigidez del cuesco.

La Figura 1.8 presenta la curva TGA del análisis termogravimétrico del cuesco de palmiste, es similar a la Figura 3.1; Hu et al. (2001), señala que el 60 % del peso se pierde entre 200 a 400 ºC (p. 883), resultado que se asemeja a los obtenidos en esta investigación.

Además, 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 3.4., posee una cantidad bastante significativa de lignina, para ambos tipos de cuescos.

3.2. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA MATERIA PRIMA SOBRE EL PROCESO DE CARBONIZACIÓN.

Para la evaluación de la influencia del espesor de cada tipo de cuesco de palmiste sobre la temperatura y el tiempo de carbonización se realizaron pruebas a nivel laboratorio.

3.2.1. PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO EN UNA MUFLA

Los análisis termogravimétricos señalados anteriormente sirvieron de base para las pruebas de carbonización a nivel laboratorio ya que ayudaron a establecer el rango de temperatura en la cual se llevaría a cabo el proceso, es decir el rango de temperaturas empleada será entre 400 – 600 ºC porque es en este intervalo de temperatura donde la lignina y la celulosa aún están presentes a pesar de que están en proceso de descomposición, cabe señalar que estos componentes son los principales de la materia prima y son los que aportan la rigidez al cuesco.

3.2.1.1. Análisis de la densidad aparente y densidad real del carbón de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Densidad aparente

Para la densidad aparente se tomó un tamaño nominal de partícula entre 1,7 mm y 1,18 mm que corresponden a las mallas con las que se realizaron las pruebas de dureza. En algunos casos como el material carbonizado estaba en un tamaño

de entre 6,73 mm a 4,75 mm se molió hasta obtener el d_{80} deseado. La Figura 3.2 y 3.3 muestran el gráfico de la densidad aparente tanto para el cuesco tipo Tenera y el cuesco tipo Dura, respectivamente, a las temperaturas de trabajo y la Figura 3.4 y 3.5 muestran el gráfico de la densidad real de igual manera para ambos tipos de cuesco de palmiste.

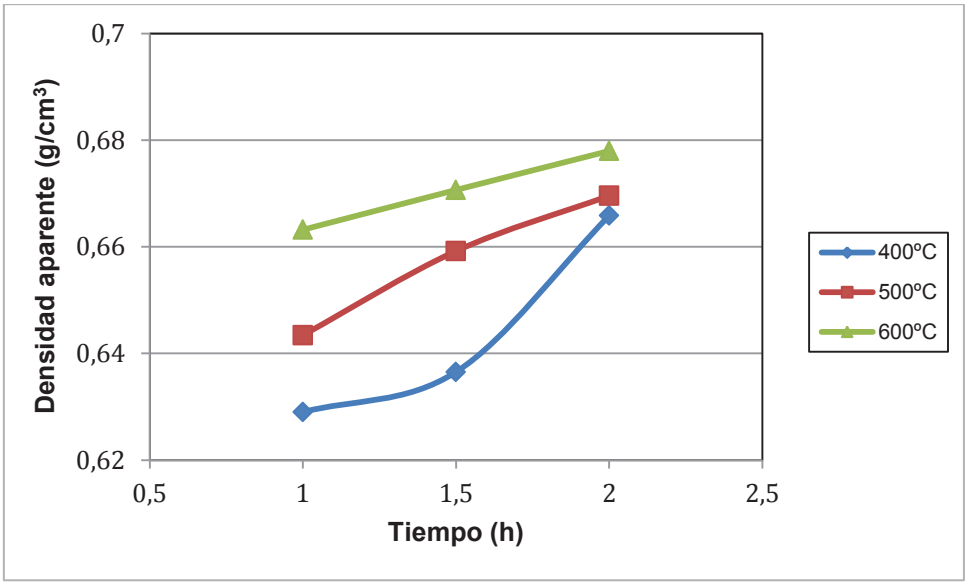


Figura 3.2. Densidad aparente del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a diferentes temperaturas, pruebas de laboratorio

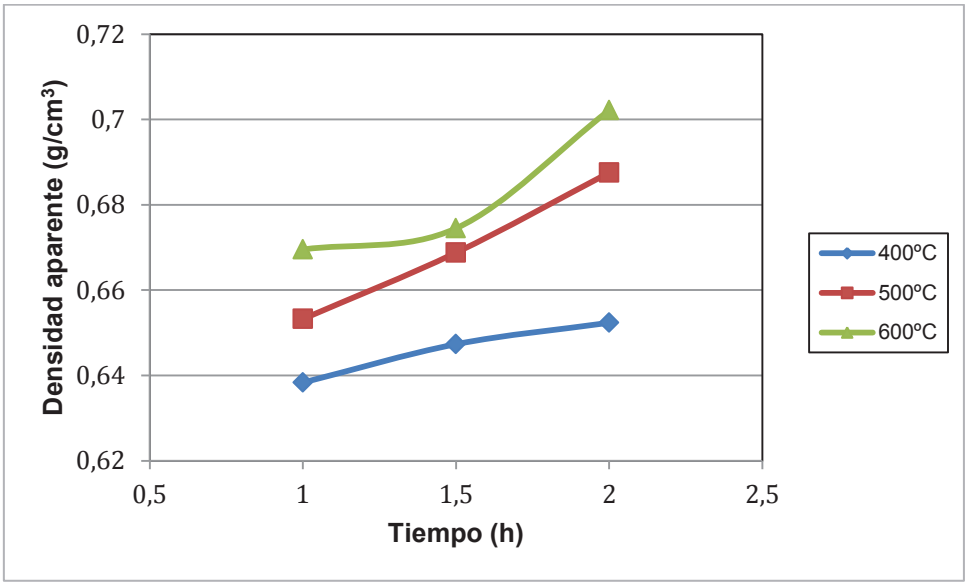


Figura 3.3. Densidad aparente del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a diferentes temperaturas, pruebas de laboratorio

Como se puede observar en la Figura 3.2 y 3.3, la densidad aparente aumenta con el tiempo para ambos tipos de cuesco de palmiste, lo que se traduce que conforme aumenta la temperatura y el tiempo, aumenta también la formación de poros, lo que provoca que el carbón producido se compacte. Por lo tanto para un volumen constante, se tiene mayor peso, es decir a mayor densidad aparente mayor capacidad para eliminar un adsorbato por unidad de volumen de adsorbente. El carbón a 600 ºC y 2 h presenta la mayor densidad aparente.

Densidad real

Para la densidad real las muestras fueron analizadas como se describe en el apartado 2.1.1.4. Aquí se muestran los resultados obtenidos.

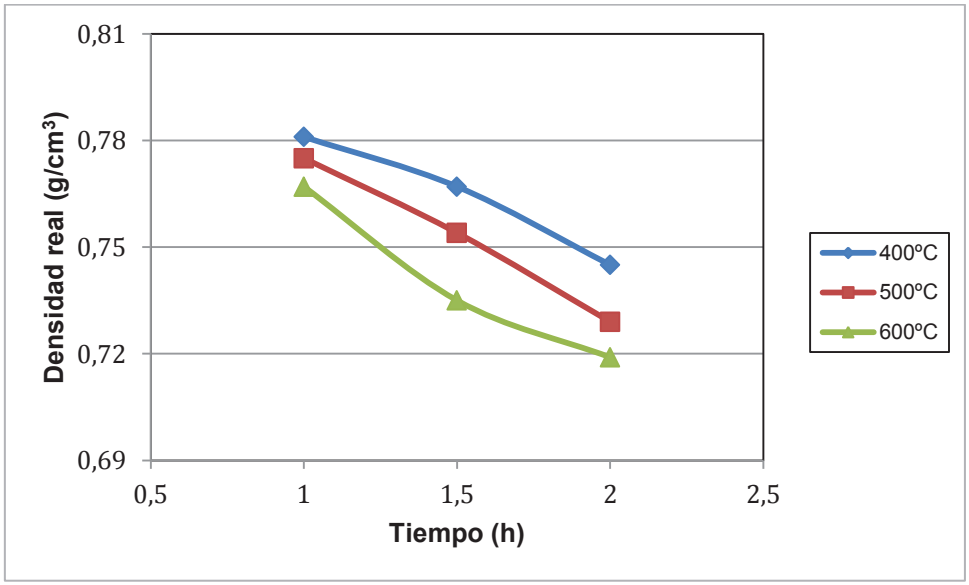


Figura 3.4. Densidad real del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a diferentes temperaturas, pruebas de laboratorio

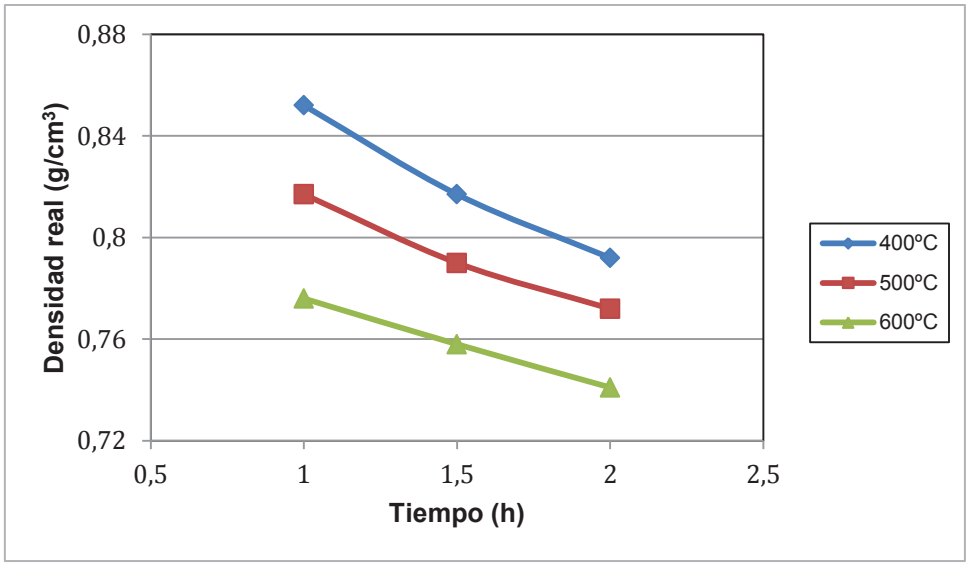


Figura 3.5. Densidad real del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a diferentes temperaturas, pruebas de laboratorio

Como se puede observar en la Figura 3.4 y 3.5, la densidad real para ambos tipos de cuesco disminuye con el tiempo, además, al aumentar la temperatura la densidad también disminuye. El carbón a 600 ºC y 2 h presenta la mayor densidad real.

El fenómeno que se presenta para la densidad real y para la densidad aparente se da porque la densidad aparente refleja el contenido total de porosidad, es decir considera el volumen macizo de las partículas más el volumen de los poros y de los huecos, es decir contempla los huecos que el material produce en el recipiente, mientras que la densidad real solo contempla los poros accesibles e inaccesibles de las partículas.

3.2.1.2. Análisis de dureza del carbón de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Para la determinación de la dureza se tomó un tamaño nominal de partícula entre 1,7 mm y 1,18 mm que corresponden a las mallas de dureza. En algunos casos como el material carbonizado estaba en un tamaño de entre 6,73 mm a 4,75 mm por lo que se trituro hasta obtener el tamaño deseado, es decir, entre 1,7 – 1,18 mm. La Figura 3.6 y 3.7 muestran los gráficos de dureza a las distintas temperaturas de trabajo.

Tabla 3.6. Tamices que definen el tamaño del cuesco de palmiste carbonizado

Malla Tyler (#)	Abertura (mm)
3	6,73
4	4,75

Tabla 3.7. Tamices de dureza

Malla Tyler (#)	Abertura (mm)
12	1,70
14	1,40
16	1,18

Como se puede observar en la Figura 3.6 y 3.7, la mayor dureza de cada tipo de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, se da a una temperatura de 400 ºC. Se observa además que a medida que se aumenta el tiempo y la temperatura de pirolisis, el carbón que se obtiene presenta menor dureza. El carbón que obtuvo la mayor dureza, tanto para el cuesco tipo Tenera como para el cuesco tipo Dura, fue el obtenido en la pirolisis a 400 ºC 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.

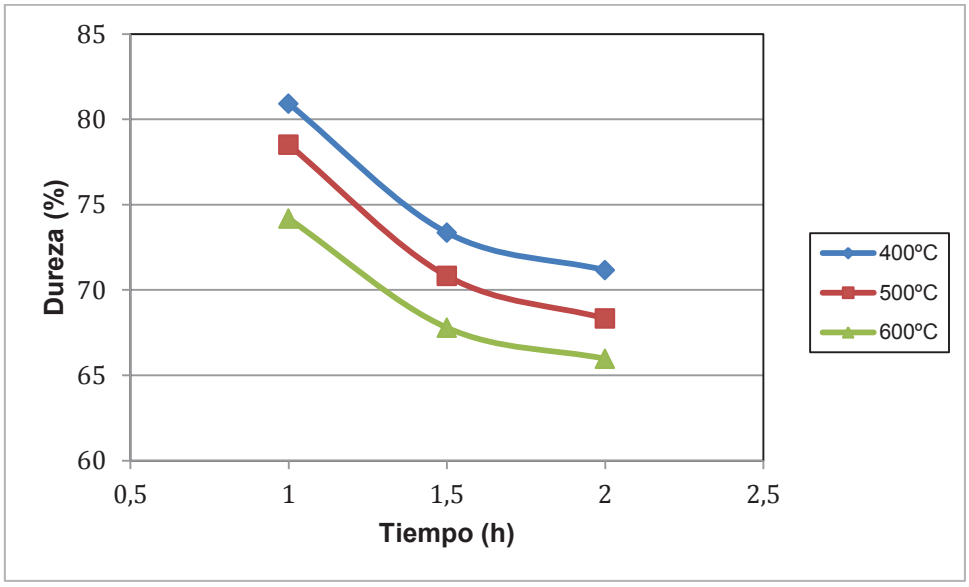


Figura 3.6. Porcentaje de dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en pruebas de laboratorio en función del tiempo a diferentes temperaturas

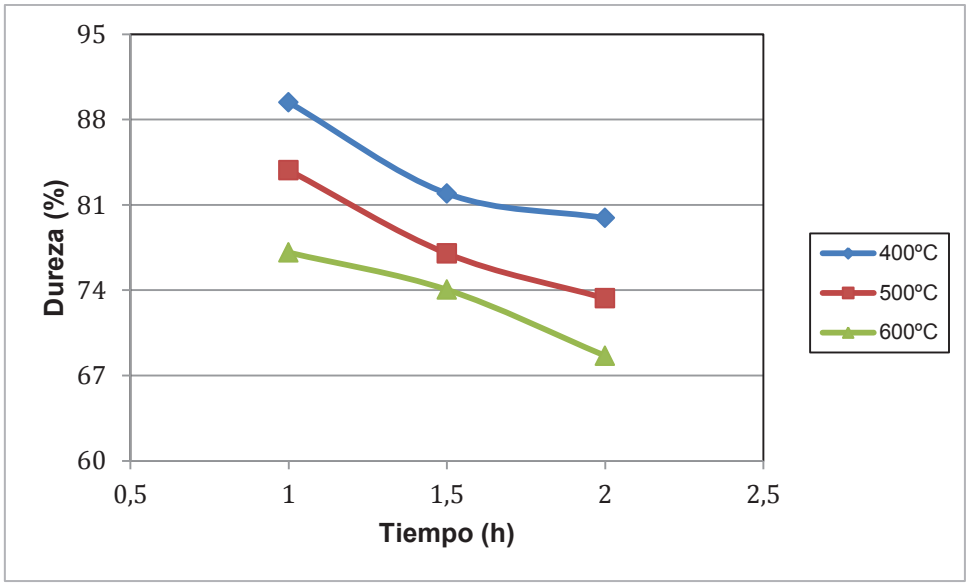


Figura 3.7. Porcentaje de dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en pruebas de laboratorio en función del tiempo a diferentes temperaturas

3.2.1.3. Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Los datos obtenidos para cada muestra carbonizada a diferentes temperaturas y tiempos se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos. Pruebas de laboratorio

	Temperatura	Tiempo (h)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
Cuesco Tenera	400 ºC	1	48,9	5,8	45,3
		1,5	39,4	3,1	57,5
		2	27,9	3	69,1
	500 ºC	1	35,1	3,3	61,6
		1,5	21,2	3,7	75,1
		2	11,7	6,6	81,7
	600 ºC	1	25,4	4,5	70,1
		1,5	16,5	5,7	77,8
		2	8	6,6	85,4
Cuesco Dura	400 ºC	1	55,8	2,5	41,7
		1,5	42,5	1,9	55,6

		2	37	2,5	60,5
	500 ºC	1	23,4	3,9	72,7
		1,5	21,4	3,6	75
		2	16,8	3,9	79,3
	600 ºC	1	18,8	6,5	74,7
		1,5	11,9	6,7	81,4
		2	7,7	4,8	87,5

Como se puede observar en la Tabla 3.8, la cantidad de carbón fijo, tanto para el cuesco tipo Tenera y tipo Dura, aumenta a medida que aumenta la temperatura y aumenta el tiempo de pirolisis. Esto es porque en el proceso de carbonización los volátiles se pirolizan a menor temperatura, haciendo que se acumule carbón fijo.

Así, la cantidad de volátiles disminuye a medida que aumenta la temperatura y el tiempo para ambos tipos de cuescos. La cantidad de ceniza a las diferentes temperaturas y tiempos es casi similar.

Para los dos tipos de cuesco, Tenera y Dura, la pirolización llevada a cabo a 600 ºC y durante 2 h son las muestras que más cantidad de carbón fijo presentan, mientras que las muestras pirolizadas durante 1 h a 400 ºC, tiene un porcentaje de carbón fijo por debajo del 50 %, a pesar de ello, este porcentaje es más del doble que el porcentaje de carbón fijo de la de la materia prima según la Tabla 3.5.

Por lo tanto los dos tipos de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, tienen un comportamiento similar, es decir, a mayor temperatura se tiene un mayor porcentaje de carbón fijo en la muestra, de esta forma el fin de la pirolisis es formar la mayor cantidad de carbón. En el caso de la ceniza para ambos tipos de cuesco de palmiste 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.

3.2.1.4. Relación entre el carbón fijo y la dureza del carbón de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Para establecer una relación entre el contenido de carbón fijo y la dureza de cada tipo de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, es necesario construir una gráfica de estos parámetros con relación al tiempo de pirólisis, como se muestran en las Figuras 3.8 – 3.13, estas gráficas se construyeron para 400, 500 y 600 ºC respectivamente.

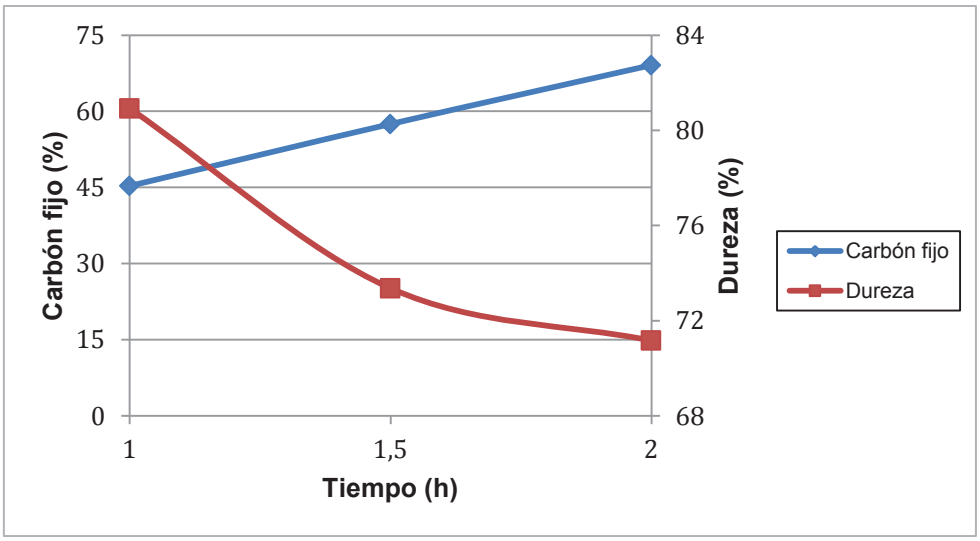


Figura 3.8. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a 400 ºC para pruebas de laboratorio

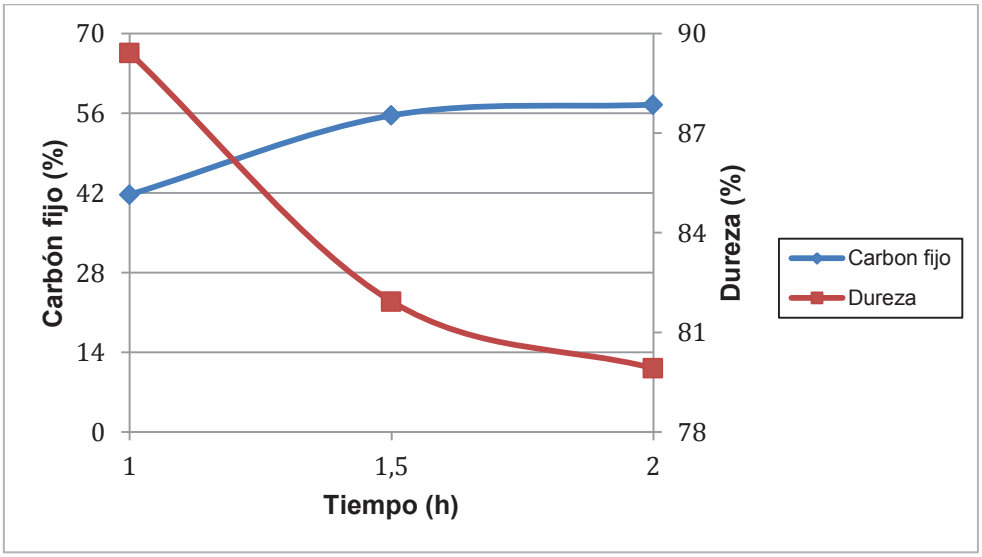


Figura 3.9. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a 400 ºC para pruebas de laboratorio

Como se observa en la Figura 3.8 y 3.9, el carbón pirolizado a 400ºC durante 2 h de ambos tipos de cuesco de palmiste poseen el mayor porcentaje de carbón fijo, pero en este punto la dureza es mínima para los dos tipos, Tenera y Dura. Por lo tanto se establece que a mayor tiempo de pirolisis existe mayor cantidad de carbón fijo y una menor dureza. Para el caso del cuesco Tenera en la Figura 3.8 la variación de porcentaje de carbón fijo entre 1 y 2 h es lineal, lo que no sucede con el cuesco tipo Dura en la Figura 3.9 ya que 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 a este último caso sucede con la dureza para los dos tipos de cuesco de palmiste, la mayor disminución de la dureza se presenta entre 1 y 1,5 h, no así entre 1,5 y 2 h la disminución de la dureza es mínima.

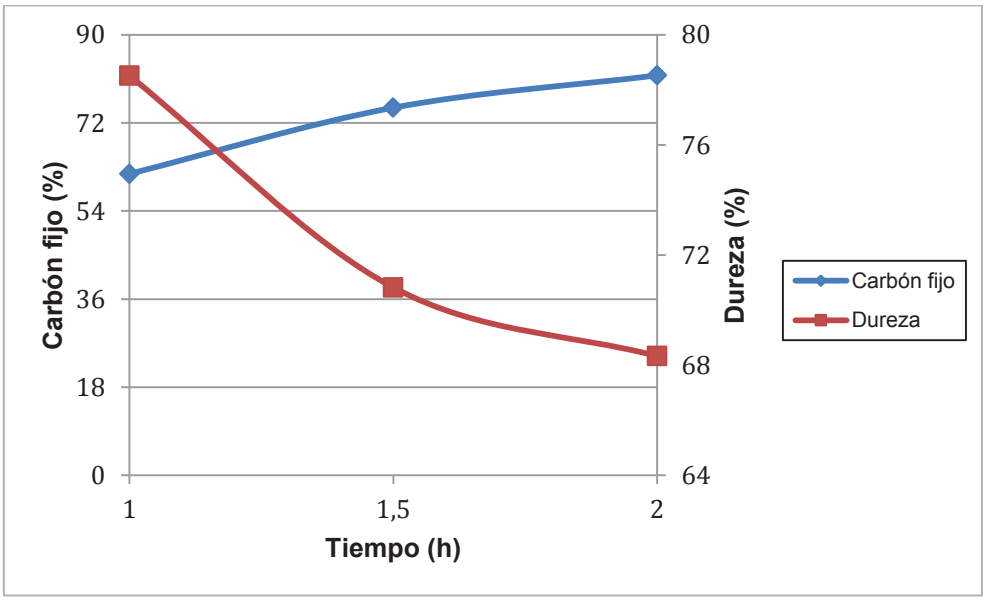


Figura 3.10. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a 500 ºC para pruebas de laboratorio

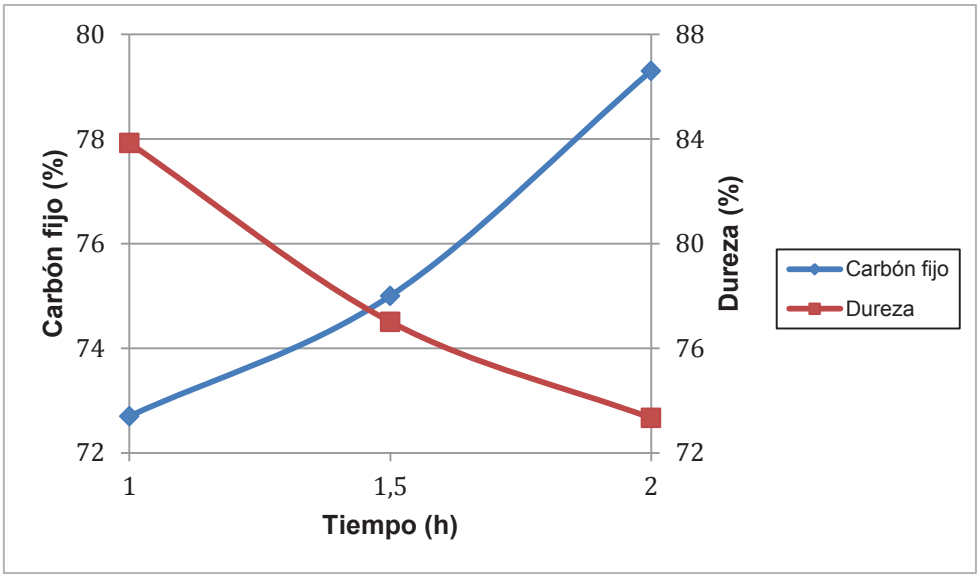


Figura 3.11. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a 500 ºC para pruebas de laboratorio

La Figura 3.10 y 3.11 muestra el carbón pirolizado del cuesco Tenera y Dura, respectivamente, a 500 ºC. Se puede observar que se presenta el mismo fenómeno, es decir, a mayor tiempo de pirolisis, el carbón fijo aumenta mientras que la dureza disminuye. Sin embargo para el cuesco Tenera en la Figura 3.10 se tiene que la disminución y aumento de carbón fijo y dureza, respectivamente, es relevante entre 1 y 1,5 h, ya que entre 1,5 y 2 h es mínima. Para el cuesco Dura en la Figura 3.11, tanto la disminución de la dureza como el aumento de carbón fijo mientras transcurre el tiempo es considerable durante todo el tiempo del ensayo, ya que estos se dan en una cantidad considerable tanto de 1 a 1,5 h y de 1,5 a 2 h.

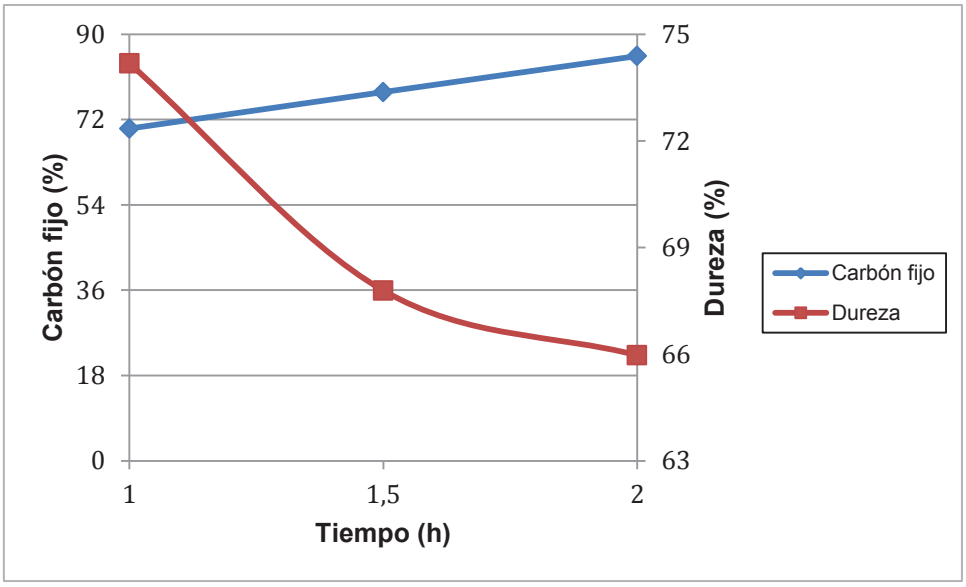


Figura 3.12. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera en función del tiempo a 600 ºC para pruebas de laboratorio

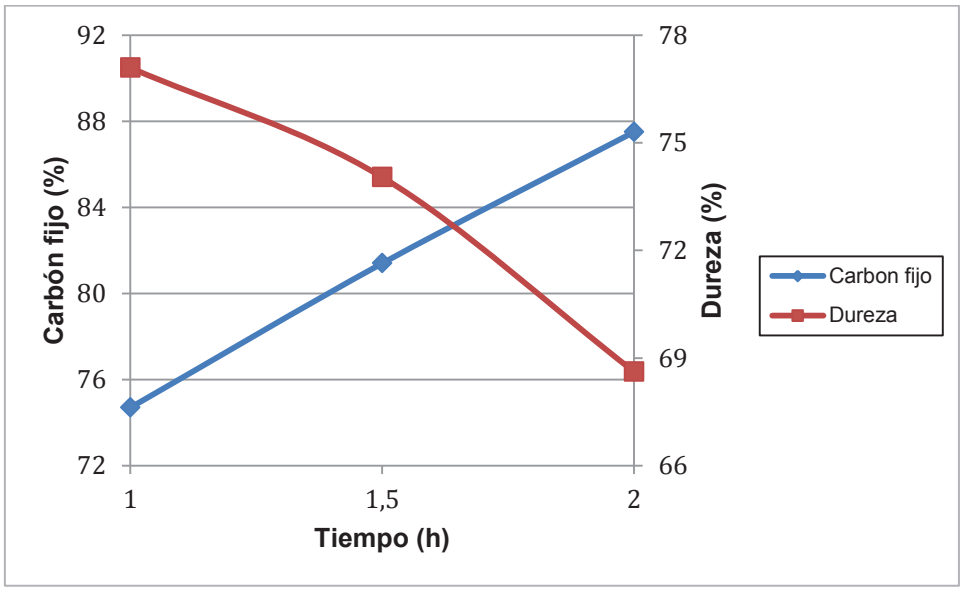


Figura 3.13. Porcentaje de carbón fijo y dureza del cuesco de palmiste carbonizado tipo Dura en función del tiempo a 600 ºC para pruebas de laboratorio

Finalmente las Figura 3.12 y 3.13 muestran el carbón pirolizado de ambos cuescos de palmiste, Tenera y Dura para 600 ºC. En la Figura 3.12 se observa que la disminución de la dureza es mayor en el intervalo de tiempo de 1 a 1,5 h, mientras que de 1,5 a 2 h esta disminución es poca, por otro lado el aumento del carbón fijo ya no es tan evidente como en los casos anteriores ya que el aumento es en poca cantidad y se da de manera equitativa tanto en el intervalo de 1 a 1,5 h como de 1,5 a 2 h.

3.2.1.5. Rendimiento de la carbonización de los dos tipos de cuesco de palmiste a nivel de laboratorio para diferentes temperaturas y tiempos

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 3.9.

Tabla 3.9. Datos obtenidos para pruebas de laboratorio del rendimiento de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos.

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Rendimiento (%)
Cuesco Tenera	400	1	50,58
		1,5	40,74
		2	37,07
	500	1	34,36
		1,5	32,00
		2	30,59
	600	1	29,87
		1,5	28,76
		2	24,88
Cuesco Dura	400	1	50,09
		1,5	41,69
		2	40,25
	500	1	34,09
		1,5	30,68
		2	30,39
	600	1	29,72
		1,5	28,95
		2	28,05

La Tabla 3.9 muestra la variación del rendimiento en función de la temperatura y del tiempo de pirólisis. Se observa que para una menor temperatura se tiene un mayor rendimiento, es decir a 400 ºC se tiene el mayor rendimiento tanto para el cuesco Tenera como para el cuesco Dura, el rendimiento a 500 ºC es 20 % menor que del carbón de los dos tipos de cuesco a 400 ºC y a 600 ºC la disminución del rendimiento comparado con el carbón a 500 ºC es tan solo de 5 %

aproximadamente. Se observa además que a medida que se aumenta el tiempo de pirolisis para una misma temperatura, disminuye el rendimiento.

El carbón que obtuvo el mayor rendimiento fue el de 400 ºC 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. El proceso para el cuesco de palmiste tipo Tenera y tipo Dura tiene un rendimiento moderadamente bajo, 34 %, sin embargo, este rendimiento no es el único indicador de que es un proceso ineficiente, ya que el proceso es eficiente cuando el carbón activado producido sea de gran porosidad y con buena capacidad de adsorción.

3.3. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CLORURO DE ZINC SOBRE EL PROCESO DE CARBONIZACIÓN-ACTIVACIÓN DEL CUESCO DE PALMISTE DE DIFERENTE ESPESOR

Después de realizar las pruebas de carbonización en una mufla de los dos tipos de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, se realizaron pruebas de activación química con cloruro de zinc.

3.3.1. PRUEBAS DE LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON CLORURO DE ZINC A NIVEL LABORATORIO

Para las pruebas de laboratorio se fijó el rango de concentración de la solución de cloruro de zinc que se empleó como plantea Praucher, además las temperaturas a partir de los datos obtenidos en el análisis termogravimétrico para cada cuesco de palmiste, que señalaban una temperatura de descomposición de la lignina de 385 ºC para el cuesco Tenera y 392 ºC para el cuesco Dura. Sin embargo se iniciaron las pruebas a 450 ºC porque a esta temperatura aún existe la presencia de lignina casi en su totalidad y recién empieza realmente a descomponerse la materia prima.

3.3.1.1. Determinación de la superficie específica del carbón activado, por medio del índice de yodo

Para los carbones activados obtenidos del cuesco de palmiste tipo Tenera y Dura producido a diferentes tiempos y temperaturas se les aplico en primera instancia la prueba de índice de yodo, de esta manera se determinó la mejor concentración de solución empleada en base a los resultados obtenidos de los carbones activados obtenidos y así poder aplicar los ensayos posteriores. La Tabla 3.10 muestra los datos obtenidos para 450, 500 y 600ºC con una solución de X_{Zn} = 0,4 (g Zn/g cuesco), la tabla 3.11 muestra los datos obtenidos con una solución de X_{Zn} = 0,5 (g Zn/g cuesco) y la tabla 3.12 muestra los datos obtenidos con una solución de X_{Zn} = 0,6 (g Zn/g cuesco).

Tabla 3.10. Índice de Yodo de los carbones activado de los tipos de cuesco de palmiste para X_{Zn} = 0,4 (g Zn/g cuesco)

	Temperatura	Tiempo (h)	Índice de Iodo
Cuesco Tenera	450 ºC	1	433
		1,5	394
		2	370
	500 ºC	1	394
		1,5	422
		2	473
	600 ºC	1	441
		1,5	493
		2	528
Cuesco Dura	450 ºC	1	358
		1,5	457
		2	477
	500 ºC	1	349
		1,5	469
		2	422
	600 ºC	1	401
		1,5	457
		2	473

Tabla 3.11. Índice de Yodo de los carbones activado de los tipos de cuesco de palmiste para X_{Zn} = 0,5 (g Zn/g cuesco)

	Temperatura	Tiempo (h)	Índice de Iodo
Cuesco Tenera	450 ºC	1	449
		1,5	513
		2	394
	500 ºC	1	538
		1,5	513
		2	394
	600 ºC	1	493
		1,5	600
		2	528
Cuesco Dura	450 ºC	1	528
		1,5	457
		2	469
	500 ºC	1	349
		1,5	469
		2	457
	600 ºC	1	408
		1,5	469
		2	528

Tabla 3.12. Índice de Yodo de los carbones activado de los tipos de cuesco de palmiste para X_{Zn} = 0,6 (g Zn/g cuesco)

	Temperatura	Tiempo (h)	Índice de Iodo
Cuesco Tenera	450 ºC	1	426
		1,5	508
		2	538
	500 ºC	1	422
		1,5	465
		2	528
	600 ºC	1	518
		1,5	513
		2	508
Cuesco Dura	450 ºC	1	418
		1,5	528
		2	498
	500 ºC	1	481
		1,5	457
		2	548
	600 ºC	1	449
		1,5	538
		2	508

Como se puede observar en las Tablas 3.10, 3.11 y 3.12 el índice de yodo, para aun mismo tipo de cuesco a una concentración de solución dada, aumenta con el tiempo, además, también se observa que el índice de iodo aumenta al incrementar la temperatura.

Estos aumentos mencionados no son muy marcados si se analiza cada tipo de cuesco de palmiste por separado comparando las tres diferentes concentraciones de solución de cloruro de zinc, sin embargo, a pesar de que no existe exorbitantes diferencias, los mejores resultados de índice de yodo se obtienen a una concentración de X_{Zn} = 0,5 (g Zn/g cuesco), lo cual indica que es la concentración de solución más adecuada para poder trabajar con este tipo de carbón activado y estudiarlo más en detalle.

Siendo la superficie específica del carbón activado un parámetro determinante en la vialidad del proceso, se consideró el carbón activado con una solución de cloruro de zinc de X_{Zn} = 0,5 (g Zn/g cuesco) el carbón que arroja mejores resultados para ambos tipos de cuesco de palmiste, por lo tanto, posteriores análisis serán aplicados únicamente a este carbón activado.

3.3.1.2. Análisis de la densidad aparente y densidad real del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Densidad aparente

Para la densidad aparente se tomó un tamaño nominal de partícula entre 1,7 mm y 1,18 mm que corresponden a las mallas con las que se realizaron las pruebas de dureza. En algunos casos como el material empleado estaba en un tamaño de entre 6,73 mm a 4,75 mm se trituró hasta obtener el d_{80} deseado. La Figura 3.14 y 3.15 muestran el gráfico de la densidad aparente tanto para el cuesco tipo Tenera y el cuesco tipo Dura, respectivamente, a las temperaturas de trabajo y la Figura 3.16 y 3.17 muestran el gráfico de la densidad real de igual manera para ambos tipos de cuesco de palmiste.

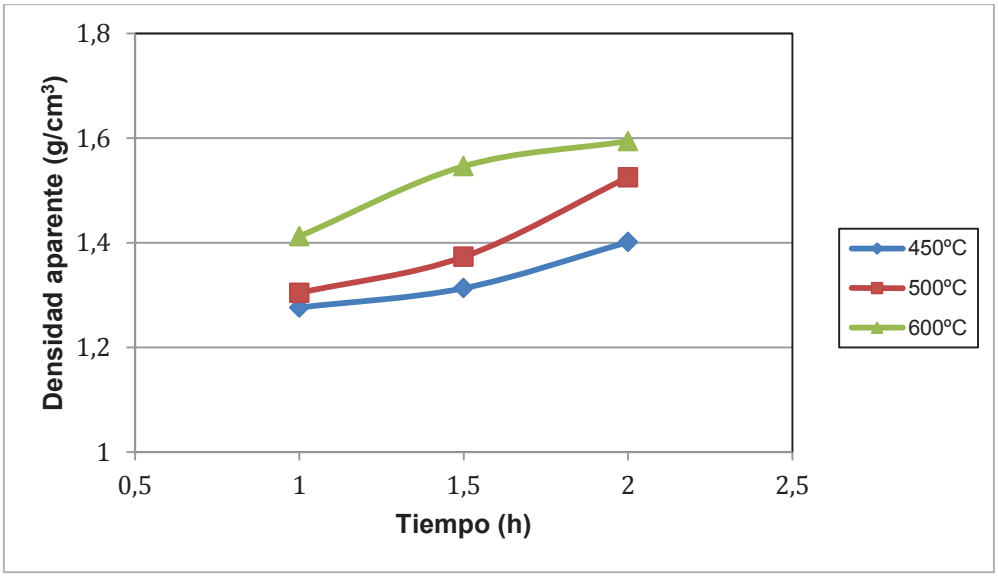


Figura 3.14. Densidad aparente del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes temperaturas en función del tiempo, pruebas de laboratorio

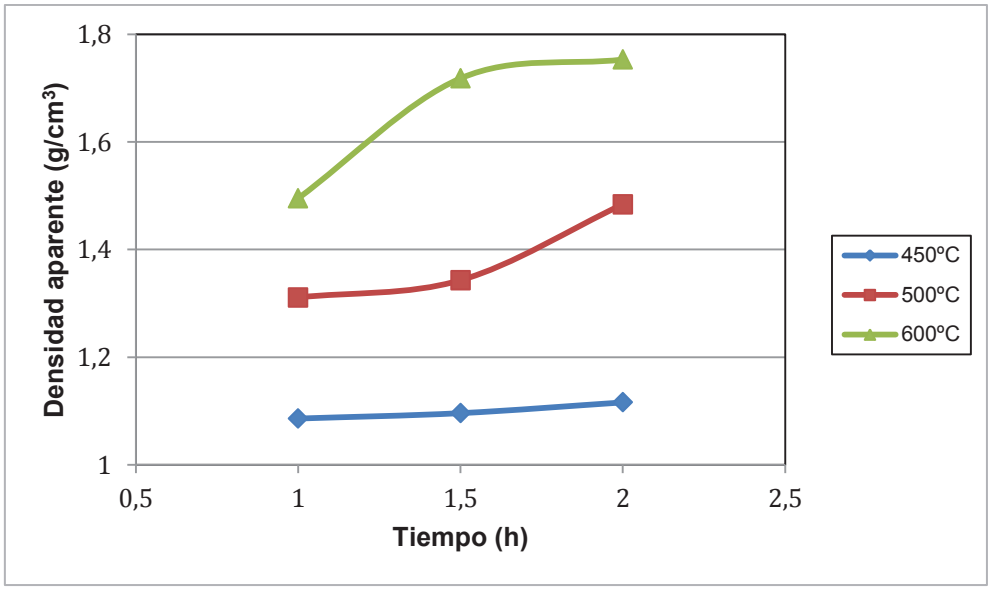


Figura 3.15. Densidad aparente del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes temperaturas en función del tiempo, pruebas de laboratorio

Como se puede observar en la Figura 3.14 y 3.15, 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. Lo mismo sucede a mayores temperaturas, donde ya existe porosidad considerable, por lo que el peso aumenta. El carbón a 600 ºC y 2 h presenta la mayor densidad aparente.

Densidad real

Para la densidad real de las muestras fueron analizadas como se describe en el apartado 2.1.1.4. Aquí se muestran los resultados obtenidos.

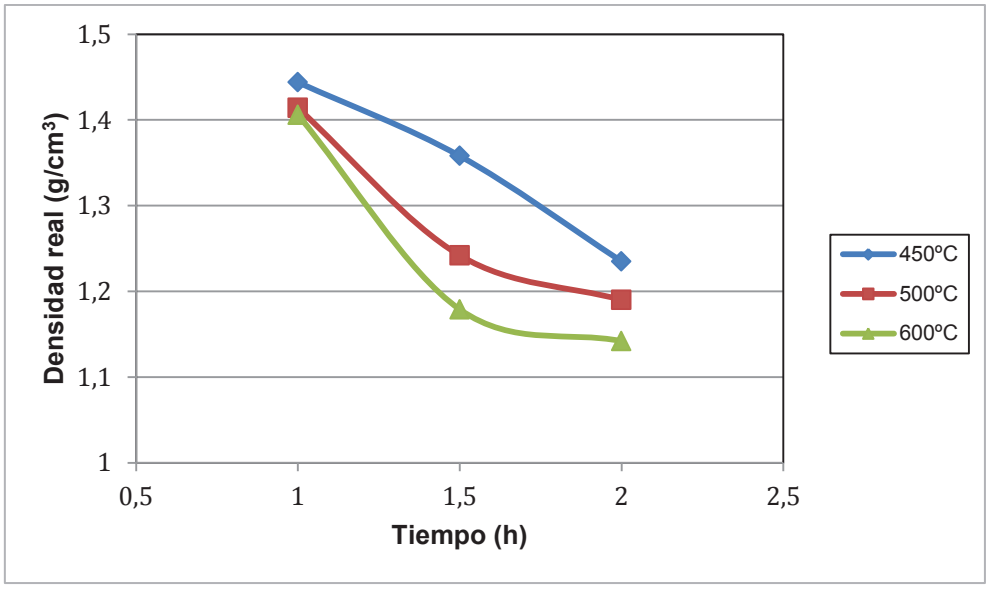


Figura 3.16. Densidad real del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes temperaturas en función del tiempo, pruebas de laboratorio

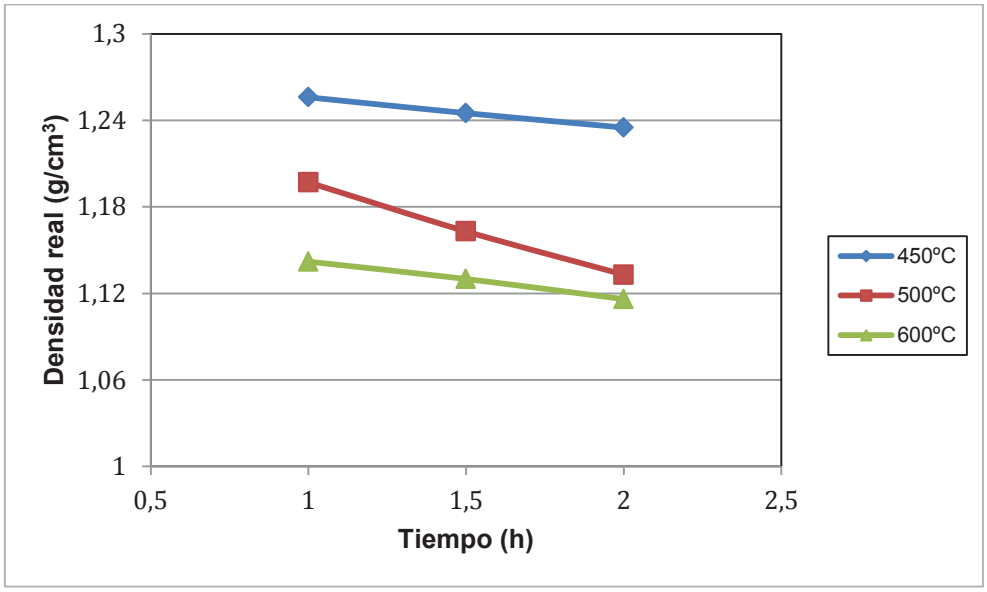


Figura 3.17. Densidad real del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes temperaturas en función del tiempo, pruebas de laboratorio

Como se puede observar en la Figura 3.16 y 3.17, la densidad real disminuye con el tiempo y con el aumento de la temperatura, para ambos tipos de cuesco de palmiste. Esto se explica ya que la densidad aparente refleja el contenido total de porosidad, es decir considera el volumen macizo de las partículas más el volumen de los poros y de los huecos. El carbón a 600 ºC y 2 h presenta la mayor densidad real.

3.3.1.3. Análisis de dureza del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Para la determinación de la dureza se tomó un tamaño nominal de partícula entre 1,7 mm y 1,18 mm que corresponden a las mallas de dureza, para los casos donde el material estaba en un tamaño de entre 6,73 mm a 4,75 mm se trituro hasta obtener el tamaño deseado, es decir, entre 1,7 – 1,18 mm. La Figura 3.18 y 3.19 muestran los gráficos de la dureza a las distintas temperaturas de trabajo.

Las tablas 3.13 y 3.14 muestran las mallas empleadas tanto para determinar el tamaño de la materia prima como las mallas de dureza empleadas en la prueba.

Figura 3.13. Tamices que definen el tamaño del cuesco de palmiste

Malla Tyler (#)	Abertura (mm)
3	6,73
4	4,75

Figura 3.14. Tamices de dureza

Malla Tyler (#)	Abertura (mm)
12	1,70
14	1,40
16	1,18

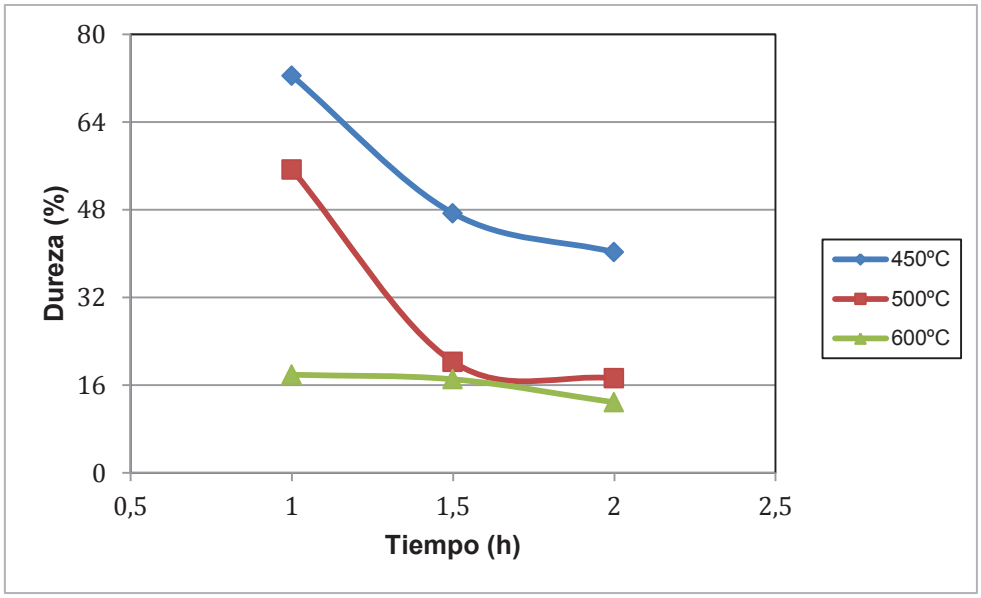


Figura 3.18. Porcentaje de dureza del cuesco de palmiste activado tipo Tenera en pruebas de laboratorio en función del tiempo a diferentes temperaturas

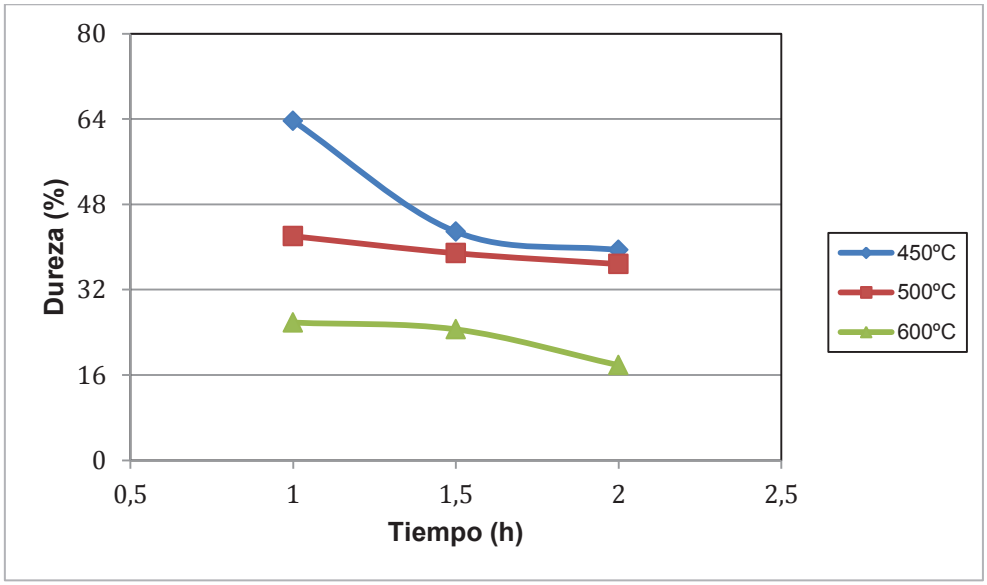


Figura 3.19. Porcentaje de dureza del cuesco de palmiste activado tipo Dura en pruebas de laboratorio en función del tiempo a diferentes temperaturas

Como se puede observar en la Figura 3.18 y 3.19, la mayor dureza de cada tipo de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, se da a una temperatura de 450 ºC. Se observa además que a medida que se aumenta el tiempo y la temperatura de pirolisis, el carbón que se obtiene presenta menor dureza. El carbón que obtuvo la mayor dureza, tanto para el cuesco tipo Tenera como para el cuesco tipo Dura, fue el obtenido en la pirolisis a 450 ºC 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.

3.3.1.4. Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Los datos obtenidos para cada muestra de carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos. Pruebas de laboratorio

	Temperatura	Tiempo (h)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
Cuesco Tenera	450 ºC	1	65,5	8,4	26,1
		1,5	58,6	8,9	32,5
		2	57,3	6,6	36,1
	500 ºC	1	54,6	7,6	37,8
		1,5	52,7	8,3	39
		2	49,4	8,9	41,7
	600 ºC	1	47,3	8,3	44,4
		1,5	44,5	7,6	47,9
		2	41,3	7,2	51,5
Cuesco Dura	450 ºC	1	47,9	5,3	46,8
		1,5	46,2	6,4	47,4
		2	44,4	5,4	50,2
	500 ºC	1	40,7	4	55,3
		1,5	35,7	5	59,3
		2	34,9	5,7	59,4
	600 ºC	1	31,5	5,3	63,2
		1,5	28,9	4,5	66,6
		2	25,9	5,5	68,6

Como se puede observar en la Tabla 3.15, la cantidad de carbón fijo, tanto para el carbón activado tipo Tenera y tipo Dura, aumenta a medida que aumenta la

temperatura y aumenta el tiempo de pirolisis. Esto es porque en el proceso de carbonización los volátiles se pirolizan a menor temperatura, haciendo que se acumule carbón fijo. Así, la cantidad de volátiles disminuye a medida que aumenta la temperatura y el tiempo para ambos tipos de cuescos. La cantidad de ceniza a las diferentes temperaturas y tiempos es casi similar.

Para los dos tipos de cuesco, Tenera y Dura, la pirolización llevada a cabo a 600 ºC y durante 2 h son las muestras que más cantidad de carbón fijo presentan, mientras que las muestras pirolizadas durante 1 h a 450 ºC, tiene un porcentaje de carbón fijo por debajo del 50 %, a pesar de ello, este porcentaje es más del doble que el porcentaje de carbón fijo de la de la materia prima según la Tabla 3.5.

Por lo tanto los dos tipos de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, tienen un comportamiento similar, es decir, a mayor temperatura se tiene un mayor porcentaje de carbón fijo en la muestra, de esta forma el fin de la pirolisis es formar la mayor cantidad de carbón. En el caso de la ceniza para ambos tipos de cuesco de palmiste 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.

3.3.1.5. Relación entre el carbón fijo y la dureza del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Para establecer una relación entre el contenido de carbón fijo y la dureza de cada tipo de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, es necesario construir una gráfica de estos parámetros con relación al tiempo de pirólisis, como se muestran en las Figuras 3.20 – 3.25, estas gráficas se construyeron para 450, 500 y 600 ºC respectivamente.

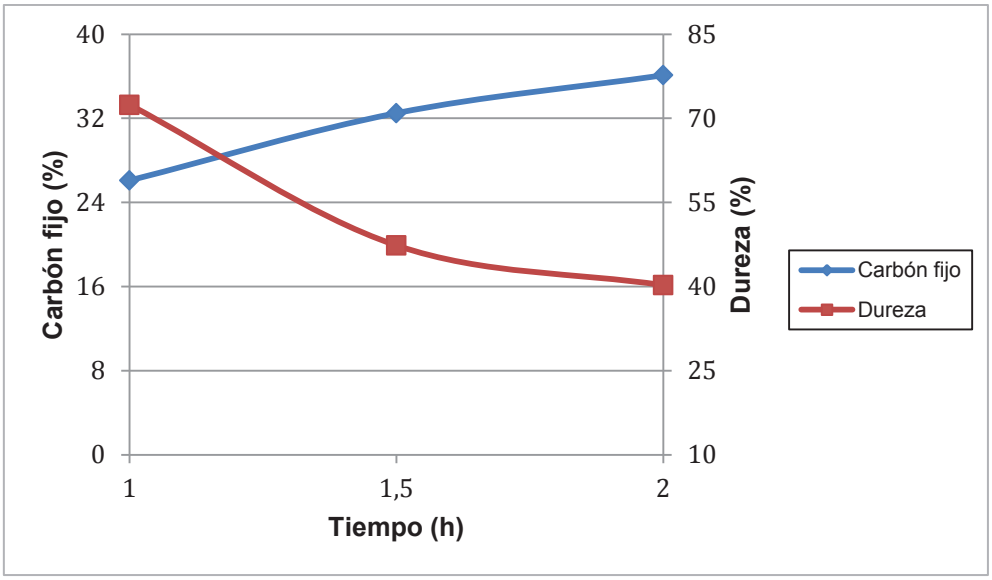


Figura 3.20. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a 450 ºC para pruebas de laboratorio

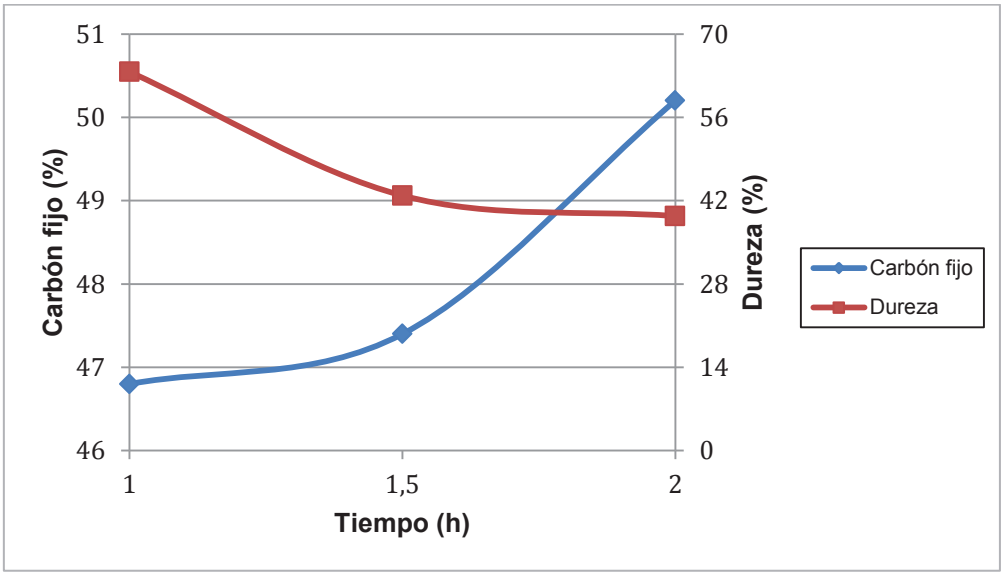


Figura 3.21. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a 450 ºC para pruebas de laboratorio

Como se observa en la Figura 3.20 y 3.21, el carbón activado a 450 ºC durante 2 h de ambos tipos de cuesco de palmiste poseen el mayor porcentaje de carbón fijo, pero en este punto la dureza es mínima para los dos tipos, Tenera y Dura. Por lo tanto se establece que a mayor tiempo de activación existe mayor cantidad de carbón fijo y una menor dureza. Para el caso del cuesco Tenera en la Figura 3.20 la variación de porcentaje de carbón fijo entre 1 y 2 h es lineal, lo que no sucede con el cuesco tipo Dura en la Figura 3.21 ya que 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 a este último caso sucede con la dureza para los dos tipos de cuesco de palmiste, la mayor disminución de la dureza se presenta entre 1 y 1,5 h, no así entre 1,5 y 2 h la disminución de la dureza es mínima.

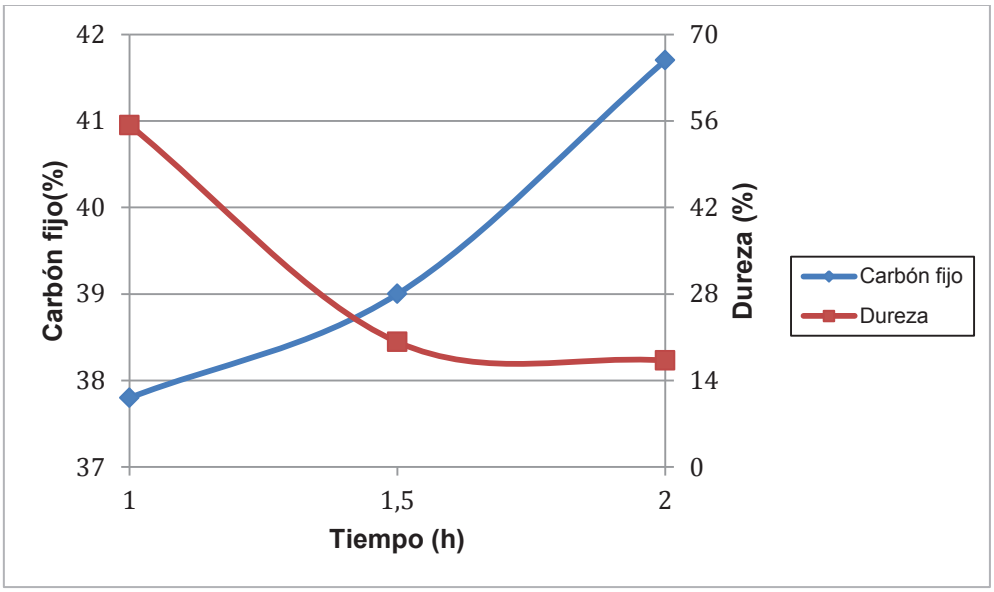


Figura 3.22. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a 500 ºC para pruebas de laboratorio

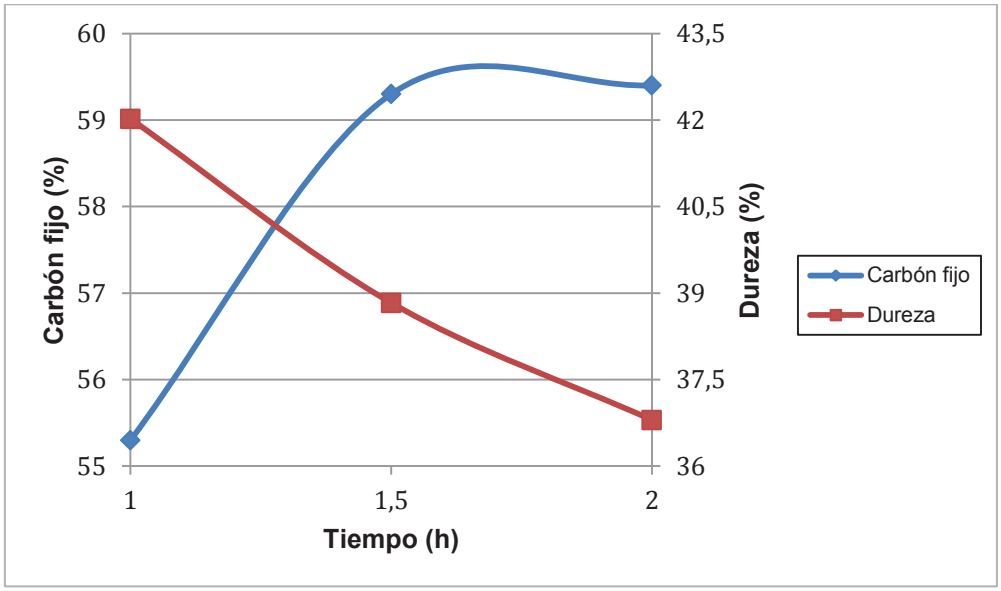


Figura 3.23. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a 500 ºC para pruebas de laboratorio

La Figura 3.22 y 3.23 muestra el carbón activado del cuesco Tenera y Dura, respectivamente, a 500 ºC. Se puede observar que se presenta el mismo

fenómeno, es decir, a mayor tiempo de pirolisis, el carbón fijo aumenta mientras que la dureza disminuye. Sin embargo para el cuesco Tenera en la Figura 3.22 se tiene que el aumento de carbón fijo es lineal durante las 2 horas del proceso, mientras que la disminución de la dureza es relevante entre 1 y 1,5 h, ya que entre 1,5 y 2 h es mínima. Para el cuesco Dura en la Figura 3.23, el aumento de carbón fijo se da de manera importante dentro de la 1 y 1,5 hora ya que de 1,5 a 2 horas el aumento es muy bajo, en cuanto a la disminución de la dureza, esta es considerable durante todo el tiempo del ensayo, ya que estos se dan en una cantidad considerable tanto de 1 a 1,5 h y de 1,5 a 2 h.

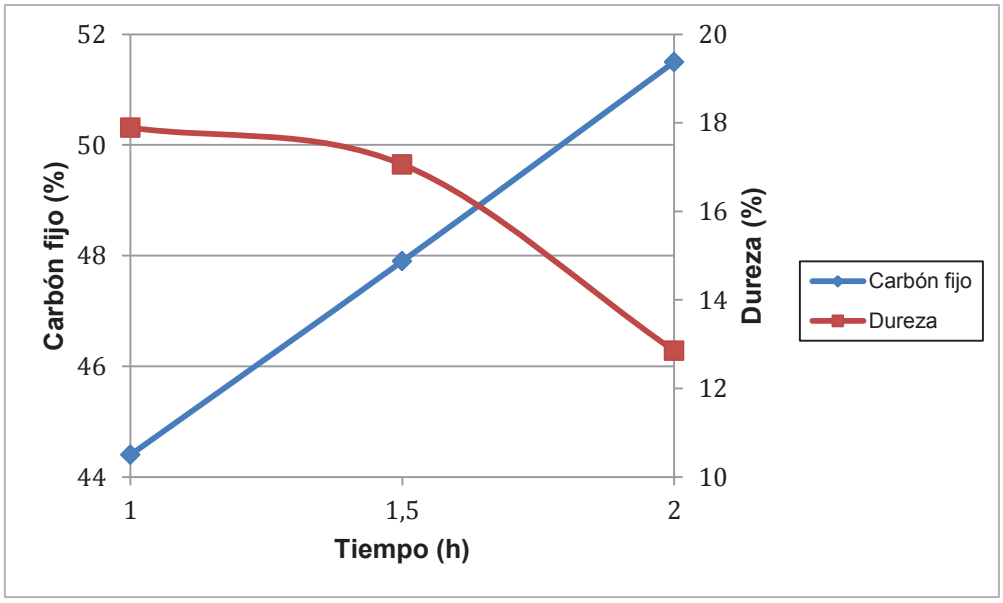


Figura 3.24. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a 600 ºC para pruebas de laboratorio

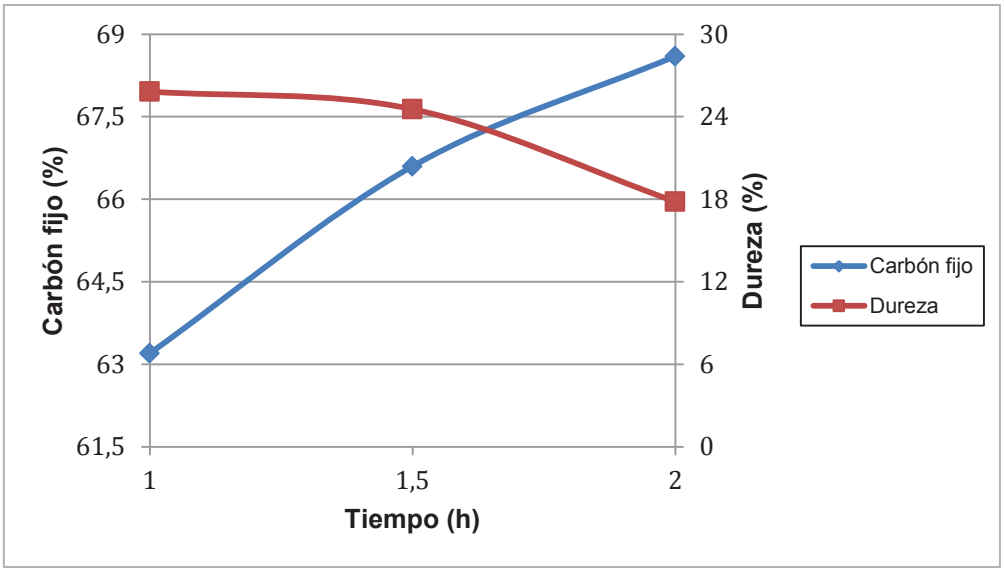


Figura 3.25. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a 600 ºC para pruebas de laboratorio

Finalmente las Figura 3.24 y 3.25 muestran el carbón activado de ambos cuescos de palmiste, Tenera y Dura para 600 ºC. En la Figura 3.24 y 3.25 se observa que el aumento de carbón fijo es lineal durante las 2 horas del proceso, mientras que la disminución de la dureza es mayor en el intervalo de tiempo de 1,5 a 2 h, ya que de 1 a 1,5 h esta disminución es poca.

3.3.1.6. Rendimiento de la activación de los dos tipos de cuesco de palmiste a nivel de laboratorio para diferentes temperaturas y tiempos

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 3.16.

Tabla 3.16. Datos obtenidos para pruebas de laboratorio del rendimiento de los tipos de cuesco de palmiste activado a diferentes temperaturas y tiempos.

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Rendimiento (%)
Cuesco Tenera	450	1	11,23
		1,5	16,36
		2	28,49
	500	1	13,31
		1,5	14,99
		2	22,25
	600	1	10,60
		1,5	11,43
		2	12,11
Cuesco Dura	450	1	16,63
		1,5	16,74
		2	19,40
	500	1	11,18
		1,5	11,61
		2	13,91
	600	1	8,83
		1,5	11,07
		2	12,70

La Tabla 3.16 muestra la variación del rendimiento en función de la temperatura y del tiempo de activación. Se observa que a medida que aumenta el tiempo de activación para una misma temperatura, aumenta el rendimiento. Además, para la temperatura más baja se tiene un mayor rendimiento, es decir a 450 ºC se tiene el mayor rendimiento que es de 18 %, tanto para el cuesco Tenera como para el cuesco Dura, el rendimiento a 500 ºC para el cuesco Tenera es 16 % y para el cuesco Dura es de 12 %, para el carbón a 600 ºC la disminución del rendimiento comparado con el carbón a 500 ºC es tan solo de 4 % aproximadamente.

El carbón que obtuvo el mayor rendimiento para ambos tipos de cuesco fue el de 450 ºC activado durante 2 h, esto se debe a que la activación en el cuesco se ha dado completamente eliminando así los gases del agente activante y dejando el carbón activado. El proceso para el cuesco de palmiste tipo Tenera y tipo Dura

tiene un rendimiento considerablemente bajo, 15 %, sin embargo, este rendimiento no es el único indicador determinante de un proceso ineficiente, ya que el proceso es eficiente cuando el carbón activado producido es de gran porosidad y con buena capacidad de adsorción.

3.3.2. PRUEBAS DE LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON CLORURO DE ZINC A ESCALA PILOTO EN EL HORNO PILOTO NICHOLS HERRESHOFF MONO SOLERA

Una vez realizadas las pruebas de activación a nivel de laboratorio, se escaló el proceso en un horno piloto Nichols Herreshoff mono solera en donde se realizaron las pruebas de activación a la temperatura escogida en base a las pruebas a nivel de laboratorio, a dos diferentes lambdas (λ), atmósfera reductora y atmósfera oxidante.

Los resultados de activación a nivel laboratorio para los dos tipos de cuesco de palmiste, mostrados anteriormente, indican que a menor temperatura se obtiene mayor dureza, mayor rendimiento y menor cantidad de carbón fijo, estos parámetros son importantes para definir la eficiencia del proceso y la efectividad del carbón activado obtenido, por lo tanto a 500 ºC se tiene una dureza bastante buena, un rendimiento considerable y además un porcentaje de carbón fijo alto, ya que a 450 y 600 ºC tan solo se tiene uno de los parámetros bastante definido.

3.3.2.1. Análisis de la densidad aparente y densidad real del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a escala piloto

Densidad aparente

Para la densidad aparente se tomó un tamaño nominal de partícula entre 1,7 mm y 1,18 mm que corresponden a las mallas con las que se realizaron las pruebas de dureza. En algunos casos como el material empleado estaba en un tamaño de entre 6,73 mm a 4,75 mm se trituró hasta obtener el d_{80} deseado. La Figura 3.26 y 3.27 muestran el gráfico de la densidad aparente para el cuesco tipo Tenera y el

cuesco tipo Dura, respectivamente, a las temperaturas de trabajo y la Figura 3.28 y 3.29 muestran el gráfico de la densidad real de igual manera para ambos tipos de cuesco de palmiste.

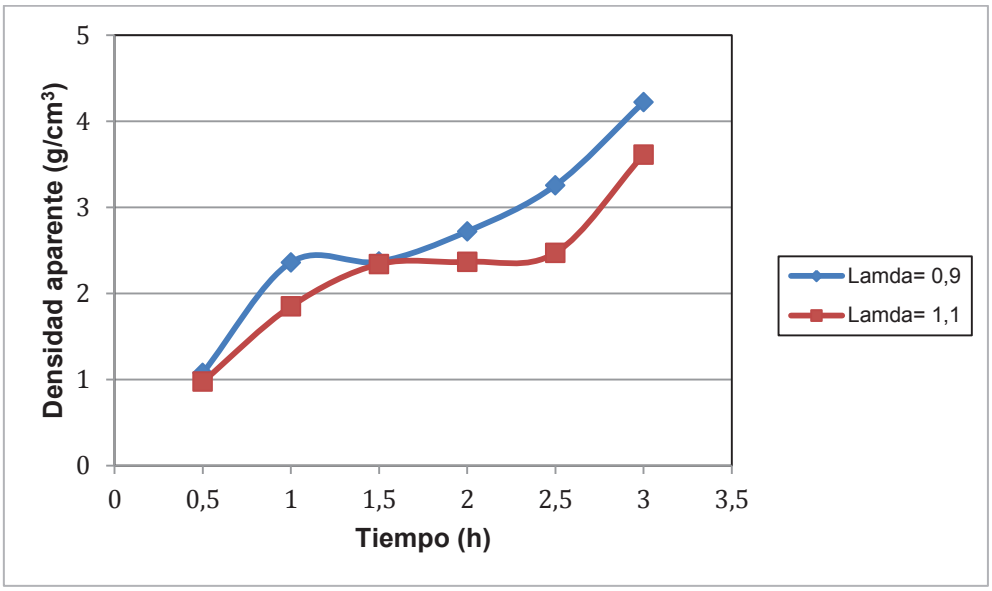


Figura 3.26. Densidad aparente del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto

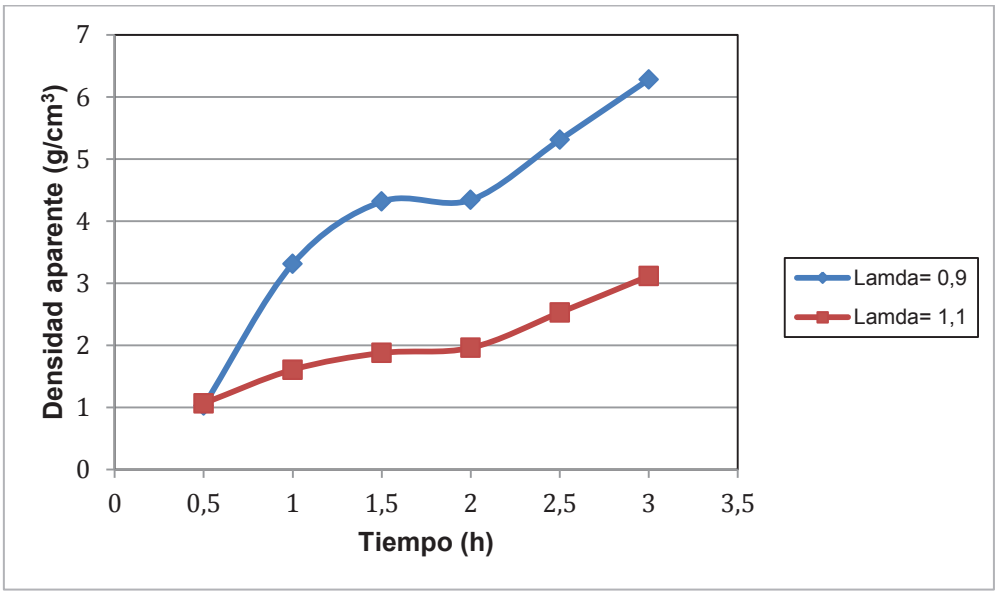


Figura 3.27. Densidad aparente del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto

Como se puede observar en la Figura 3.26 y 3.27, 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.

Este fenómeno se presenta para los dos lambdas aplicados, para ambos tipos de cuesco de palmiste se tiene que para λ = 0,9 (atmósfera reductora) la densidad es mayor que para λ = 1,1 (atmósfera oxidante), esto se debe a que en la atmósfera reductora no existe la presencia de oxígeno o su presencia es mínima, de esta manera se evita la combustión completa y se promueve la pirólisis. El carbón a λ=0,9 y 3 h presenta la mayor densidad aparente.

Densidad real

Para la densidad real de las muestras fueron analizadas como se describe en el apartado 2.1.1.4. Aquí se muestran los resultados obtenidos.

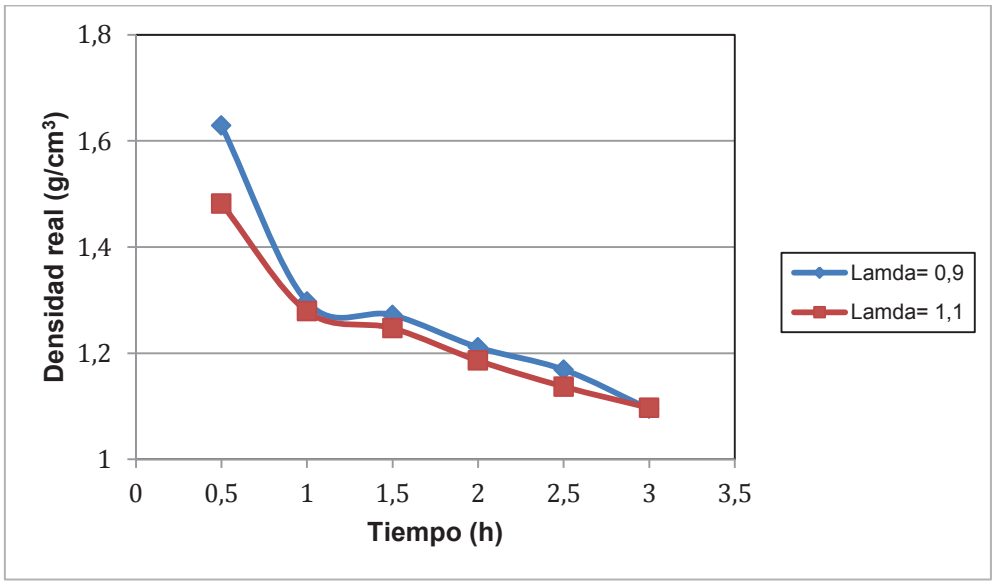


Figura 3.28. Densidad real del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto

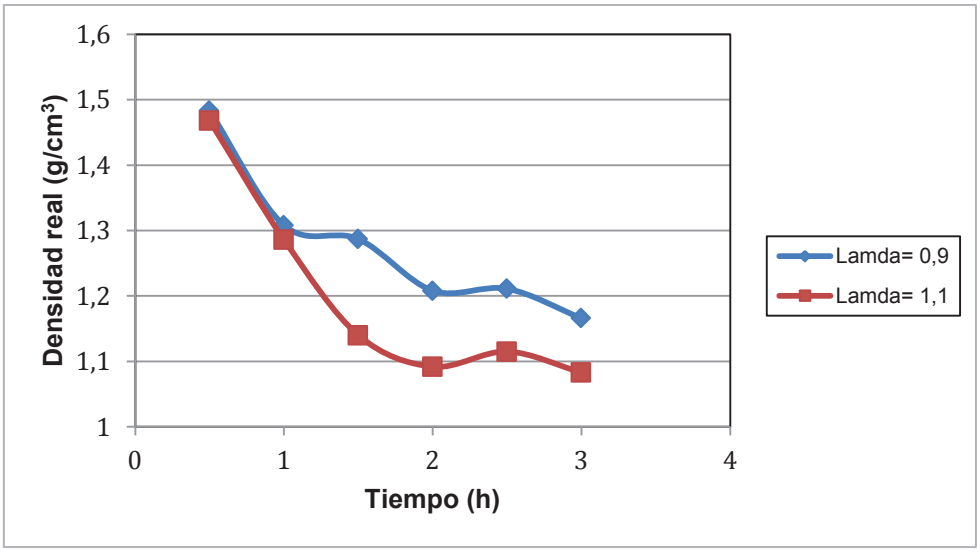


Figura 3.29. Densidad real del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto

Como se puede observar en la Figura 3.28 y 3.29, la densidad real disminuye con el tiempo y con el aumento de lambda, para ambos tipos de cuesco de palmiste. Esto se explica ya que la densidad aparente refleja el contenido total de porosidad, es decir considera el volumen macizo de las partículas más el volumen de los poros y de los huecos, además para la atmósfera reductora se tiene que el material tan solo se piroliza, mientras que para la atmósfera oxidante el material se está combustionando lo que explica el menor valor en la densidad real para ambos tipos de cuesco en la atmósfera reductora. El carbón a λ= 0,9 y 0,5 h presenta la mayor densidad real.

3.3.2.2. Análisis de dureza del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a nivel de laboratorio

Para la determinación de la dureza se tomó un tamaño nominal de partícula entre 1,7 mm y 1,18 mm que corresponden a las mallas de dureza, para los casos donde el material estaba en un tamaño de entre 6,73 mm a 4,75 mm se trituro hasta obtener el tamaño deseado, es decir, entre 1,7 – 1,18 mm. Las Figuras 3.30 y 3.31 muestran los gráficos de la dureza a las distintas temperaturas de trabajo.

Las tablas 3.17 y 3.18 muestran las mallas empleadas tanto para determinar el tamaño de la materia prima como las mallas de dureza empleadas en la prueba.

Figura 3.17. Tamices que definen el tamaño del cuesco de palmiste

Malla Tyler (#)	Abertura (mm)
3	6,73
4	4,75

Figura 3.18. Tamices de dureza

Malla Tyler (#)	Abertura (mm)
12	1,70
14	1,40
16	1,18

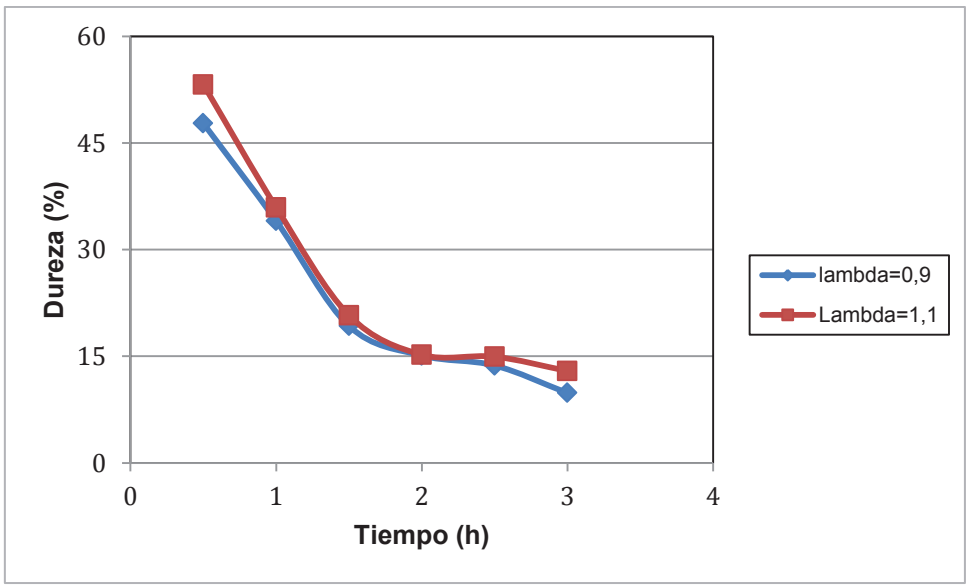


Figura 3.30. Porcentaje de dureza del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto

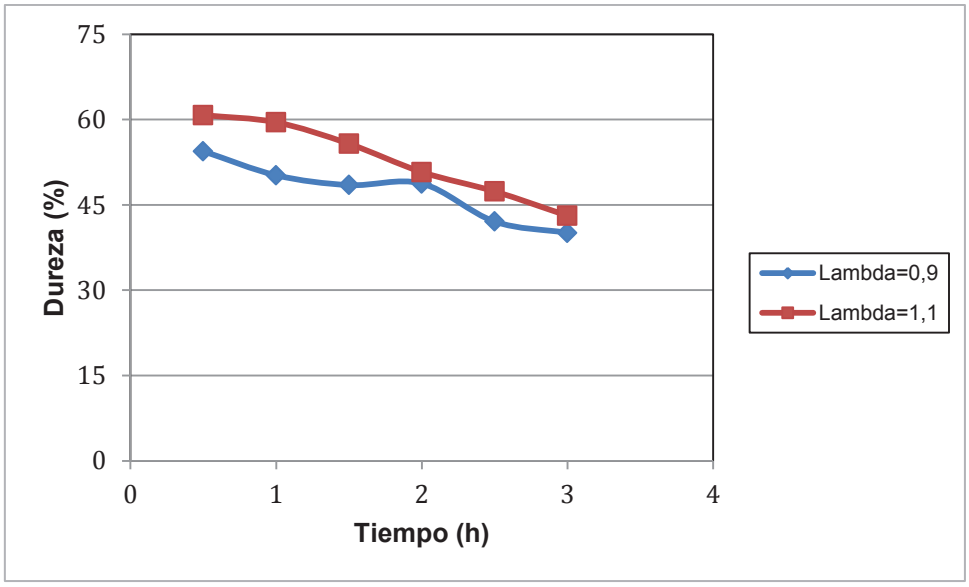


Figura 3.31. Porcentaje de dureza del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Dura a diferentes lambdas en función del tiempo, escala piloto

Como se puede observar en la Figura 3.30 y 3.31, la mayor dureza para cada tipo de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, se da a λ= 1,1 (atmósfera oxidante), además a medida que se aumenta el tiempo, el carbón activado que se obtiene presenta menor dureza, esto podría deberse a que en atmósfera oxidante se tiene una combustión completa del material ya que existe presencia de oxígeno, además el material, mientras aumenta el tiempo se va pirolizando totalmente, por lo que va perdiendo características de la materia prima y como consecuencia su dureza va disminuyendo.

3.3.2.3. Análisis de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a escala piloto

Los datos obtenidos para las muestra de carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos se muestran en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Datos obtenidos de contenido de volátiles, cenizas y carbón fijo del carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos. Escala piloto

	Lambda (λ)	Tiempo (h)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
Tenera	0,9	0,5	39,2	18,6	42,2
		1	35,7	13,8	50,5
		1,5	30,9	14,6	54,5
		2	28,1	15	56,9
		2,5	25,9	14	60,1
		3	21,4	13,9	64,7
	1,1	0,5	38,8	20,2	41
		1	31,9	17,6	50,5
		1,5	29,6	19,2	51,2
		2	28,2	20,1	51,7
		2,5	26,8	18,3	54,9
		3	24,9	12	63,1
Dura	0,9	0,5	27,5	15,8	56,7
		1	26,8	11,9	61,3
		1,5	25,5	13,1	61,4
		2	23,1	12,6	64,3
		2,5	22,4	11,3	66,3
		3	19,6	11,8	68,6
	1,1	0,5	27,5	17,2	55,3
		1	19,3	24,9	55,8
		1,5	31,1	7,5	61,4
		2	26	10,5	63,5
		2,5	20,7	13,9	65,4
		3	19,4	13,4	67,2

Como se puede observar en la Tabla 3.19, la cantidad de carbón fijo, tanto para el carbón activado tipo Tenera y tipo Dura, aumenta a medida que aumenta el tiempo de pirolisis, sin embargo no aumenta al incrementar lambda, ya que a λ= 0,9 (atmósfera reductora) se tiene, para los dos tipos de cuesco, mayor cantidad de carbón fijo, que a λ= 1,1. Esto se da porque en el proceso de pirólisis, en atmósfera reductora, los volátiles se pirolizan en ausencia de oxígeno, haciendo que se acumule carbón fijo. Así, la cantidad de volátiles disminuye a

medida que aumenta el tiempo para ambos tipos de cuescos. La cantidad de ceniza a las diferentes lambdas y tiempos es casi similar.

Para los dos tipos de cuesco, Tenera y Dura, la pirolisis llevada a cabo a λ= 0,9 y durante 3 h son las muestras que más cantidad de carbón fijo presentan, mientras que las muestras pirolizadas durante 0,5 h y λ= 1,1, tiene un porcentaje de carbón fijo cercano al 50 %, a pesar de ello, este porcentaje es más del doble que el porcentaje de carbón fijo de la de la materia prima según la Tabla 3.5.

Por lo tanto los dos tipos de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, tienen un comportamiento similar, es decir, a λ= 0,9 (atmósfera reductora) se tiene un mayor porcentaje de carbón fijo en la muestra, de esta forma el fin de la pirolisis es formar la mayor cantidad de carbón. En el caso de la ceniza para ambos tipos de cuesco de palmiste se tiene un porcentaje de ceniza casi constante, con lo que se puede concluir que las cadenas a esta atmósfera y como consecuencia a esta temperatura, no están todavía muy separadas entre sí.

3.3.2.4. Relación entre el carbón fijo y la dureza del carbón activado de cada tipo de cuesco de palmiste producido a escala piloto

Para establecer una relación entre el contenido de carbón fijo y la dureza de cada tipo de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, es necesario construir una gráfica de estos parámetros con relación al tiempo de pirólisis, como se muestran en las Figuras 3.32 – 3.35, estas gráficas se construyeron para λ= 0,9 y λ= 1,1, respectivamente.

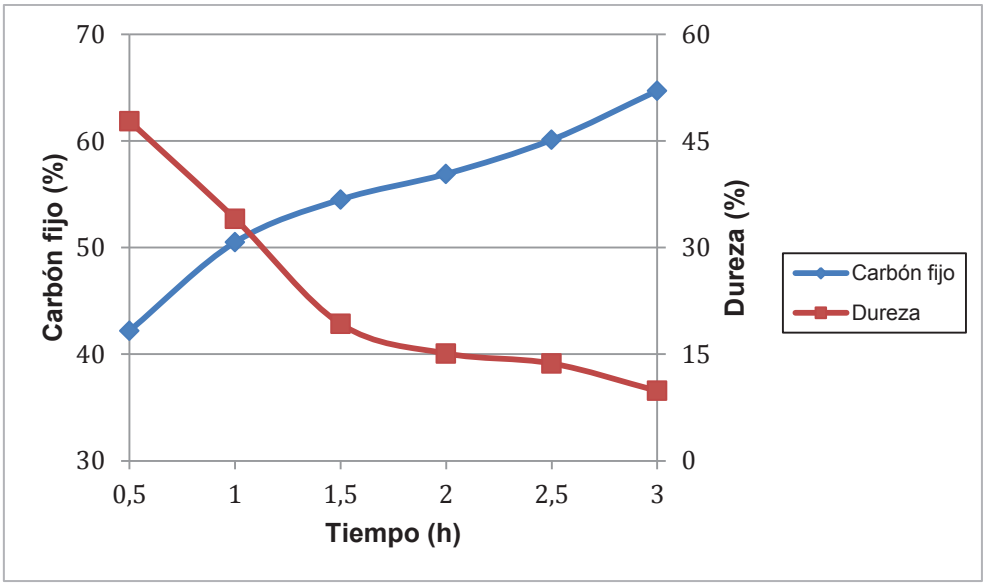


Figura 3.32. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a λ= 0,9, escala piloto

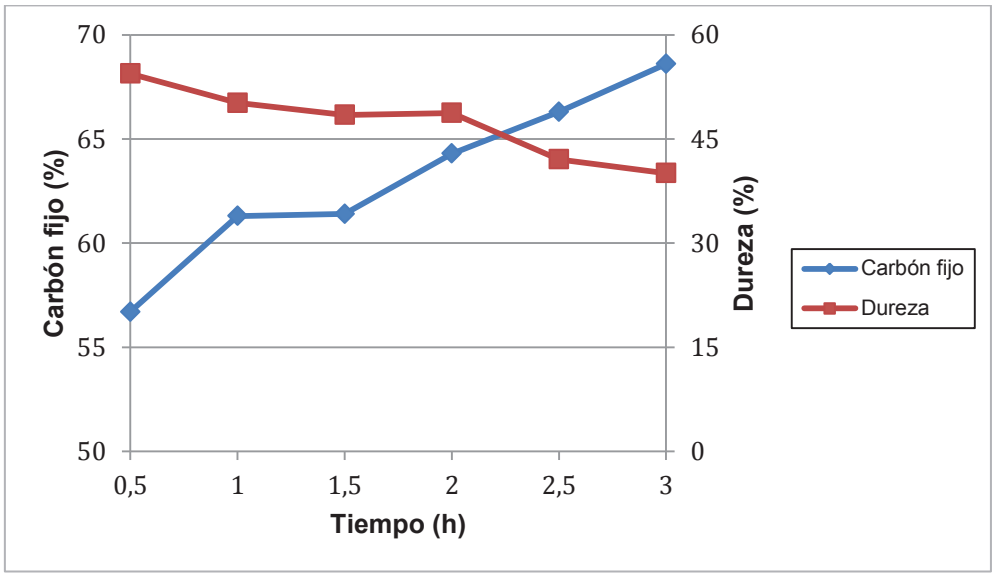


Figura 3.33. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a λ= 0,9, escala piloto

Como se observa en la Figura 3.32 y 3.33, el carbón activado a λ= 0,9 durante 3 h de ambos tipos de cuesco de palmiste poseen el mayor porcentaje de carbón fijo, pero en este punto la dureza es mínima para los dos tipos, Tenera y Dura. Por lo tanto se establece que a mayor tiempo de activación existe mayor cantidad de carbón fijo y una menor dureza. Para el caso del cuesco Tenera en la Figura 3.32 la variación de porcentaje de carbón fijo durante el tiempo del ensayo es lineal, lo que no sucede con el cuesco tipo Dura en la Figura 3.33 ya que la variación de

porcentaje de carbón fijo entre 0,5 y 1 h es máxima, comparada a la variación entre 1 y 3 h. Con respecto a la dureza para el cuesco de palmiste tipo Tenera la mayor disminución se presenta entre 0,5 y 1,5 h, mientras que para el cuesco de palmiste tipo Dura la dureza tiene una disminución lineal.

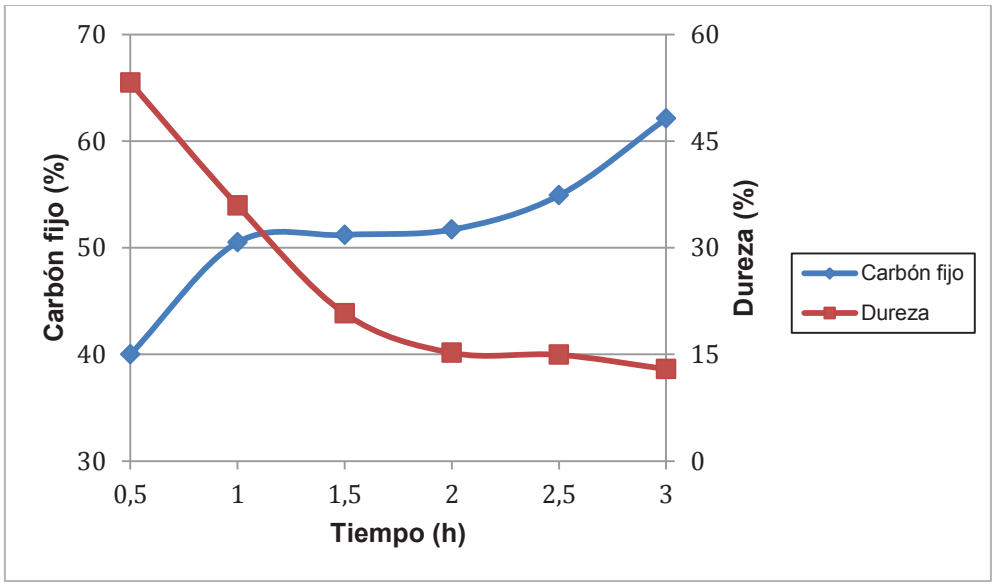


Figura 3.34. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo a λ= 1,1, escala piloto

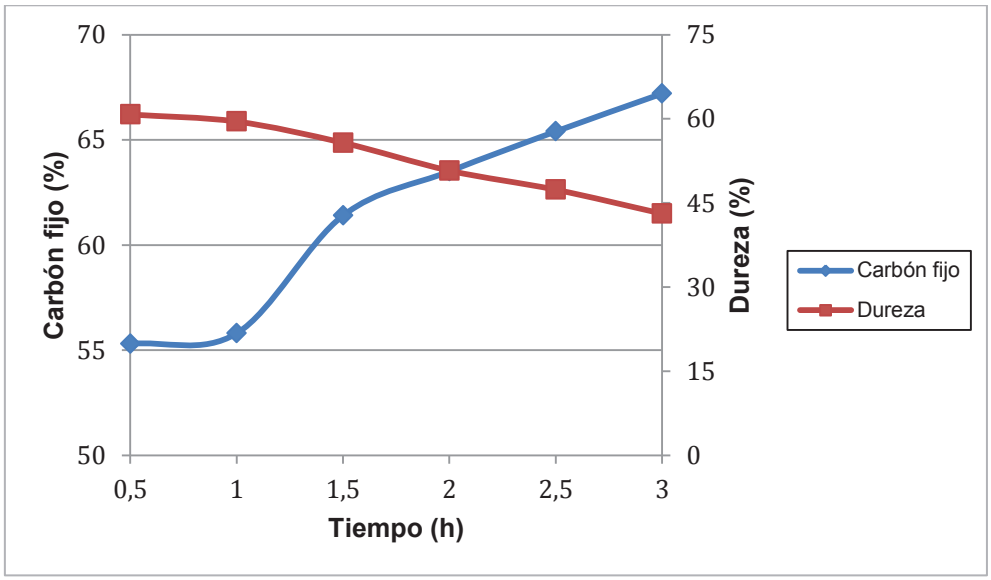


Figura 3.35. Porcentaje de carbón fijo y dureza del carbón activado tipo Dura en función del tiempo a λ= 1,1, escala piloto

La Figura 3.34 y 3.35 muestra el carbón activado del cuesco Tenera y Dura, respectivamente, a λ= 1,1. Se observa que se presenta el mismo fenómeno, es

decir, a mayor tiempo de pirolisis, el carbón fijo aumenta mientras que la dureza disminuye. Sin embargo para el cuesco Tenera en la Figura 3.34 se tiene que el aumento de carbón fijo es considerablemente bajo durante las 3 h del ensayo, mientras que la disminución de la dureza es relevante entre 0,5 y 1,5 h. Para el cuesco Dura en la Figura 3.35, el aumento de carbón fijo se da de manera importante dentro de la 1 y 1,5 h, en cuanto a la disminución de la dureza, esta es lineal durante todo el tiempo del ensayo.

3.3.2.5. Determinación de la superficie específica del carbón activado, por medio del índice de yodo

Se realizaron pruebas de índice de yodo al carbón activado producido a una concentración de solución de X_{Zn} = 0,5 (g Zn/g cuesco), a diferentes lambdas para los dos tipos de cuesco de palmiste. La Tabla 3.20 muestra los datos para λ= 0,9 y λ= 1,1.

Tabla 3.20. Índice de Yodo de los carbones activado de los dos tipos de cuesco de palmiste

	Lambda (λ)	Tiempo (h)	Índice de Yodo
Tenera	0,9	0,5	453
		1	489
		1,5	518
		2	582
		2,5	582
		3	582
	1,1	0,5	481
		1	498
		1,5	582
		2	606
		2,5	508
		3	657
Dura	0,9	0,5	493
		1	498
		1,5	600

		2	620
		2,5	641
		3	657
	1,1	0,5	498
		1	503
		1,5	620
		2	657
		2,5	665
		3	673

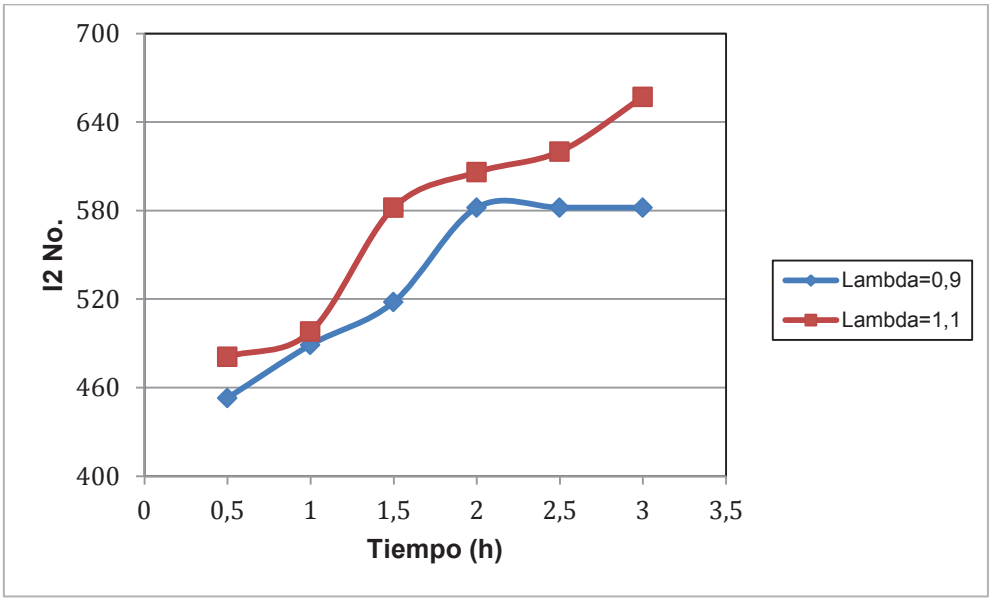


Figura 3.36. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera en función del tiempo, escala piloto

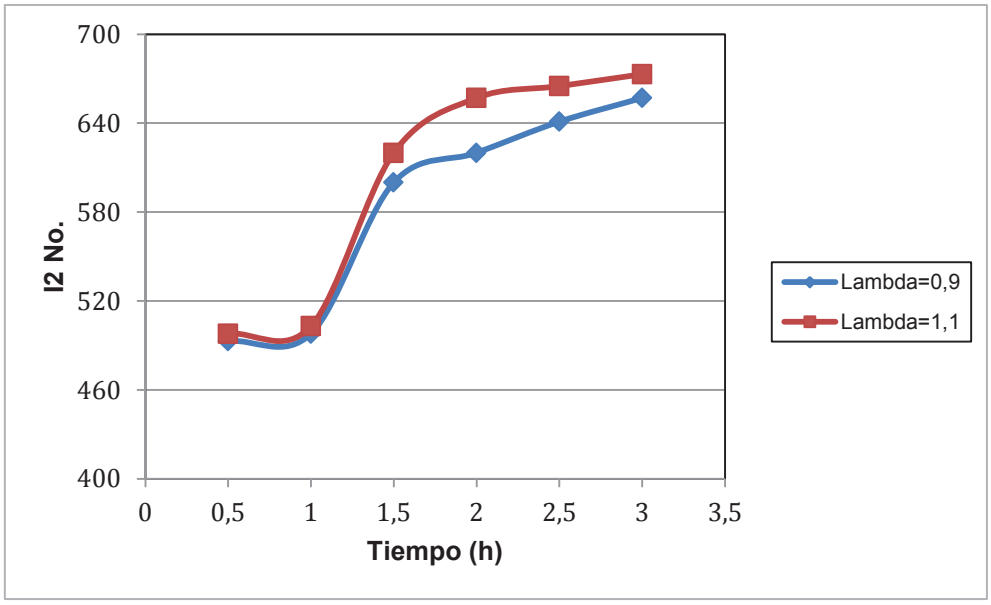


Figura 3.37. Índice de yodo del carbón activado tipo Dura en función del tiempo, escala piloto

Como se puede observar en la Tabla 3.20 y en las Figuras 3.36 y 3.37 el índice de yodo para un mismo tipo de cuesco de palmiste aumenta con el tiempo, además, el índice de yodo también aumenta al incrementar la lambda, es decir pasa de atmósfera reductora a atmósfera oxidante. A pesar de que a λ= 1,1 (atmósfera oxidante) se obtiene carbones activados con índice de yodo ligeramente más altos que a λ= 0,9 (atmósfera reductora), se observa que no existe una diferencia marcada para ambos lambdas, ya que el material se pirolizo llegando a formar los poros necesarios para adquirir una capacidad de adsorción bastante alta, como indica el índice de yodo.

3.3.3. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A NIVEL PILOTO

Las muestra finales de los carbones activados obtenidos a nivel piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a 3 h fueron sometidos a varias pruebas para determinar su porosidad, estructura y grupos funcionales.

3.3.3.1. Índice de Azul de metileno

El índice de azul de metileno determina la mesoporosidad del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste.

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 y de un carbón activado comercial (GSR-20), los datos se muestran en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21. Índice de azul de metileno para los carbones activados producidos a 3 h

Carbón		Absorbancia	mg de azul de metileno / mg de carbón activado
GSR-20		0,40	2,1
λ= 0,9	Tenera	0,23	13,5
	Dura	0,28	10,2
λ = 1,1	Tenera	0,18	16,9
	Dura	0,26	11,5

La Tabla 3.21 indica que el carbón activado a λ= 1,1 tiene una mesoporosidad más alta que el carbón activado a λ= 0,9, para ambos tipos de cuesco de palmiste. Si comparamos un mismo tipo de cuesco de palmiste para diferentes λ, se tiene que la absorbancia para λ= 0,9 es mayor que para λ= 1,1, lo que quiere decir que los mg de azul de metileno/mg de carbón activado para λ= 0,9 es menor que para λ= 1,1 lo que implica que usando un λ= 1,1 el azul de metileno fue casi removido de la solución. El carbón activado comercial tiene muy baja mesoporosidad si comparamos con los carbones activados a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste para las dos lambdas empleadas, lo que significa que el carbón activado de cuesco de palmiste mediante activación química con cloruro de zinc presenta una gran porosidad.

3.3.3.2. Índice de decoloración de azúcar

El índice de decoloración de azúcar determina la macroporosidad del carbón activado a partir de cuesco de palmiste. Para la determinación del índice de decoloración de azúcar se determinaron las Unidades Básicas de Referencia (UBR) según la Ecuación 2.7.

Se determinó el índice de decoloración de azúcar para los carbones activados finales, además de un carbón activado comercial (GSR-20), los datos se muestran en la Tabla 3.22. A menor UBR, existe mayor adsorción de azúcar de la solución inicial.

Tabla 3.22. Índice de decoloración de azúcar para los carbones activados producidos a 3 h

Absorbancia		**UBR**
Blanco		199
GSR-20		149
λ= 0,9	Tenera	149
	Dura	149
λ = 1,1	Tenera	139
	Dura	138

El blanco se encuentra dentro de los rangos permitidos por la norma que indica que para los jarabes preparados antes de ser decolorados oscila entre 195 y 205 UBR. Mientras menor sea el valor de UBR de un jarabe decolorado, su grado de decoloración será mayor, y por lo tanto, el carbón activado empleado en dicha decoloración tendrá un mayor poder absorbente.

La Tabla 3.22 muestra los resultados, se observa que el carbón activado comercial GSR-20 presenta una macroporosidad media, el carbón activado producido a λ= 0,9 presenta la misma porosidad que el comercial y el carbón activado a λ= 1,1 presenta UBR menores a los otros carbones activados, lo que significa que éste producto es el 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 3.23.

Tabla 3.23. Grupos funcionales oxigenados de las muestras de carbón activado durante 3 h, datos obtenidos mediante titulación Boehm

Muestra		Grupos carboxílicos (mol H^+/g CA)	Grupos lactónicos (mol H^+/g CA)	Grupos fenólicos (mol H^+/g CA)
λ= 0,9	Tenera	-0,0103	0,0167	0,0273
	Dura	-0,0147	0,0402	0,0204
λ= 1,1	Tenera	-0,0293	0,0165	0,0272
	Dura	-0,0236	0,0544	0,0265

Como muestra la Tabla 3.23, en el carbón activado a partir ambos tipos de cuesco de palmiste y para las dos lambdas empleados, se observa la presencia de grupos lactónicos y fenólicos y la ausencia de grupos carboxílicos.

Se observa una cantidad representativa de grupos fenólicos para ambos tipos de cuesco, lo que le confiere un carácter básico frente a los carbones oxidados. Al realizar los tratamientos con ácido nítrico se genera un aumento de grupos lactónicos, lo que hace más ácida la superficie del carbón. La presencia de los grupos oxigenados podría otorgar mejores propiedades de adsorción. La presencia de grupos lactónicos produce una mayor adsorción en el carbón activado que se obtiene para las dos lambdas empleadas, se ha trabajado esta titulación con carbón activado producido mediante activación química.

3.3.3.4. Caracterización de la porosidad del carbón activado

Se tomaron fotografías con la ayuda del microscopio electrónico de barrido Tescan-Vega de los carbones activados finales. Las Figuras 3.38 y 3.39 muestran los carbones activados del cuesco tipo Tenera y Dura, respectivamente.

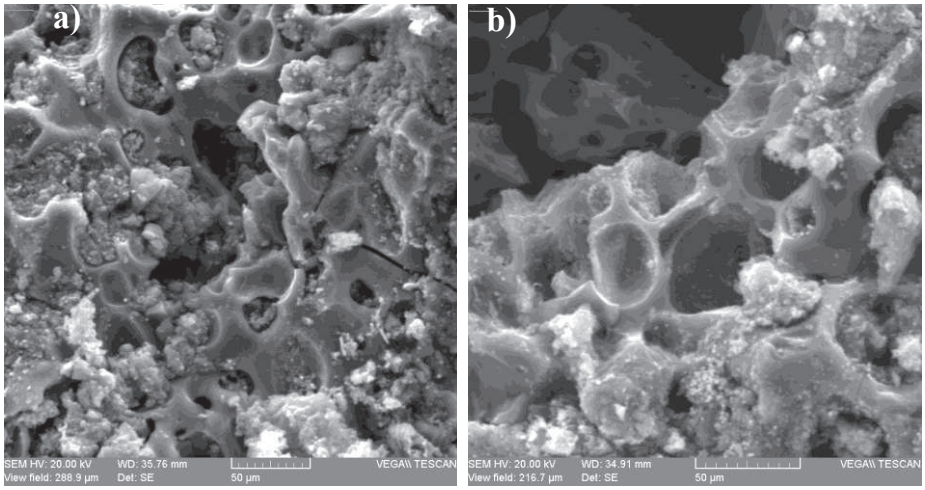


Figura 3.38. Fotografías MEB del carbón activado de cuesco de palmiste tipo Tenera a 3 h a diferentes aumentos: a) 500, b) 1 000

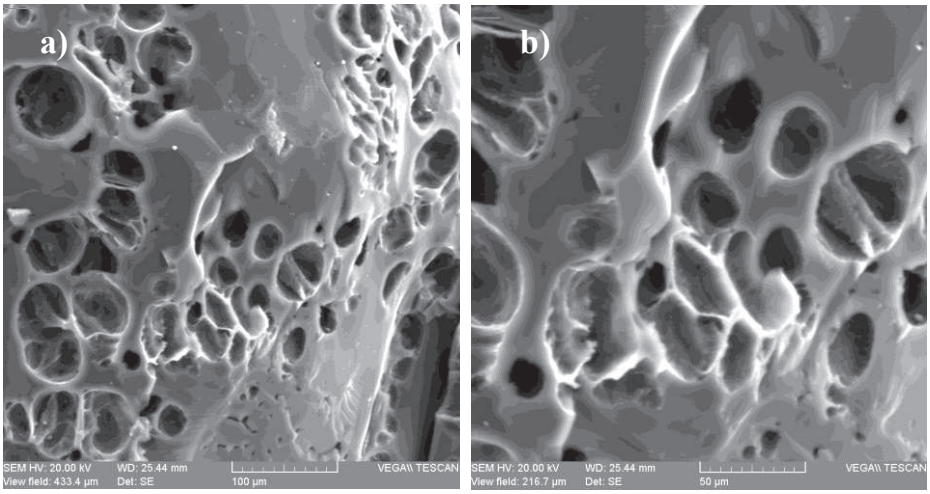


Figura 3.39. Fotografías MEB del carbón activado de cuesco de palmiste tipo Dura a 3h a diferentes aumentos: a) 500, b) 1 000

En la Figura 3.38 y 3.39 se observa los poros formados del carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera y Dura, respectivamente. Esto se traduce que el carbón producido posee la adsorción indicada en los ensayos antes mencionados (índice de yodo, índice de azul de metileno, índice de decoloración de azúcar), es decir, se observa el resultado del proceso de activación de ambos tipos de cuesco de palmiste, es un carbón con mesoporos y macroporos.

3.4. DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES PARA LA PRODUCCIÓN DE 20 T/MES DE CARBÓN ACTIVADO QUÍMICAMENTE A PARTIR DE CUESCO DE PALMISTE

El diagrama de flujo se estableció para una producción de 20 t/mes de carbón activado a partir de los dos tipos de cuesco de palmiste, previo al dimensionamiento de equipos, se estableció la constante cinética tanto de la carbonización como de la activación química con cloruro de zinc para determinar las dimensiones de los hornos y el tiempo de residencia.

3.4.1. CINÉTICAS DE LOS PROCESOS DE ACTIVACIÓN Y CARBONIZACIÓN

Es necesario establecer las constantes cinéticas (k) del proceso de activación química con cloruro de zinc.

Cinética de activación

Para la cinética de activación se utilizó el modelo de conversión progresiva explicado en la sección 1.2.8.1. Para esto se determinó x para cada grupo de datos (cuesco de palmiste tipo Tenera y cuesco de palmiste tipo Dura) en donde se tomó como peso inicial (w_o) al carbón precursor y como peso final (w_f) al carbón activado producido a 3 h. Posteriormente se graficó la ecuación 1.11 y se linealizó para cada tipo de cuesco de palmiste y así obtener k_r*C_A. Donde la concentración de A es la concentración de la solución empleada (fluido) para la impregnación del cuesco de palmiste. Las Figuras 3.40 y 3.41 muestran la linealización de los gráficos de la ecuación 1.11 para el cuesco de palmiste tipo Tenera y el cuesco de palmiste tipo Dura, respectivamente, el tratamiento de datos se encuentra en el Anexo X.

Tanto la Figura 3.40, como la 3.41 son rectas cuyo eje de corte con las abscisas

tiende a 0. La poca cantidad de puntos puede ser una fuente de error, sin embargo, se aceptarán los valores para poder hallar las constantes cinéticas de ambos tipos de cuesco de palmiste.

La Tabla 3.24 muestra que la constante cinética es relativamente elevada, esto se debe a las altas temperaturas que se requieren para producir este producto.

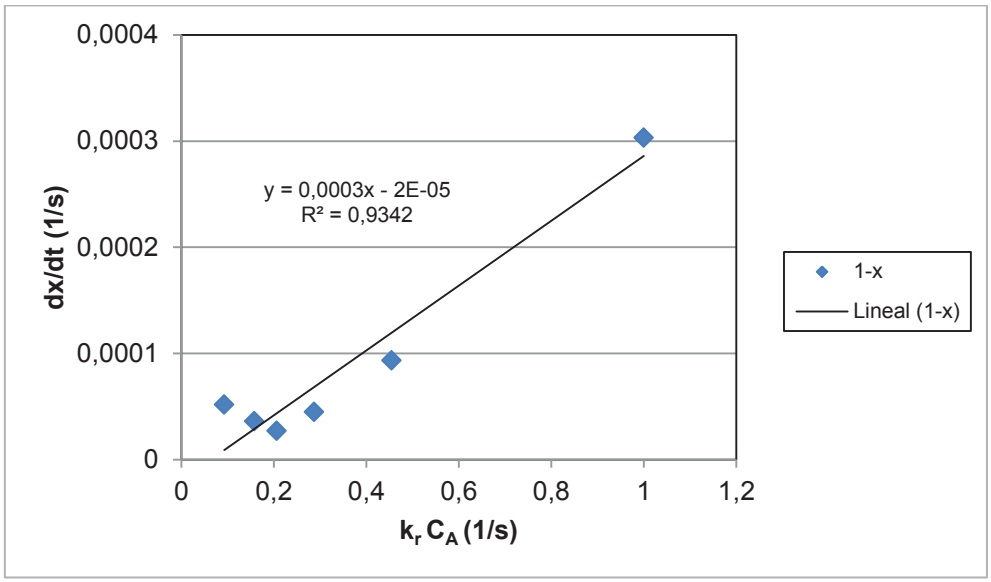


Figura 3.40. $\frac{dx}{dt}$ en función de $(1-x)$ para los datos obtenido del porcentaje de carbón fijo en el carbón activado de cuesco de palmiste tipo Tenera

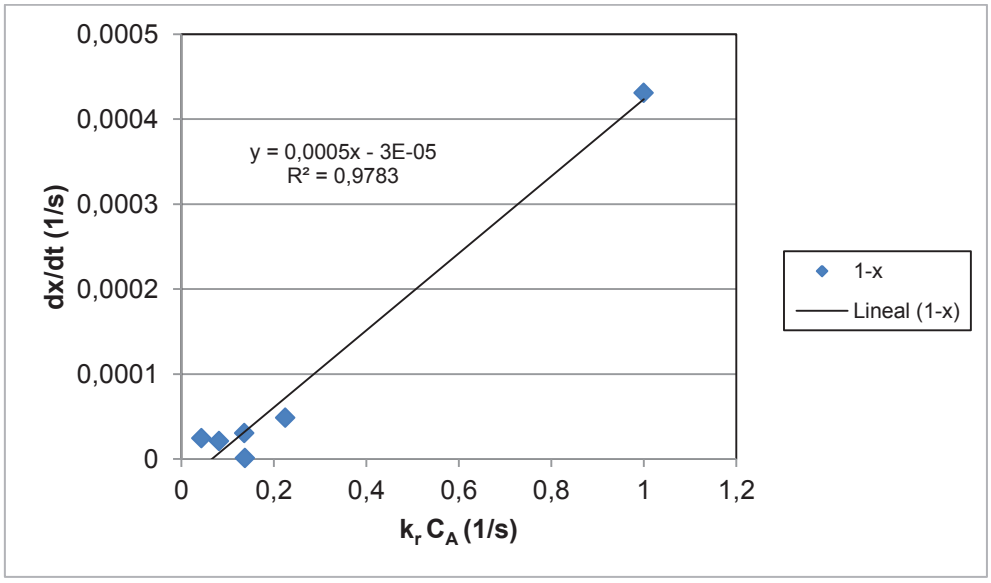


Figura 3.41. $\frac{dx}{dt}$ en función de $(1-x)$ para los datos obtenido del porcentaje de carbón fijo en el carbón activado de cuesco de palmiste tipo Dura

Tabla 3.24. Valores cinéticos de la reacción de activación química de los tipos de cuesco de palmiste obtenidos a partir de las Figuras 3.40 y 3.41

Cuesco de palmiste	k_rC_A (s^{-1})	C_A (mol/ cm_3 gas)	k_r (cm_3 gas/mol*s)	τ (h)
Tenera	3,00 E-4	3,85 E-3	7,79 E-2	4,26
Dura	5,00 E-4	3,85 E-3	1,30 E-1	2,56

Con los datos de las cinéticas de activación tanto para el cuesco de palmiste tipo Tenera como para el cuesco tipo Dura, se elaboró el diseño conceptual.

3.4.2. DISEÑO CONCEPTUAL Y DISEÑO DE EQUIPOS

Para el diseño conceptual de la planta se consideró: estimación de la cantidad de cuesco de palmiste para la producción de carbón activado mediante activación química con cloruro de zinc, diseño del proceso, equipos y materiales, ubicación, dimensionamiento.

Para el diseño de equipos se considera que el proceso es el mismo que se presenta en la Figura 3.42, por lo que es necesario el dimensionamiento de un triturador para reducir el tamaño de partícula de la materia prima, un tanque de almacenamiento de la solución de cloruro de zinc, un reactor de lecho agitado, un caldero, tanque de reserva de agua, un horno rotatorio, una cámara de post combustión, una cámara de enfriamiento, un lavador húmedo de gases (wet scrubber), un tanque de lavado para el carbón activado, una cámara de secado para el carbón activado y un triturador para el carbón activado. A partir de los datos de la Tabla 3.24 se determinaron las dimensiones del horno rotatorio.

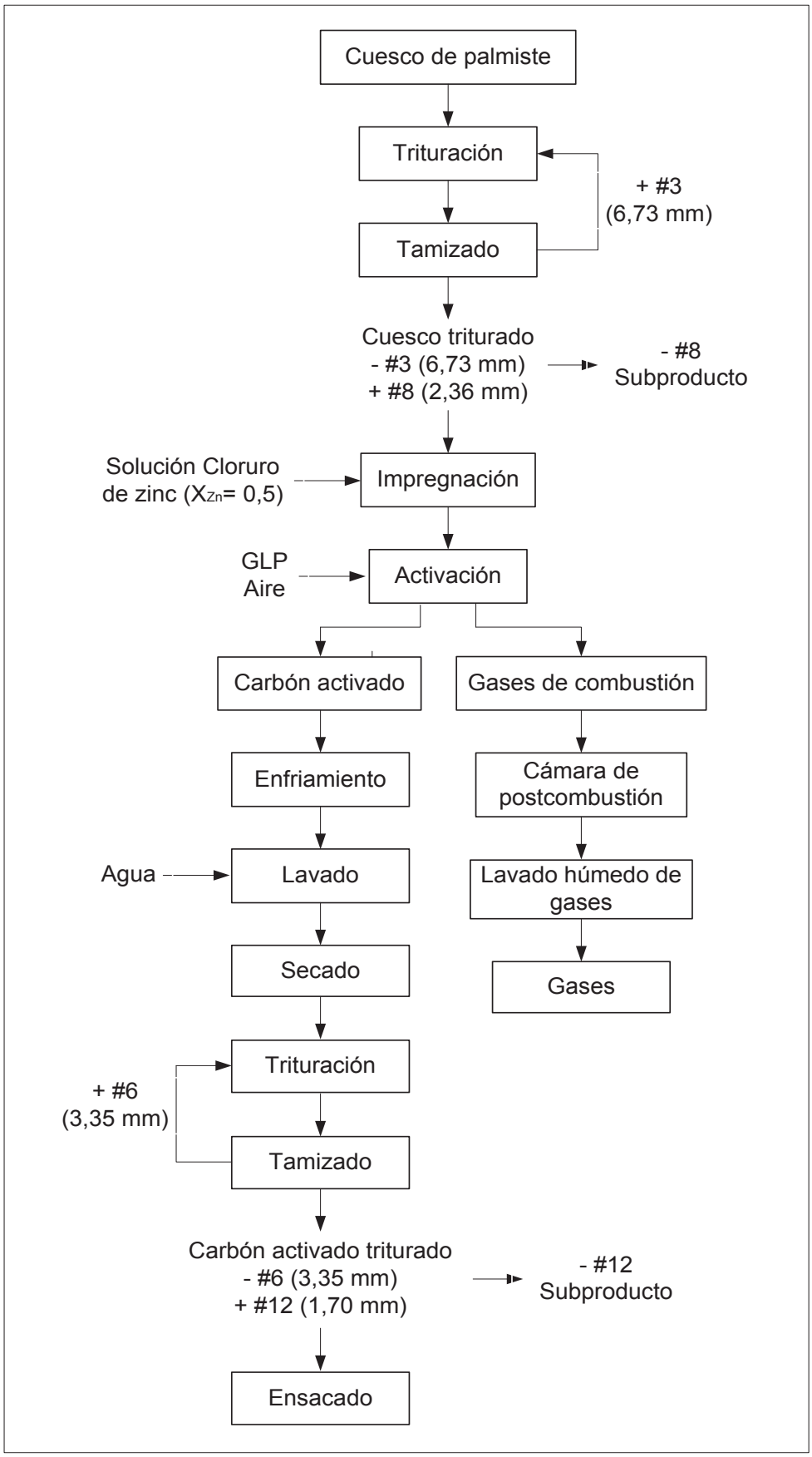


Figura 3.42. Diagrama de bloques del proceso de producción de carbón activado a partir de cuesco de palmiste mediante activación química con cloruro de zinc

3.4.2.1. Estimación de la cantidad de cuesco de palmiste necesario para la producción de carbón activado

Para una planta productora de 20 t/mes de carbón activado, se tomó como referencia los reportes del Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), que señala que en Ecuador una pequeña planta extractora de aceite de palma produce diariamente una tonelada de cuesco de palma (Roldán, 2009, p. 148).

Además, se consideró que la producción de palma africana en el Ecuador, según FEDAPAL en 1993 fue de 152 537 t, desde entonces la producción de esta se ha incrementado en un 293 % y en el 2009 llegó a ser de 447 667 t. Es decir que el consumo nacional de palma africana está alrededor de los 210 000 t, dejando aproximadamente 235 667 t de excedentes que son exportados a otros paises (Muñoz, 2010, p. 2).

Tabla 3.25. Producción de palma africana en el Ecuador (FEDEPAL 2010)

PRODUCCIÓN DE PALMA AFRICANA EN EL ACUADOR	
Año	***Producción t***
2007	396 301
2008	418 379
2009	447 667
2010	380 301
2011	472 988
2012	480 000

(Muñoz, 2010, p. 3)

El proceso de obtención de carbón activado a partir del cuesco de palmiste tipo Tenera y tipo Dura tiene un rendimiento considerablemente bajo, 15 %, como se muestra en la Tabla 3.16, se asume un rendimiento del 20 % para la activación, por lo tanto, para la producción de 20 t/mes de carbón activado se necesita 100 t/mes de materia prima, que, como señala los estudios de FEDAPAL de la Tabla 3.25, el consumo nacional de palma africana está alrededor de los 480 000 t para el año 2012 (Muñoz, 2010, p. 2).

3.4.2.2. Dimensionamiento del horno rotatorio

Con los datos obtenidos de la Tabla 3.24 se diseñó el horno rotatorio. Para esto se utilizó la ecuación propuesta por Sullivan, Charles y Oliver (1927, p. 30) aplicable a cemento, la misma que está señalada en la ecuación 3.1.

$$t = 1{,}77\frac{L * F * \overline{\theta}}{D_i * \beta * \omega} \qquad 3.1$$

Donde:

t: tiempo de residencia

L: longitud del horno

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

θ: Ángulo de reposo del material

D_i*:* diámetro interno del horno

β: pendiente del horno

ω: velocidad de rotación del horno

Los resultados de las medidas se encuentran en la Tabla 3.26 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.

Tabla 3.26. Dimensiones del horno rotatorio para producir carbón activado a partir de cuesco de palmiste

Parámetro	Valor	Unidades
t	63	min
L	6	m
D_i	1	m
β	2	grados sexagesimales
ω	1	RPM
θ	35,54	grados sexagesimales
Flujo de entrada	278	kg cuesco/h
Flujo de salida	83	kg Carbón activado/h

En la Tabla 3.26 se puede observar que las dimensiones son relativamente pequeñas, esto se debe a la poca producción, si comparamos con la producción de Clinker en donde se genera 10 t/h y se requieren hornos rotatorios de 2,7 m de diámetro y 42 m de longitud, además se debe también al tiempo en que se trabajara con el horno, que son 15 días al mes. Los cálculos se muestran en el Anexo XI.

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 3.43 esquematiza los diferentes regímenes de movimiento del material sólido al interior del horno rotatorio según Boateng (2008, p. 20). Además la Tabla 3.27 señala la determinación de este régimen según el número de Froude, el mismo que se calcula a partir de la Ecuación 3.2.

$$Fr = \frac{\omega^2 R_i}{g} \qquad 3.2$$

Donde:
Fr: número de Froude
ω: velocidad de rotación del horno
R_i: radio interno del horno
g: gravedad

Tabla 3.27. Número de Froude y regímenes de movimiento de material sólido

Movimiento	Intervalo
Deslizante	$Fr < 1x10^{-5}$
Caída	$1x10^{-5} < Fr < 0,3x10^{-3}$
Rodante	$0,5x10^{-3} < Fr < 0,2x10^{-1}$
Cascada	$0,4x10^{-1} < Fr < 0,8x10^{-1}$
Catarata	$0,9 < Fr < 1$
Centrífugo	$Fr > 1$

(Boateng, 2008, p. 30)

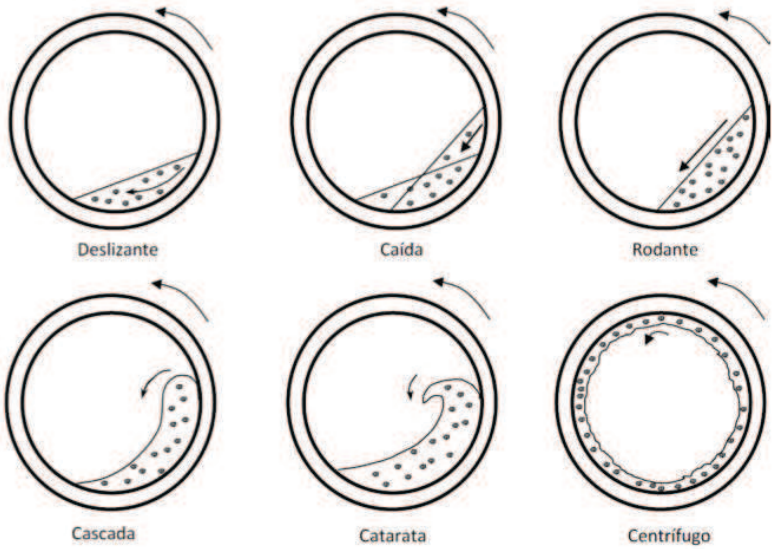


Figura 3.43. Esquemas de los diferentes regímenes de movimiento de material sólido al interior de un horno. Modificado
(Boateng, 2008, p. 30)

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).

Con los datos planteados en la Tabla 3.26 se determinó que el número de Fr= 0,00055, éste corresponde a un régimen rodante según la Tabla 3.27.

Para el diseño del combustible necesario para la activación del cuesco de palmiste se estableció el calor requerido para transformar el carbón de cuesco de palmiste en carbón activado.

Para la determinación del poder calórico del combustible se determinó una combustión incompleta, que produce el propano y butano, componentes del GLP, se muestran las ecuaciones 3.3 y 3.4, respectivamente. Se establecieron estas ecuaciones ya que en el horno Nichols se produce tanto monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O) y gas hidrógeno (H_2).

$$C_3H_8 + 4\ O_2 \rightarrow H_2 + CO + 2CO_2 + 3H_2O \qquad 3.3$$

$$2C_4H_{10} + 11\ O_2 \rightarrow 2H_2 + 2CO + 6CO_2 + 8H_2O \qquad 3.4$$

A partir de las ecuaciones 3.3 y 3.4 se elaboró la Tabla 3.28 donde se muestran los requerimientos energéticos para obtener el carbón activado a partir de cuesco de palmiste. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

Tabla 3.28. Requerimientos energéticos del horno rotatorio para la producción de carbón activado a partir de cuesco de palmiste

Parámetro	Valor	Unidades
GLP requerido	5,48	kg/h
Aire requerido	70,09	kg/h
Flujo volumétrico de aire a condiciones estándar (25ºC y 1 ATM)	264,37	m^3/h
λ	0,86	
T operación	500	ºC

La Tabla 3.28 muestra que la atmósfera es 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 con gases.

Además se calculó la composición de los gases de salida, la misma que se señala en la Tabla 3.29.

Tabla 3.29. Composición de los gases de salida del horno

Gas	Flujo (kg/h)	% Flujo
CO	3,09	4,11
CO_2	11,67	15,50
H_2	0,22	0,29
H_2O	6,76	8,98
N_2	53,53	71,11
Total	75,27	100

Como indica la Tabla 3.29 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

Es necesario diseñar la trituradora y el tamiz para reducir de tamaño la materia prima. Para esto, se escogió una trituradora de mandíbulas, las especificaciones se encuentran en la Tabla 3.30.

Tabla 3.30. Especificaciones de la trituradora de mandíbulas usada para la reducción de tamaño del cuesco de palmiste

	Valor	**Unidades**
Modelo	LB-1510	
Abertura	100x150	mm
Motor	1,325	KW
Producción	400	kg/h

Las características para la elección de la trituradora de mandíbulas de la Tabla 3.30 coinciden con el diámetro de los tipos de cuesco de palmiste mostrado en la Tabla 3.1 y 3.2, además de la producción mínima de la Tabla 3.26.

El proceso de reducción de tamaño del cuesco de palmiste, continua con la clasificación por medio de un tamizador grizzly a 6,7 mm, cuya área de clasificación es de 38,18 cm^2.

Se supuso que el 80 % del material que ingresa, pasa por el grizzly ya que eso se determinó con la ayuda del d_{80} que se encuentra en la Tabla 3.1. y 3.2. Además, el 1 % del total del cuesco de palmiste tipo Tenera y un 6 % del cuesco de palmiste tipo Dura, presentan un tamaño menor a malla 10 (2,00 mm), se tomara en cuenta tan solo el d_{80} del cuesco de palmiste tipo Tenera que es el mismo d_{80} del cuesco de palmiste tipo Dura.

El cuesco de palmiste a un tamaño menor a 2,00 mm se considera un subproducto que podría ser de igual manera comercializado como carbón activado. El grizzly que separa esta fracción tiene un área de 96,52 cm^2. Finalmente se diseñó una pila stock para una reserva de 24 horas durante 2 días, no se consideró más tiempo debido a que este material puede atraer plagas. Las dimensiones de esta pila stock son: 1,51 m de alto y 2,11 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 el carbón obtenido sea enfriado es necesario reducir su tamaño para producir carbón activado del tipo 6 12, es decir tamaño de partícula entre malla 6 (3,35 mm) y malla 12 (1,7 mm). Para esto, se escogió una trituradora de rodillos, las especificaciones se encuentran en la Tabla 3.31.

Tabla 3.31. Especificaciones de la trituradora de rodillos usada para la reducción de tamaño del cuesco de palmiste

	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 palmiste producido, se clasifica por medio de un tamizador grizzly a 3,35 mm, cuya área de clasificación es de 29,36 cm^2, es muy pequeño debido a la poca producción de la planta.

Del ingreso al grizzly, se supuso que el 60 % pasa por el mismo, además según la misma, el 10 % del total presenta un tamaño menor a malla 12 (1,7 mm).

El cuesco de palmiste a un tamaño menor a 1,70 mm se considera un subproducto que podría ser de igual manera comercializado como carbón activado. El grizzly que separa esta fracción tiene un área de 21,48 cm^2. Los cálculos se muestran en el Anexo XI.

3.4.2.5. Dimensionamiento del reactor

El reactor es un recipiente circular con tapas cóncavas, con una chaqueta de calentamiento que trabajara con vapor de agua, además poseerá agitación continua.

El reactor trabajara las 24 horas durante 15 días, y lo hará por ciclos, cada ciclo consta de 4 horas. Las dimensiones se encuentran en la Tabla 3.32. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

Tabla 3.32. Dimensiones del reactor

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de entrada (cuesco de palmiste)	278	kg/h
Diámetro	2,62	m
Longitud	2,62	m
Flujo de vapor de agua	3 897,43	kg/h
Concentración de solución de cloruro de zinc	0,5	g Zn/g cuesco
Cantidad de solución de cloruro de zinc	2	mL/g cuesco

3.4.2.6. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de la solución de Cloruro de Zinc

Se debe tener un tanque de almacenamiento para la solución de cloruro de zinc. El abastecimiento será diario. La Tabla 3.33 muestra las dimensiones del tanque, los cálculos se presentan en el Anexo XI.

Tabla 3.33. Dimensiones del tanque de almacenamiento de cloruro de zinc

Forma	Volumen (m^3)	Diámetro (m)	Altura (m)
Cilindro vertical	13,33	3	2,0

3.4.2.7. Dimensionamiento del tanque de lavado para el carbón activado

El tanque de lavado del carbón activado será un cilindro vertical, dimensionado para un ciclo, ya que el proceso tanto en el reactor como posteriormente en el horno rotatorio es de un ciclo (4 horas) cada uno, poseerá una chaqueta donde circulará vapor de agua. Las dimensiones se encuentran en la Tabla 3.34. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

Tabla 3.34. Dimensiones del tanque de lavado del carbón activado

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen	0,26	m^3
Diámetro	0,6	m
Altura	1	m
Flujo de vapor de agua	47 697,24	kg/h

3.4.2.8. 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 3.35. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

Tabla 3.35. Dimensiones de la cámara de enfriamiento

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de entrada (carbón activado)	83	kg/h
Diámetro	2,60	m
Longitud interna	6	m
Flujo de vapor de agua	2 766,67	kg/h

3.4.2.9. Dimensionamiento de la cámara de secado para el carbón activado

La cámara de secado se empleara para facilitar el proceso de remover el agua excedente del carbón activado. La cámara se diseñará para una jornada de trabajo diaria (8 horas). Las dimensiones se encuentran en la Tabla 3.36. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

Tabla 3.36. Dimensiones de la cámara de secado

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de entrada (carbón activado)	83	kg/h
Ancho	2,50	m
Alto	2,50	m
Largo	2,50	m
Humedad inicial	80	%
Humedad final	10	%
Flujo de vapor de agua	96,61	kg/h

3.4.2.10. Dimensionamiento del caldero

Una vez que se tiene dimensionado el horno rotatorio y su consumo energético, el reactor, el tanque de lavado del carbón activado y la cámara de secado es necesario determinar las dimensiones del caldero, el flujo de vapor que produce y la cantidad de combustible que necesita para su funcionamiento. A partir de la Tabla 3.32, 3.34, 3.36 se encontró la cantidad de vapor de agua necesaria para inyectar a los equipos antes nombrados 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 aprovecha el calor de la cámara que actúa como un economizador. Los datos de diseño del caldero se encuentran en la Tabla 3.37. Los cálculos se encuentran en el Anexo XI.

La Tabla 3.37 muestra las dimensiones con las que se deberá construir el caldero. Además se señala el combustible que se usó para los cálculos que es diesel. 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 3.37. Dimensiones del caldero

Parámetro	Valor	Unidades
Altura de la caldera	4,00	m
Diámetro de la caldera	2,00	m
Altura de la caja de fuego	3,00	m
Número de tubos hervidores	5	
Diámetro de tubos hervidores	250	mm
Combustible	Diesel	
Consumo de combustible	28 929,34	kg/día
Ingreso de agua al caldero	51 691,28	kg/h
T vapor de salida	200	ºC
Flujo de aire	499 609,70	kg/día

3.4.2.11. Dimensionamiento de los tanques de reserva de combustible

Es necesario tener tanques de almacenamiento para los combustibles. El abastecimiento será semanal. La Tabla 3.38 muestra las dimensiones de cada uno de ellos, los cálculos se presentan en el Anexo XI.

Tabla 3.38. Dimensiones de los tanques de reserva de combustible

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

La Tabla 3.38 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 %.

3.4.2.12. Dimensionamiento de la cámara de post-combustión

Al trabajar en atmósfera reductora, es necesario construir una cámara de post-combustión que reduzca la producción de gases de efecto invernadero, principalmente sirva para oxidar el monóxido de carbono y los NOx. La Tabla 3.39 indica las dimensiones de la cámara.

Tabla 3.39. 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	10,56	kg/h
Flujo de aire	121	kg/h
T salida de los gases	900	ºC

Finalmente se elaboró la distribución en planta, la vista de un corte de la misma y el diagrama de flujo. Las Figuras 3.44, 3.45 y 3.46 indican cada vista.

Tabla 3.40. Distribución de la planta según la Figura 3.44

Número	Zona
1	Descarga de material
2	Trituradora de mandíbulas
3	Tamizado
4	Pila stock
5	Tanque de solución de cloruro de zinc
6	Reactor
7	Horno
8	Cámara de enfriamiento
9	Tanque de lavado del carbón activado
10	Cámara de secado
11	Tamizado
12	Ensacado
13	Tanque de reserva de GLP
14	Tanque de reserva de Diesel
15	Caldero
16	Lavador de gases de combustión
17	Cámara de post-combustión
18	Vestidores
19	Oficinas
20	Parqueadero

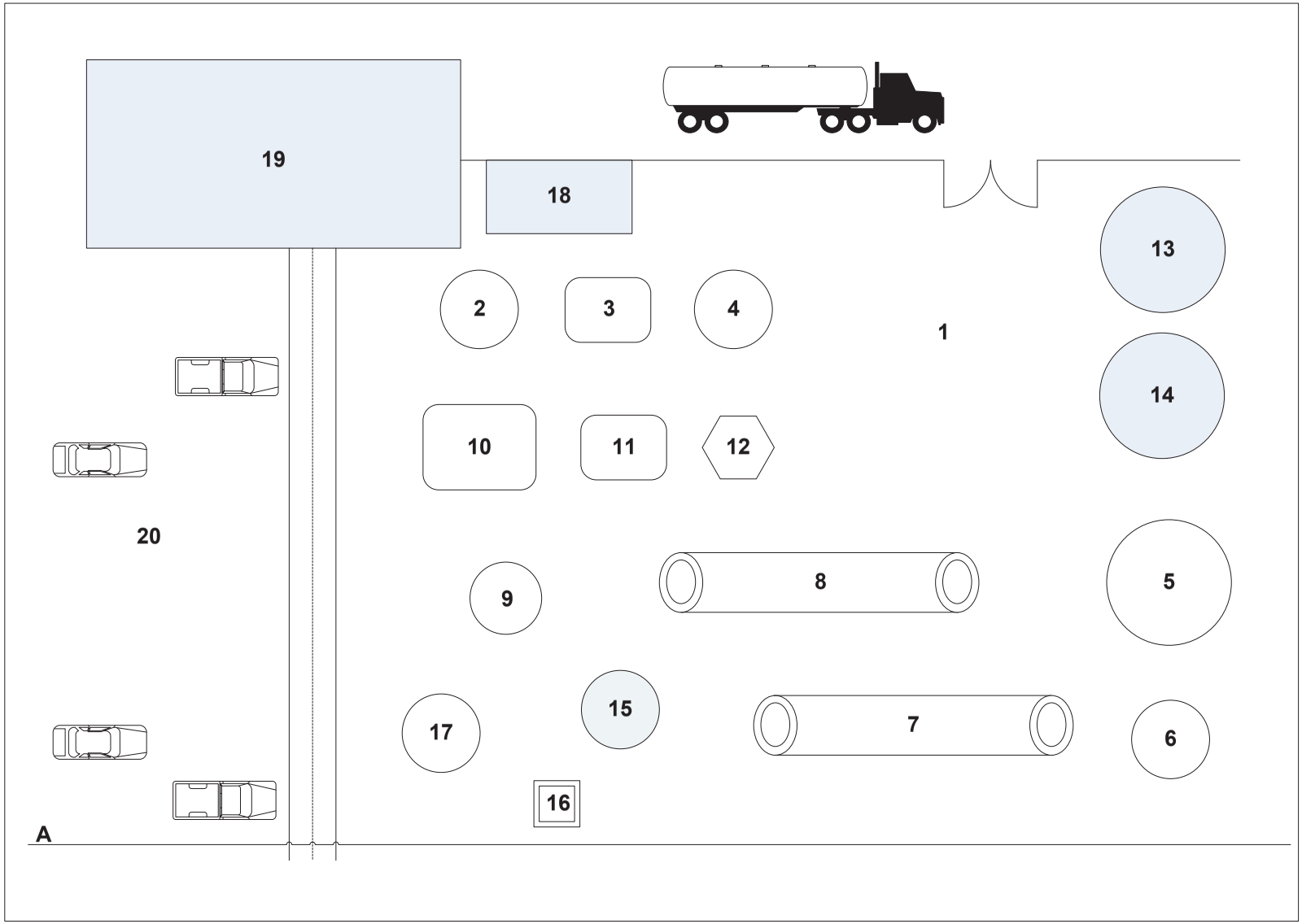


Figura 3.44. Distribución en planta

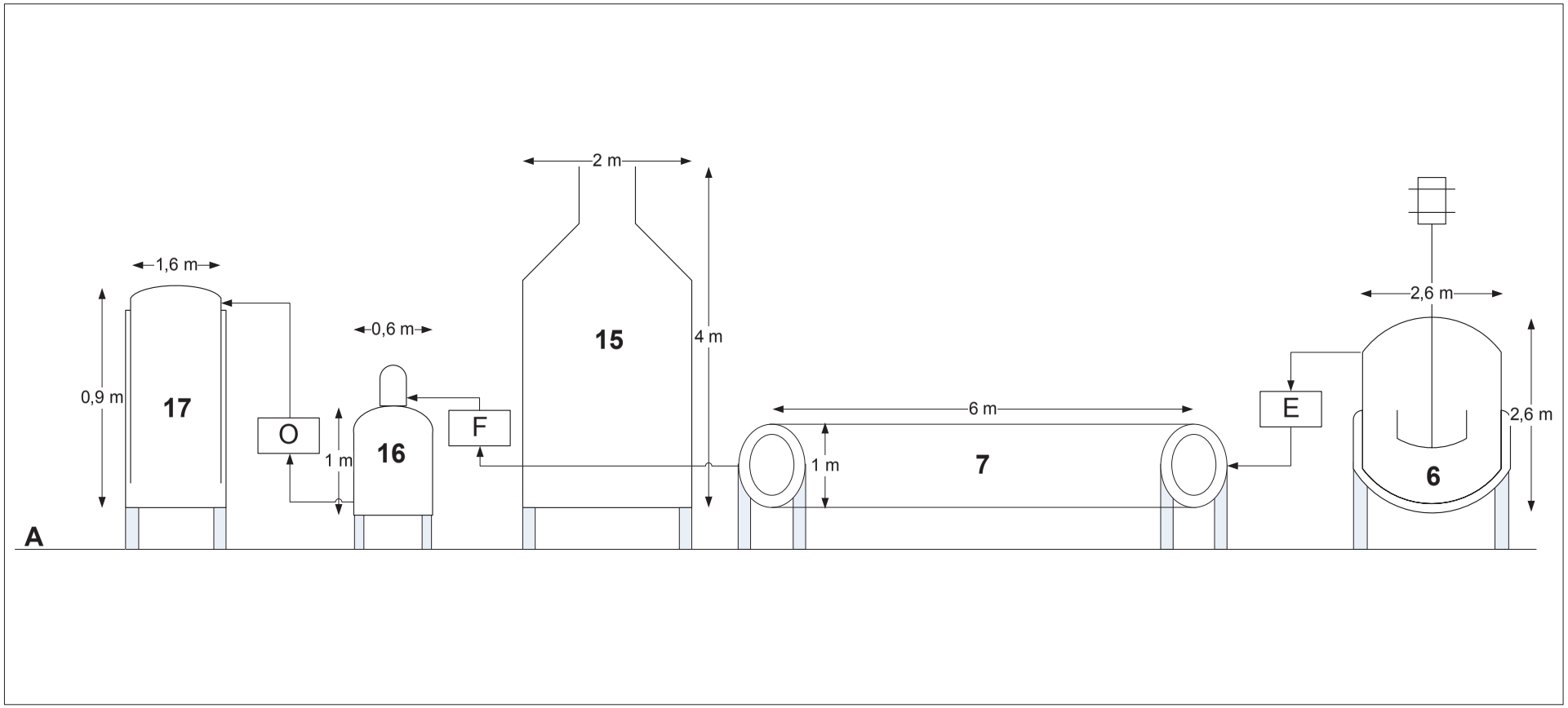
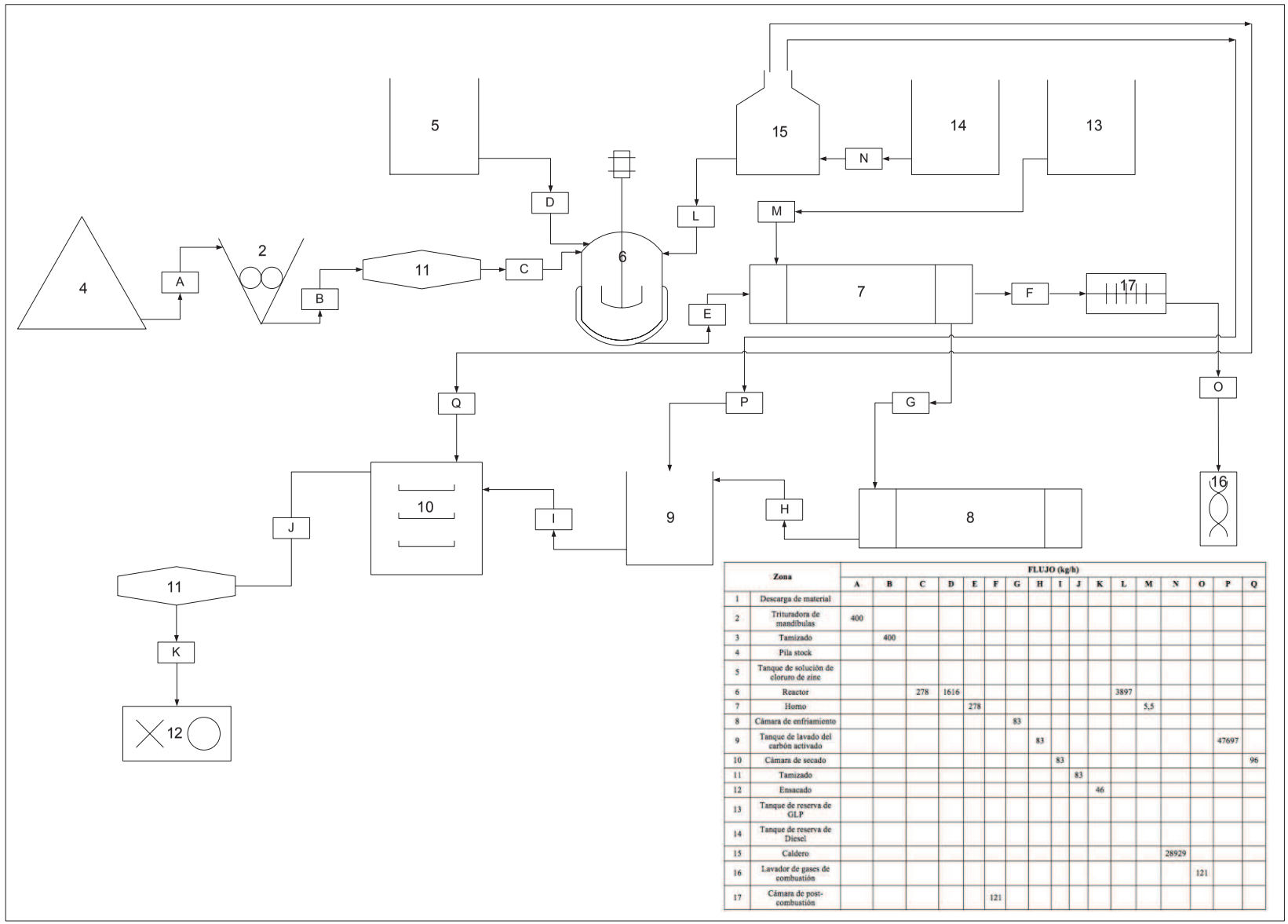


Figura 3.45. Corte en “A” de la planta de producción



	Zona	FLUJO (kg/h)															
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Descarga de material																	
2	Trituradora de mandíbulas	400																
3	Tamizado		400															
4	Pila stock																	
5	Tanque de solución de cloruro de zinc																	
6	Reactor			278	1616								3897					
7	Horno					278								5,5				
8	Cámara de enfriamiento							83										
9	Tanque de lavado del carbón activado								83								47697	
10	Cámara de secado									83								96
11	Tamizado										83							
12	Ensacado											46						
13	Tanque de reserva de GLP																	
14	Tanque de reserva de Diesel																	
15	Caldero														28929			
16	Lavador de gases de combustión															121		
17	Cámara de post-combustión						121											

Figura 3.46. Diagrama de flujo

3.5. EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA PLANTA PARA UNA PRODUCCIÓN DE 20 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, para encontrar el flujo de caja anual y por medio de los indicadores TIR y VAN, encontrar la viabilidad del proyecto. La Tabla 3.41 resume los equipos y su costo.

Tabla 3.41. Gastos de inversión

Denominación	Valor	Contribución porcentual
Inversión fija:		
Terreno y construcciones	$56 900	36,5
Maquinaria y equipo	$58 050	37,2
Instalación de maquinaria y equipos	$17 415	11,2
Tuberías y accesorios	$2 000	1,3
Equipo y muebles de oficina	$1 305	0,8
Capital de operación	$20 350	13,0
TOTAL INVERSIONES	**$156 020**	**100,0**

La Tabla 3.41 señala los gastos de inversión para la implementación de la planta de producción de cuesco de palmiste.

La Tabla 3.42 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 %.

Tabla 3.42. 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
Caldero	1	$5 000	$5 000	$1 000
Horno Rotatorio	1	$15 000	$15 000	$3 000
Reactor de lecho agitado	1	$5 000	$5 000	$1 000
Trituradora de mandíbulas	1	$2 000	$2 000	$400
Zarandas	4	$500	$2 000	$400
Bandas transportadores	1	$800	$800	$160
Ensacador	1	$3 000	$3 000	$600
Bombas	2	$1 000	$2 000	$400
Enfriador	1	$2 500	$2 500	$500
Tanques de reserva	4	$3 000	$12 000	$2 400
Compresor	3	$1 250	$3 750	$750
Cámara de post combustión	1	$4 000	$4 000	$800
Cámara de secado	1	$1 000	$1 000	$200
	TOTAL		**$58 050**	**$11 610**

En la tabla 3.43 se observa los costos de materia prima e insumos.

Tabla 3.43. Costos de materia prima e insumos

Designación de la materia prima	Costo de la Materia prima $/kg	Cantidad de Materia Prima por día, kg	Cantidad de materia prima por mes, kg	Cantidad de materia prima por año, kg	Costo de materia prima por año
Cuesco de palmiste	$0,02	13 340	200 080	1 200 960	$24 019,20
Gas	$0,15	272,14	5 443	65 314	$9 797,04
Combustible diesel	$0,80	38	759	9 113	$7 290,24
Electricidad	$0,15	200	4 000	48 000	$7 200,00
Vapor de agua	$0,10	48,31	1 449	17 392	$1 739,16
			TOTAL	**139 818**	**$50 045,64**

La Tabla 3.44 muestra el costo anual de producción.

Tabla 3.44. Costos anuales de producción

Designación del rubro	Valor	Costos Fijos	Costos variables Unitarios	Contribución porcentual
Materiales directos	$24 019,20		$0,17	16,41
Mano de obra directa	$32 346,41	$32 346,41		22,10
Carga Fabril				
Mano de obra indirecta	$32 346,41	$32 346,41		22,10
Materiales indirectos	$26 026,44		$0,19	17,78
Depreciaciones				
Construcciones	$2 390,00	$2 390,00		1,63
Maquinaria y Equipo	$11 610,00	$11 610,00		7,93
Muebles y equipos de oficina	$261,00	$261,00		0,18
Otros Activos	$3 000,00	$3 000,00		2,05
Maquinaria y Equipo	$580,50	$580,50		0,40
Edificios	$478,00	$478,00		0,33
SUB-TOTAL COSTOS DE PRODUCCION	**$133 057,97**			
Imprevistos	$13 305,80			9,09
TOTAL, COSTOS ANUALES DE PRODUCCION	**$146 363,76**	**$83 012,33**	**$0,36**	**100,00**

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 3.45.

Tabla 3.45. Indicadores económicos obtenidos para la producción de carbón activado de cuesco de palmiste

Indicador	Valor
TIR	15 %
VAN	51 956,03

Según la Tabla 3.45 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

- Para la obtención de carbón activado es indispensable que la materia prima sea sometida a un proceso de molienda y clasificación, con el fin de que el agente activante pueda ingresar dentro de la estructura celulósica del cuesco. De otro modo, el cuesco sin reducir su tamaño presenta dificultades para ser impregnado, obteniéndose carbones activados de calidad poco homogénea.

- El cuesco de palmiste es un material de alta dureza puesto que el cuesco tipo Tenera presenta una dureza de 95 % y el cuesco tipo Dura una dureza de 97 %, denotando las biomoléculas responsables de esta rigidez, mismas que se presentan en el cuesco de tipo Tenera con 34,6 % de celulosa y 44,6 % de lignina y en el cuesco de tipo Dura con 34,2 % de celulosa y 41,1 % de lignina, por lo tanto se considera una materia prima ideal para la elaboración de carbón activado.

- El cuesco de palmiste, además, presenta una estructura altamente beneficiosa debido a la estructura ordenada que presenta, las fotografías en el MEB mostraron la estructura de la materia prima que facilitaría la obtención del carbón producido por su alta porosidad.

- La dureza del cuesco de palmiste es inversamente proporcional a la temperatura y tiempo de carbonización. En las pruebas de laboratorio el carbón producido a 400 ºC y 1 h tuvo la mayor dureza, mientras que el carbón producido a la mayor temperatura (600 ºC) y 2 h perdió mucho porcentaje de ésta.

- Para los dos tipos de cuesco de palmiste estudiado, en el proceso de carbonización se obtiene presencia de poros, sin embargo en el proceso de activación estos poros son mucho más relevantes, esto se debe, a que en ambos procesos, se tiene un aumento de densidad aparente en función de la

temperatura y tiempo de pirolisis, de esta manera el carbón obtenido a 600ºC y 2 h presenta la mayor densidad aparente. Además, 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 la pruebas de laboratorio el carbón producido a 2 h y 600 ºC obtuvo la menor dureza, pero el mayor porcentaje de carbón fijo, esto se cumple tanto para el cuesco de palmiste tipo Tenera y Dura.

- El rendimiento de la carbonización del cuesco de palmiste tipo Tenera es de 34,3 % y para el cuesco tipo Dura es de 34,8 %, mientras q el rendimiento del proceso de activación a nivel laboratorio para el cuesco de palmiste tipo Tenera es de 15,6 % y para el cuesco tipo Dura es de 13,5 %, estos rendimientos son muy bajos, ya que la pérdida de peso disminuye al aumento de temperatura.

- El carbón activado obtenido, tanto a nivel laboratorio como a escala piloto, presenta buenos índices de yodo, alrededor de los 600 mg I_2/g C.A., resultados comparables con el carbón activado granular, que bordean los 500 mg I_2/g C.A.

- La influencia del espesor de tipo de cuesco de palmiste, Tenera y Dura, para el proceso de obtención de carbón activado es irrelevante puesto que los resultados que se obtienen para las pruebas aplicadas en ambos tipos de cuescos son semejantes, la dureza, siendo un factor que se esperaba se vea afectada resulto en datos totalmente similares.

- La concentración de la solución activante de cloruro de zinc que se empleó en la impregnación, varió en un rango de 0,4 - 0,6 (g Zn/g cuesco), obteniendo los mejores resultados de superficie específica en los carbones activados en el uso de la solución X_{Zn} = 0,5 (g Zn/g cuesco).

- En el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera se empleó dos atmósfera controladas, atmósfera reductora ($\lambda < 1$) y atmósfera oxidante ($\lambda > 1$), los mejores resultados obtenidos fue en la atmósfera reductora porque 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 palmiste.

- El diagrama de proceso obtenido consta de: trituración y clasificación de la materia prima, impregnación y activación química con cloruro de zinc, enfriamiento, lavado y ensacado. Este esquema planteado es el más viable porque permite el ahorro de energía y costos debido al uso de un solo caldero para los equipos importantes dentro del proceso.

- El análisis económico realizado mostro la prefactibilidad económica de implementar una planta de obtención de carbón activado de cuesco de palmiste. Con una producción mensual de 20 t y un horizonte de 10 años de funcionamiento se determinó una rentabilidad del 15 % y valor actual neto de 51 956,03 USD.

4.2. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio complementario sobre el tratamiento de los residuos generados al impregnar la materia prima con Cl_2Zn.

- Evaluar energéticamente las condiciones de operación del diseño del horno para un mejoramiento del rendimiento económico de la planta.

- Realizar un estudio de factibilidad del proceso y un diseño más detallado, dados los buenos resultados obtenidos en el análisis económico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdul-Khalil, H., Siti-Alwani, M. y Mohd-Omar, A. (2006). Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of malaysian plant waste fibers. *Bioresource, 1*(2), 220-232.

2. 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.

3. Almansa, C. (2004). *Preparación de discos de carbón activado químicamente para almacenamiento de metano.* (Proyecto de titulación Previa a la Obtención del Título de Doctora en Ciencias Químicas). Universidad de Alicante, Alicante, España.

4. Argyropoulos, D. y Menachem, S. (1998). *Biopolymers from Renewable Resources: Occurrence and Role of Lignin.* (1ª Ed). Berlin, Alemania: Ed. Springer.

5. Banco Central del Ecuador. (2012). *Importación de la subpartida 3802100000*, Recuperado de http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/comercio/consultaTotXNandinaPaisConGrafico.jsp. (Marzo, 2013).

6. Boateng, A. (2008). Rotary Kilns. (1a. ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier.

7. Boehm, H.P. (2001). Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment. *Carbon, 40*(2002) 145-149.

8. Borrero, C. (2006). *Cultivo de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq).* Recuperado de http://borrerocesar.wikispaces.com/file/view/PALMA+DE+ACEITE+(RESUMEN).pdf. (Marzo 2013).

9. Caturla, F., Molina-Sabio, M. y Rodríguez-reinoso, F. (1991). Preparation of activated carbon by chemical activation with $ZnCl_2$. *Carbon, 29*(1991) 999-1007.

10. Chávez, F. y Rivadeneira, J. (2003). *Manual del cultivo de palma aceitera*. (1ra. ed.). Quito, Ecuador: Pasquel producciones.

11. 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.

12. Council for Mineral Technology. (1987). *Volatile content*. En Shipman, A. (Ed.). Testing of activated carbons. (pp. 24-25). Johannesburgo, Sudáfrica: MINTEK.

13. 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.

14. Desotec. (2011). *Estructura química del carbón activo.* Recuperado de http://www.desotec.com/ES/carbon_activo/p14/la_estructura_quimica_del_carbon_activo. (Noviembre 2013).

15. Evans, R. y Milne, T. (1987). Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. Fundamentals. *Energy and Fuels an American Society Journal*, *1*(2), 123-137.

16. 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.

17. Fogler, S. (2006). *Elements of Chemical Reaction Engineering.* (4ta. ed.). Westford, Estados Unidos: Prentice Hall PTR.

18. Fundación de fomento de exportaciones de aceite de palma y sus derivados de origen. (2010). *Ecuador: Producción, consumo y excedentes de aceite de palma*. Recuperado de http://www.fedapal.com/estad/prodec.pdf. (Marzo 2013).

19. Goertzen, S., Thériault, K., Oickle, A., Tarasuk, A. y Andreas, H. (2010). Standardization of the Boehm titration. Part I. CO_2 expulsion and endpoint determination. *Carbon, 48,* 1 252-1 261.

20. Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. (2010). Carbón Activado de cuesco de palma. *Estudio de termogravimetría y estructura*. Kessel University Press. Recuperado de http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-820-0.volltext.frei.pdf. (Octubre 2013).

21. Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. (2008). Pirólisis de Biomasa. *Cuesco de palma de aceite*. Kessel University Press. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=2Pa8EGyKFE8C&pg=PA1&lpg=PA1&dq=Piro%CC%81lisis+de+Biomasa+gomez+klose&source=bl&ots=_PbQ6KzLvs&sig=5DqtNXTNY2Ow188e2Kx7qT3IzHY&hl=es&sa=X&ei=T9P6UtKkII_NkQePrYCQCQ&ved=0CDkQ6AEwAg#v=onepage&q=Piro%CC%81lisis%20de%20Biomasa%20gomez%20klose&f=false. (Octubre 2013).

22. Gonzales-Serrano, E., Cordero, T., Rodriguez-Mirasol, J., y Rodriguez, J. (1997). Development of Porosity upon Chemical Activation of Kraft Lignin with $ZnCl_2$. *Industrial & Engineering Chemistry Research 36*(11), 4832-4838.

23. Grassino, S. (2003). *Cellulose*. Recuperado de: http://www.pslc.ws/spanish/cell.htm (Junio, 2013).

24. Guo, Y. y Rockstraw, D. (2006). Physical and chemical properties of carbons synthesized from xylan, cellulose, and Kraft lignin by H_3PO_4 activation. *Carbon, 44*(2006), 1464-1475. doi: 10.1016/j.carbon.2005.12.002.

25. Han, J. (1998). Properties of Nonwood Fibers. *TAPPI 1998 North American Nonwood Symposium*. (pp.1-11). Atlanta, Estados Unidos: USDA.

26. Hu, Z., Srinivasan, M. y Ni, Y. (2001). Novel activation process for preparing highly Microporous and Mesoporous activated carbons, Carbon, 39, 877-886.

27. Hurtado, R. y González, F. (2009). *Celulosa*. Recuperado de: http://www.eis.uva.es/~macromol/curso08-09/pls/celulosa.htm (Noviembre, 2013).

28. Industrializadora Oleofinos. (2010). *Palma africana: clasificación.* Recuperado de http://palma.aceitescomestibles.com/index.php?option=com_content&view=article&id=112:clasificacion&catid=45:caracteristicas&Itemid=53. (Diciembre 2013).

29. Industrializadora Oleofinos. (2010). *Palma africana.* Recuperado de http://palma.aceitescomestibles.com/index.php?option=com_content&view=article&id=5:la-palma-africana&catid=48:datos-generales&Itemid=1. (Diciembre 2013).

30. Industrializadora Oleofinos. (2010). Biomasa de *Palma africana.* Recuperado de http://palma.aceitescomestibles.com/index.php?option=com_content&view=article&id=134:biomasa-de-palma-africana&catid=1:biodiesel&Itemid=54. (Diciembre 2013).

31. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995a*). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 989:94*. Recuperado de http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte1/1989.pdf (Marzo, 2013).

32. 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 (Marzo, 2013).

33. Kunii, D. y Chisaki, T. (2008). *Rotary Reactor Engineering.* (1a. ed.). Tokio, Japón: Elsevier.

34. Levenspiel, W. (1986). *Ingeniería de las Reacciones Químicas.* (6ta. ed.). Barcelona, España: Reverté S. A.

35. 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.

36. 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 (Noviembre, 2013).

37. 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.

38. Marsh, H. y Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. (1a. ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier.

39. Miño, A. (2004). *Carbón Activado con mayor dureza para el tratamiento de minerales auríferos*. (Proyecto de titulación Previa a la Obtención del Título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

40. 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.

41. Moreno, A. (2011). *Manual del carbón activado*. Recuperado de http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf. (Noviembre 2013)

42. Muñoz A. (2010). *Palma africana en el Ecuador*. Recuperado de http://agrytec.com/agricola/index.php?option=com_content&id=3468:palma-africana-en-el-ecuador&Itemid=43. (Marzo 2013).

43. 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.

44. 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.

45. 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

46. Prauchner, M. y Rodríguez-Reinoso, F. (2012). Chemical versus physical activation of coconut Shell: A comparative study. *Microporous and mesoporous materials 152*(2012), 163-171. doi: 10.1016/j.micromeso.2011.11.040

47. Prías, J., Rojas, C. y Echeverry, N. (2011). Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor Guadua Angustifolia Kunth. *Fisica, 35*(135) 157-166.

48. Reyes, S. y Ortiz, J. (2008). *Aprovechamiento de los residuos de la palma africana*. Universidad Cooperativa de Colombia. Recuperado de http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMET-SAM2008/pdfs/a9.pdf. (Octubre 2013)

49. Roldán, J. (2009). *Evaluación de energías renovables no convencionales factibles de desarrollarse en el ecuador*. (Proyecto de titulación Previa a la Obtención del Título de Ingeniero Eléctrico de Potencia). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

50. Salvador, C. (1999). *Estudio del proceso de obtención de carbón activado por activación química a partir del cuesco de palmiste*. (Proyecto de titulación Previa a la Obtención del Título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

51. 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.

52. 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).

53. 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.

54. 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.

55. Technical Association of the pulp and paper Industry. (1970c). *TAPPI Testing Procedures: Cellulose in Wood*, Test Method T-17-M-55. Chicago, Estados Unidos.

56. Technical Association of the pulp and paper Industry. (1970d). *TAPPI Testing Procedures: Lignin in Wood*, Test Method T-13-os-54. Chicago, Estados Unidos.

57. Tomlinson, B., Horn, J. y Fisher, J. (2011). *The Anatomy of Palms*. (1a. ed.). Nueva York, Estados Unidos: Oxford.

58. Universidad de Granada-España. (2013). *Propiedades físicas*. Recuperado de http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/otraspp2.htm. (Septiembre 2013).

59. Universidad Politécnica Salesiana. (2012). *Diseño de un sistema de secado artificial para madera.* Recuperado de http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/277/5/Capitulo3_Diseno_de_un_sistema_de_secado_artificial_de_madera_automatico.pdf. (Noviembre 2013).

60. Wan Daud, A. y Wan Ali, S. (2003). Comparison on pore development of activated carbón produced from palm Shell and coconut Shell. *Bioresource technology.* 93(2004) 63-69.

61. 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.

ANEXOS

ANEXO I
MUESTREO DEL CUESCO DE PALMISTE

Objetivo: Determinar las principales dimensiones de una muestra significativa de cada tipo de cuesco de palmiste.

En la Figura AI.1 se muestran las dimensiones del cuesco de palmiste y en la Tabla AI.1 se presentan los resultados.

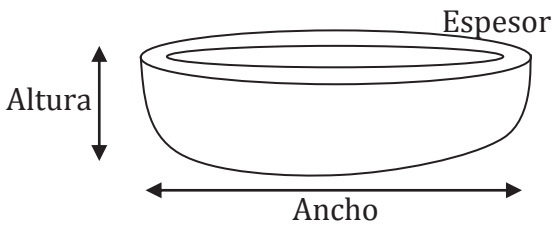


Figura AI.1. Dimensiones del cuesco de palmiste tomadas en el muestreo

Tabla AI.1. Dimensiones del cuesco de palmiste tipo Tenera tomadas en el muestreo

	Ancho	**Altura**	**Espesor**
1	1,8	1,2	2,01
2	1,9	1,2	2,05
3	2,0	1,3	2,00
4	2,1	1,4	2,06
5	2,1	1,3	2,01
6	2,0	1,4	2,00
7	1,9	1,2	2,01
8	1,7	1,5	2,04
9	1,8	1,4	2,05
10	1,9	1,3	2,03
11	2,0	1,0	2,03
12	2,1	1,3	2,01
13	2,2	1,5	2,02
14	2,2	1,3	2,03
15	2,2	1,2	2,04
16	2,0	1,2	2,03
17	2,1	1,1	2,02
18	1,9	1,1	2,01
19	1,8	1,5	2,03
20	1,9	1,4	2,04

Tabla AI.2. Dimensiones del cuesco de palmiste tipo Dura tomadas en el muestreo

	Ancho	**Altura**	**Espesor**
1	2,7	2	5,07
2	2,8	2,1	5,06
3	2,6	2	5,05
4	2,5	1,9	5,07
5	2,9	1,8	5,08
6	3,0	2	5,05
7	3,1	2,1	5,04
8	2,8	2,2	5,05
9	2,7	2,3	5,07
10	2,5	2	5,09
11	2,9	1,9	5,09
12	2,8	1,8	5,04
13	2,8	1,7	5,08
14	2,7	2	5,05
15	2,4	2,1	5,08
16	2,9	2	5,09
17	3,0	1,9	5,07
18	3,1	2,1	5,06
19	2,9	2	5,03
20	2,9	2,2	5,08

ANEXO II

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

Tabla AII.1. Ensayo granulométrico del cuesco de palmiste triturado tipo Tenera

TAMIZ (No.)	TAMIZ (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado acumulado
3/8	9,50	6,0	6,02	6,02	93,98
3	6,73	42,3	42,47	48,49	51,51
4	4,75	22,0	22,09	70,58	29,42
6	3,35	16,6	16,67	87,25	12,75
8	2,36	11,7	11,75	99,00	1,00
10	2	0,2	0,20	99,20	0,80
12	1,70	0,3	0,30	99,50	0,50
14	1,4	0,2	0,20	99,70	0,30
16	1,18	0,2	0,20	99,90	0,10
-16	-1,18	0,1	0,10	100,00	0,00

Tabla AII.2. Ensayo granulométrico del cuesco de palmiste triturado tipo Dura

TAMIZ (No.)	TAMIZ (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado acumulado
3/8	9,50	9,1	9,13	9,13	90,87
3	6,73	32,8	32,90	42,03	57,97
4	4,75	20,5	20,56	62,59	37,41
6	3,35	19,2	19,26	81,85	18,15
8	2,36	12,2	12,24	94,08	5,92
10	2	5,1	5,12	99,20	0,80
12	1,70	0,2	0,20	99,40	0,60
14	1,4	0,2	0,20	99,60	0,40
16	1,18	0,2	0,20	99,80	0,20
-16	-1,18	0,2	0,20	100,00	0,00

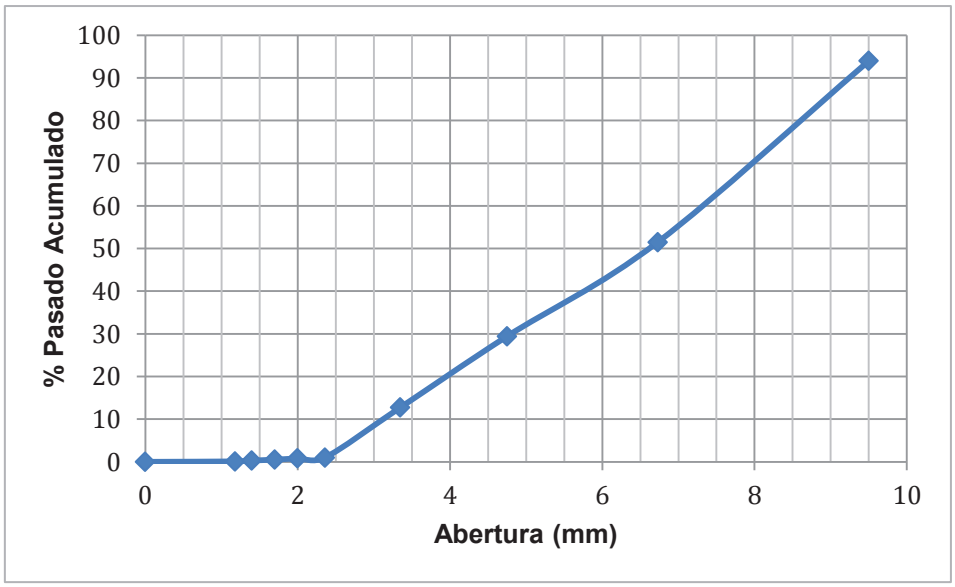


Figura AII.1. Curva granulométrica para el cuesco de palmiste tipo Tenera

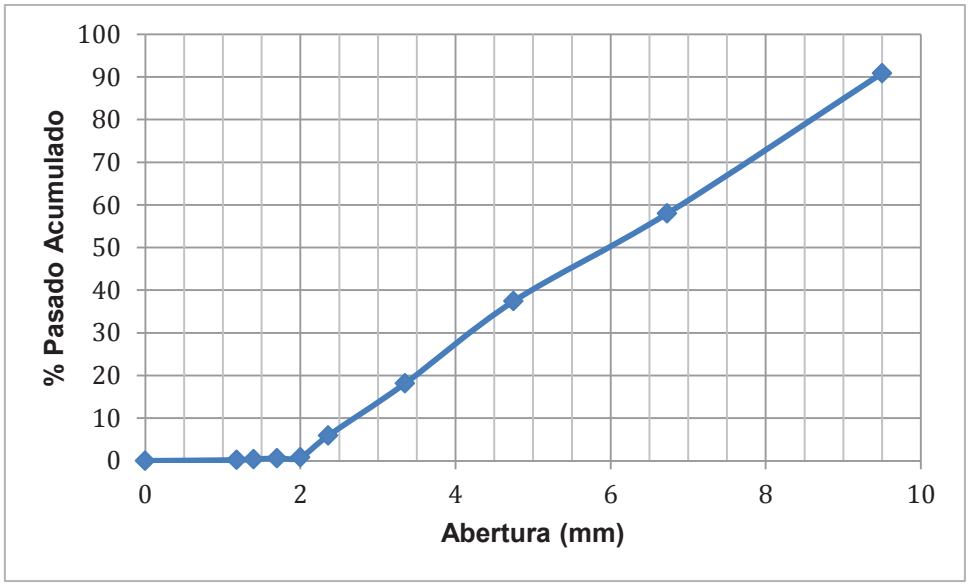


Figura AII.2. Curva granulométrica para el cuesco de palmiste tipo Dura

Con base en la curva granulométrica se determinó que el d_{80} de la muestra analizada, tanto para el cuesco de palmiste tipo Tenera y Dura fue de 8,6 mm.

ANEXO III
FICHAS TÉCNICAS CONTENIDO DE VOLÁTILES CENIZAS Y CARBÓN FIJO

Ficha Técnica Nº 1

Muestra: Cuesco de palmiste tipo Tenera y cuesco de palmiste tipo Dura

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)	Muestra (g)	M_1 (g)	M_2 (g)
Tenera	20,8242	1,0067	21,0272	20,8742
Dura	23,0464	1,0004	23,2385	23,0814

Tabla AIII.2. Resultados del ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo de la materia prima

	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
Tenera	79,8	5,0	15,2
Dura	80,8	3,5	15,7

Donde:

M_1: peso del crisol sin tapa una vez que se carbonizó a 950 ºC durante 7 min

M_2: peso del crisol sin tapa una vez que se carbonizó a 950 ºC durante 2 h

Ejemplo de cálculo:

$$\%\,Volátiles = \frac{Crisol\ vacío + Muestra\ - M_1}{Muestra} * 100 \qquad AIII.1$$

$$\%\,Volátiles = \frac{20{,}8242 + 1{,}0067\ - 21{,}0272}{1{,}0067} * 100$$

$$\%\,Volátiles = 79{,}8$$

$$\%\ Cenizas = \frac{M_2 - Crisol\ vacío}{Muestra} * 100 \qquad AIII.2$$

$$\%\ Cenizas = \frac{20{,}8742 - 20{,}8242}{1{,}0067} * 100$$

$$\%\ Volátiles = 5{,}0$$

$$\%Carbón\ fijo = 100 - \%\ Volátiles - \%\ Cenizas \qquad AIII.3$$

$$\%Carbón\ fijo = 100 - 79{,}8 - 5{,}0$$

$$\%Carbón\ fijo = 15{,}2$$

Ficha Técnica Nº 2

Muestra: Carbón producido de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 2

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

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

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Crisol (g)	Muestra (g)	M_1 (g)	M_2 (g)
Tenera	400ºC	1	21,6463	1,1	22,2419	21,7441
		1,5	21,9924	1,1	22,6591	22,0268
		2	20,1040	1,1	20,8971	20,1373
	500ºC	1	20,0567	1,1	20,7710	20,0938
		1,5	20,9838	1,1	21,8507	21,0251
		2	21,6468	1,1	22,6186	21,7195
	600ºC	1	20,1027	1,1	21,1101	20,1957
		1,5	19,6807	1,1	20,5989	19,7427
		2	21,2302	1,1	22,2423	21,3251
Dura	400ºC	1	19,6818	1,1	20,1678	19,7089
		1,5	21,2315	1,1	21,9186	21,2522
		2	22,6126	1,1	23,2722	22,6402
	500ºC	1	21,9938	1,1	22,8365	22,0364
		1,5	20,1050	1,1	21,0132	20,1447
		2	19,6826	1,1	20,5539	19,7255
	600ºC	1	22,6119	1,1	23,5048	22,7169
		1,5	20,0556	1,1	20,9476	20,0963
		2	20,9825	1,1	21,9973	21,0344

Tabla AIII.4. Resultados de los ensayos de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo de ambos tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Ceniza (%)	Volátiles (%)	Carbón fijo (%)
Tenera	400ºC	1	48,9	5,8	45,3
		1,5	39,4	3,1	57,5
		2	27,9	3	69,1
	500ºC	1	35,1	3,3	61,6
		1,5	21,2	3,7	75,1
		2	11,7	6,6	81,7
	600ºC	1	25,4	4,5	70,1
		1,5	16,5	5,7	77,8
		2	8	6,6	85,4
Dura	400ºC	1	55,8	2,5	41,7
		1,5	42,5	1,9	55,6
		2	37	2,5	60,5
	500ºC	1	23,4	3,9	72,7
		1,5	21,4	3,6	75
		2	16,8	3,9	79,3
	600ºC	1	18,8	6,5	74,7
		1,5	11,9	6,7	81,4
		2	7,7	4,8	87,5

Ficha Técnica Nº 3

Muestra: Carbón activado producido mediante activación química con cloruro de zinc a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala laboratorio

Ensayo No: 3

Objetivo: Determinar el contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del carbón activado producido mediante activación química con cloruro de zinc a partir de los tipos de cuesco de palmiste a escala de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

Tabla AIII.5. Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del carbón activado producido a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Crisol (g)	Muestra (g)	M_1 (g)	M_2 (g)
Tenera	450ºC	1	21,8857	1,0020	22,3668	21,9247
		1,5	20,9851	1,0099	21,4130	21,0354
		2	21,2207	1,0031	1,4502	21,2601
	500ºC	1	23,6515	1,0083	24,1791	23,7437
		1,5	21,8959	1,0083	22,4751	21,9941
		2	21,0011	1,0047	21,4340	21,0740
	600ºC	1	21,2402	1,0076	21,8157	21,4003
		1,5	23,6832	1,0065	24,3215	23,8293
		2	39,1843	1,0070	39,9087	39,4249
Dura	450ºC	1	36,4260	1,0050	37,0850	36,4844
		1,5	36,5609	1,0069	37,2935	36,6318
		2	36,6635	1,0006	37,3677	36,7341
	500ºC	1	21,9396	1,0032	22,5391	21,9838
		1,5	21,0382	1,0021	21,6098	21,0994
		2	21,3283	1,0073	21,9519	21,3909
	600ºC	1	23,7493	1,0098	24,3143	23,7996
		1,5	39,3130	1,0004	39,8785	39,3568
		2	36,4398	1,0043	37,0434	36,4909

Tabla AIII.6. Resultados de los ensayos de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del carbón activado producido a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Ceniza (%)	Volátiles (%)	Carbón fijo (%)
Tenera	450ºC	1	8,4	70,3	26,1
		1,5	8,9	47,4	32,5
		2	6,6	52,9	36,1
	500ºC	1	7,6	52	37,8
		1,5	6,4	43,7	39
		2	7,9	39	41,7
	600ºC	1	3,5	47,7	42,4
		1,5	4,6	42	47,9
		2	3,6	34,1	52,1
Dura	450ºC	1	5,3	48,6	46,8
		1,5	6,4	48,6	47,4
		2	6,4	45,1	50,2
	500ºC	1	4	39,1	55,3
		1,5	5,6	36,7	59,3
		2	5,7	34,9	59,4
	600ºC	1	4,6	31,5	63,2
		1,5	4	26,9	66,6
		2	4,6	24,9	68,6

Ficha Técnica Nº 4

Muestra: Carbón activado producido mediante activación química con cloruro de zinc a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y 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 carbón activado producido mediante activación química con cloruro de zinc a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos en el horno piloto Nichols.

Tabla AIII.7. Ensayo de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del carbón activado producido a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Crisol (g)	Muestra (g)	M_1 (g)	M_2 (g)
Tenera	λ=0,9	0,5	36,5884	1,0114	37,2337	36,7230
		1	36,6956	1,0247	37,3543	36,7954
		1,5	21,9501	1,0014	22,7172	22,1473
		2	21,0542	1,0126	21,7818	21,3744
		2,5	21,3390	1,0206	22,0950	21,4551
		3	23,7640	1,0139	24,4651	23,8561
	λ=1,1	0,5	21,3806	1,0267	22,1509	21,5876
		1	23,7968	1,0117	24,4161	23,8927
		1,5	39,3390	1,0097	40,0636	39,5540
		2	36,5253	1,0091	37,2604	36,7438
		2,5	36,7475	1,0218	37,4665	37,0471
		3	36,8344	1,0218	37,5158	36,8843
Dura	λ=0,9	0,5	39,3102	1,0094	40,0491	39,4206
		1	36,4547	1,0285	37,2188	36,5780
		1,5	36,6816	1,0086	37,4481	36,7868
		2	36,7536	1,0147	37,5104	36,8875
		2,5	22,0773	1,0232	22,8382	22,2010
		3	21,2354	1,017	21,9629	21,4270
	λ=1,1	0,5	22,1271	1,0184	22,7908	22,2090
		1	21,3541	1,0060	22,1455	21,6283
		1,5	21,4760	1,0108	22,2537	21,6291
		2	23,8381	1,0106	24,6287	23,9848
		2,5	39,4731	1,0054	40,1944	39,5888
		3	36,6460	1,0329	37,3494	36,8351

Tabla AIII.8. Resultados de los ensayos de determinación del contenido de volátiles cenizas y carbón fijo del carbón activado producido a partir de ambos tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Ceniza (%)	Volátiles (%)	Carbón fijo (%)
Tenera	λ=0,9	0,5	18,6	39,2	42,2
		1	13,8	35,7	50,5
		1,5	14,6	30,9	54,5
		2	15	28,1	56,9
		2,5	14	25,9	60,1
		3	13,9	21,4	64,7
	λ=1,1	0,5	20,2	38,8	41
		1	17,6	31,9	50,5
		1,5	19,2	29,6	51,2
		2	20,1	28,2	51,7
		2,5	18,3	26,8	54,9
		3	12	24,9	63,1
Dura	λ=0,9	0,5	15,8	27,5	56,7
		1	11,9	26,8	61,3
		1,5	13,1	25,5	61,4
		2	12,6	23,1	64,3
		2,5	11,3	22,4	66,3
		3	11,8	19,6	68,6
	λ=1,1	0,5	17,2	27,5	55,3
		1	24,9	19,3	55,8
		1,5	7,5	31,1	61,4
		2	10,5	26	63,5
		2,5	13,9	20,7	65,4
		3	13,4	19,4	67,2

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

Ficha Técnica Nº 1

Muestra: Cuesco de palmiste tipo Tenera y Dura

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 de la muestra (g)	Peso picnómetro +muestra+agua (g)	Peso picnómetro +agua (g)	Densidad real (g/cm^3)
Cuesco Tenera	1,0079	41,4304	41,2173	1,2684
Cuesco Dura	1,0048	40,8516	40,6622	1,2324

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{W_{pic+agua} - W_{pic+muestra+agua}}{W_m}} \quad \frac{g}{cm^3} \qquad AIV.1$$

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{41{,}2173 - 41{,}4302}{1{,}0079}} \quad \frac{g}{cm^3}$$

$$\delta = 1{,}2684 \quad \frac{g}{cm^3}$$

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)
Cuesco Tenera	33,37	32	95,89	0,334
Cuesco Dura	47,69	46,3	97,06	0,477

*Volumen= 100 cm^3

Ficha Técnica Nº 2

Muestra: Tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar la densidad real de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a escala de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

Tabla AIV.3. Ensayo de determinación de la densidad real de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Muestra	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Peso de la muestra (g)	Peso picnómetro +muestra+agua (g)	Peso picnómetro +agua (g)	Densidad real (g/cm^3)
Tenera	400	2	0,9937	40,3020	40,6015	0,745
	500	2	1,0072	40,8083	41,2014	0,729
	600	2	1,0153	40,8923	41,2367	0,719
Dura	400	2	1,0183	41,0233	41,2493	0,792
	500	2	0,9957	40,3115	40,6288	0,772
	600	2	1,0070	40,4715	40,6470	0,741

Ficha Técnica Nº 3

Muestra: Tipos de cuesco de palmiste carbonizado a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 3

Objetivo: Determinar la densidad aparente y la dureza de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a escala de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

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

Muestra	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm^3)
Tenera	400	1	54,5	44,1	80,92	0,643
		1,5	47,3	34,7	73,36	0,659
		2	47,5	33,8	71,16	0,670
	500	1	45,6	35,8	78,51	0,663
		1,5	44,9	31,8	70,82	0,671
		2	46,1	31,5	68,33	0,678
	600	1	45,7	33,9	74,18	0,629
		1,5	44,4	30,1	67,79	0,637
		2	38,5	25,4	65,97	0,666
Dura	400	1	55,7	49,8	89,41	0,638
		1,5	48,7	39,9	81,93	0,647
		2	47,8	38,2	79,92	0,652
	500	1	45,8	38,4	83,84	0,653
		1,5	43,5	33,5	77,01	0,669
		2	46,5	34,1	73,33	0,688
	600	1	46,7	36,0	77,09	0,670
		1,5	44,3	32,8	74,04	0,674
		2	44,3	30,4	68,62	0,702

Ficha Técnica Nº 4

Muestra: Carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 4

Objetivo: Determinar la densidad real del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a escala de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

Tabla AIV.5. Ensayo de determinación de la densidad real del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Muestra	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Peso de la muestra (g)	Peso picnómetro +muestra+agua (g)	Peso picnómetro +agua (g)	Densidad real (g/cm^3)
Tenera	450	1	1,0023	48,4760	48,3210	1,179
		1,5	1,018	48,4525	48,3270	1,142
		2	1,0187	48,6100	48,3169	1,406
	500	1	1,0222	48,4811	48,3191	1,190
		1,5	1,0119	48,5141	48,3175	1,242
		2	1,0291	48,6148	48,3152	1,414
	600	1	1,0085	48,5088	48,3146	1,235
		1,5	1,0146	48,4425	48,3045	1,158
		2	1,0106	48,4857	48,3147	1,204
Dura	450	1	1,0124	48,4272	48,3226	1,116
		1,5	1,0408	48,4390	48,3161	1,130
		2	1,0433	48,4448	48,3161	1,142
	500	1	1,0309	48,5438	48,3446	1,256
		1,5	1,0397	48,5142	48,3174	1,235
		2	1,0186	48,4560	48,9283	1,245
	600	1	1,0166	48,4337	48,3145	1,133
		1,5	1,0190	48,4087	48,3222	1,093
		2	1,0202	48,4085	48,3191	1,097

Ficha Técnica Nº 5

Muestra: Carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 5

Objetivo: Determinar la densidad aparente y la dureza del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a escala de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

Tabla AIV.6. Ensayo de determinación de la densidad aparente y de la dureza del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Muestra	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm^3)
Tenera	450	1	43,5	31,5	72,41	1,276
		1,5	20,7	9,8	47,34	1,313
		2	33,3	13,4	40,24	1,401
	500	1	40,5	22,4	55,31	1,304
		1,5	18,3	3,7	20,22	1,373
		2	26,8	4,1	17,23	1,525
	600	1	21,8	3,9	17,89	1,412
		1,5	21,1	3,6	17,06	1,546
		2	24,9	3,2	12,85	1,594
Dura	450	1	33,7	12,4	63,64	1,086
		1,5	30,7	12,9	42,86	1,096
		2	29,1	11,3	39,41	1,116
	500	1	20,1	8,7	42,02	1,311
		1,5	23,6	9,3	38,83	1,343
		2	18,7	11,9	36,8	1,484
	600	1	23,9	6,2	25,83	1,495
		1,5	22,0	5,4	24,55	1,718
		2	23,0	4,1	17,83	1,753

Ficha Técnica Nº 6

Muestra: Carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera.

Ensayo No: 6

Objetivo: Determinar la densidad real del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a diferentes lambdas y tiempos.

Tabla AIV.7. Ensayo de determinación de la densidad real del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos a escala de piloto

Muestra	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Peso de la muestra (g)	Peso picnómetro +muestra+agua (g)	Peso picnómetro +agua (g)	Densidad real (g/cm^3)
Tenera	λ= 0,9	0,5	1,0114	48,4043	48,3151	1,097
		1	1,0247	48,4777	48,3174	1,186
		1,5	1,0014	48,5478	48,3191	1,297
		2	1,0126	48,7060	48,3179	1,629
		2,5	1,0206	48,5150	48,3133	1,247
		3	1,0139	48,4341	48,3131	1,137
	λ= 1,1	0,5	1,0267	48,6539	48,3204	1,482
		1	1,0117	48,4999	48,3237	1,211
		1,5	1,0097	48,4640	48,3182	1,169
		2	1,0091	48,5368	48,3219	1,272
		2,5	1,0218	48,5433	48,3210	1,279
		3	1,0008	48,4252	48,3384	1,095
Dura	λ= 0,9	0,5	1,0094	48,4602	48,3164	1,225
		1	1,0285	48,4843	48,3058	1,211
		1,5	1,0086	48,4850	48,3115	1,208
		2	1,0147	48,5310	48,3050	1,287
		2,5	1,0232	48,5562	48,330	1,286
		3	1,0170	48,6503	48,3270	1,468
	λ= 1,1	0,5	1,0184	48,5496	48,3257	1,283
		1	1,0060	48,4174	48,3140	1,115
		1,5	1,0108	48,4180	48,3334	1,092
		2	1,0106	48,4445	48,3210	1,140
		2,5	1,0054	48,5556	48,3195	1,308
		3	1,0329	48,6496	48,318	1,483

Ficha Técnica Nº 7

Muestra: Carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera.

Ensayo No: 7

Objetivo: Determinar la densidad aparente y la dureza del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera a diferentes lambdas y tiempos.

Tabla AIV.8. Ensayo de determinación de la densidad aparente y de la dureza del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes lambdas y tiempos a escala de piloto

Muestra	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Dureza (%)	Densidad aparente (g/cm^3)
Tenera	λ= 0,9	0,5	49,0	23,4	47,76	3,255
		1	4,7	1,6	34,04	4,220
		1,5	6,4	2,0	19,25	2,360
		2	12,1	1,9	15,1	2,363
		2,5	9,4	1,4	13,7	2,720
		3	12,2	1,2	9,84	1,077
	λ= 1,1	0,5	12,4	6,6	53,23	3,611
		1	6,4	2,3	35,94	2,367
		1,5	10,6	2,2	20,75	2,471
		2	38,8	5,9	15,21	1,85
		2,5	15,4	2,3	14,94	2,34
		3	11,6	1,5	12,93	0,974
Dura	λ= 0,9	0,5	15,8	8,6	54,43	1,958
		1	47,8	24,0	50,21	1,875
		1,5	9,9	4,8	48,48	3,114
		2	12,1	5,9	48,76	1,606
		2,5	16,4	6,9	42,07	2,525
		3	21,7	8,7	40,09	1,064
	λ= 1,1	0,5	5,1	3,1	60,78	5,308
		1	4,2	2,5	59,52	3,310
		1,5	6,1	3,4	55,74	4,340
		2	6,5	3,3	50,77	4,313
		2,5	7,6	3,6	47,37	6,280
		3	43,9	16,5	43,1	1,025

ANEXO V
FICHAS TÉCNICAS DE RENDIMIENTO

Ficha Técnica Nº 1

Muestra: Cuesco de palmiste carbonizado tipo Tenera y Dura a 400, 500 y 600 ºC y diferentes tiempos

Ensayo No: 1

Objetivo: Determinar el rendimiento en lecho fijo de los tipos de cuesco de palmiste carbonizado a nivel de laboratorio a 400, 500 y 600 ºC y diferentes tiempos.

Tabla AV.1. Ensayo de determinación del rendimiento del cuesco de palmiste carbonizado a 400, 500 y 600 ºC

Muestra	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento (%)	Medio (%)
Tenera	400	1	130,1	65,81	50,58	42,80
		1,5	130,5	53,17	40,74	
		2	130,3	48,3	37,07	
	500	1	160,0	54,97	34,36	32,31
		1,5	160,4	51,32	32,00	
		2	160,5	49,1	30,59	
	600	1	160,2	47,85	29,87	27,83
		1,5	160,3	46,1	28,76	
		2	160	39,8	24,88	
Dura	400	1	130,6	65,42	50,09	44,01
		1,5	130,5	54,41	41,69	
		2	130,6	52,56	40,25	
	500	1	160,4	54,68	34,09	31,72
		1,5	160,9	49,37	30,68	
		2	160,6	48,8	30,39	
	600	1	160,5	47,7	29,72	28,91
		1,5	160,1	46,35	28,95	
		2	160,4	45	28,05	

Ficha Técnica Nº 2

Muestra: Carbón activado de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos a escala de laboratorio

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar el rendimiento en lecho fijo del carbón activado a partir de los tipos de cuesco de palmiste a nivel de laboratorio a diferentes temperaturas y tiempos.

Tabla AV.2. Rendimiento de la activación de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes temperaturas y tiempos

Muestra	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento (%)	Medio (%)
Tenera	450	1	349,0	39,2	11,23	18,69
		1,5	338,6	55,38	16,36	
		2	342,4	97,56	28,49	
	500	1	315,5	41,99	13,31	16,85
		1,5	337,8	50,64	14,99	
		2	339,6	75,57	22,25	
	600	1	385,6	46,71	12,11	11,38
		1,5	335,7	38,38	11,43	
		2	366,8	38,87	10,60	
Dura	450	1	393,9	65,52	16,63	17,59
		1,5	356,0	59,58	16,74	
		2	351,9	68,27	19,40	
	500	1	339,3	37,93	11,18	12,23
		1,5	318,9	37,01	11,61	
		2	313,5	43,6	13,91	
	600	1	493,0	43,55	8,83	10,87
		1,5	336,9	37,31	11,07	
		2	317,7	40,36	12,70	

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

Ficha Técnica Nº 1

Muestra: Carbón activado producido a partir de los tipos de cuesco de palmiste a diferentes atmósferas (λ=0,9, λ=1,1)

Ensayo No: 1

Objetivo: Activar los tipos de cuesco de palmiste a un perfil de temperatura de 500 ºC en lecho agitado con una atmósfera reductora y una atmósfera oxidante.

Tabla AVI.1. Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para activar los tipos de cuesco de palmiste

Obs.	Hora	Temperatura	ΔPa	ΔPg	λ	Presión horno	Agitador	Presión alta de gas
	(min)	(ºC)	(mm H_2O)	(mm H_2O)		(mm H_2O)	RPM	PSIG
1	18:00	22	20	12	1,06	-1	4	60
2	7:00	433	20	4	-	-1	4	2
3	8:35	575	15	12	0,92	-1	4	50
4	9:05	526	10	8	0,91	-1	4	28
5	9:35	541	10	8	0,91	-1	4	28
6	10:05	550	10	8	0,91	-1	4	28
7	10:35	510	5	4	0,92	-1	4	28
8	11:05	501	10	8	0,91	-1	4	28
9	11:35	517	10	8	0,91	-1	4	28
10	12:05	534	10	8	0,91	-1	4	26
11	12:35	505	5	4	0,92	-1	4	26
12	13:05	560	10	8	0,91	-1	4	24
13	13:35	520	5	4	0,92	-2	4	20
14	14:05	542	5	4	0,92	-1,5	4	20
15	14:35	508	5	4	0,92	-2	4	20

(Continuación…)

Tabla AVI.1. Uso del horno Nichols Herreshoff mono solera para activar los tipos de cuesco de palmiste

Obs.	Hora	Temperatura	ΔPa	ΔPg	λ	Presión horno	Agitador	Presión alta de gas
	(min)	(ºC)	(mm H_2O)	(mm H_2O)		(mm H_2O)	RPM	PSIG
16	15:05	560	5	3	1,07	-1,5	4	18
17	15:35	511	5	3	1,07	-2	4	18
18	16:05	525	5	3	1,07	-2	4	18
19	16:35	526	5	3	1,07	-2	4	16
20	17:05	526	5	3	1,07	-1,5	4	16
21	17:35	545	10	5	1,15	-1,8	4	12
22	18:05	522	5	3	1,07	-1,8	4	12
23	18:35	540	10	5	1,15	-1,8	4	12
24	19:05	582	30	20	1,07	-1	4	32
25	19:35	554	30	20	1,07	-1	4	28
26	20:05	576	30	20	1,07	-1	4	32
27	20:35	570	15	12	1,07	-1	4	28
28	20:45	526	10	8	1,07	-14	4	28

Observaciones	
1	Encendido
2	Cambio de tanque de GLP
3	Carga de 1 kg de cuesco de palmiste impregnado tipo Tenera
4	Toma de muestra Tenera
5	Toma de muestra Tenera
6	Toma de muestra Tenera
7	Toma de muestra Tenera
8	Toma de muestra Tenera
9	Toma de muestra Tenera /Carga de 1 kg de cuesco de palmiste impregnado tipo Dura
10	Toma de muestra Dura
11	Toma de muestra Dura
12	Toma de muestra Dura
13	Toma de muestra Dura
14	Toma de muestra Dura

15	Toma de muestra Dura/ Cambio de atmósfera/Carga de 1 kg de cuesco de palmiste impregnado tipo Tenera
16	Toma de muestra Tenera
17	Toma de muestra Tenera
18	Toma de muestra Tenera
19	Toma de muestra Tenera
20	Toma de muestra Tenera
21	Toma de muestra Tenera /Carga de 1 kg de cuesco de palmiste impregnado tipo Dura
22	Toma de muestra Dura
23	Toma de muestra Dura
24	Toma de muestra Dura
25	Toma de muestra Dura
26	Toma de muestra Dura
27	Toma de muestra Dura
28	Apagado

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

Ficha Técnica Nº 1

Muestra: Carbón activado a X_{Zn}=0,4, pulverizado a 45 µm

Ensayo No: 1

Objetivo: Determinar el índice de yodo del carbón activado producido a escala laboratorio a X_{Zn}=0,4.

Tabla AVII.1. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,4

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Gasto Na_2SO_3 (ml)	Gasto Na_2SO_3 corregido (ml)	No. Iodo
Tenera	450	1	3,27	13,1	433
		1,5	3,82	15,3	394
		2	4,14	16,6	370
	500	1	3,82	15,3	394
		1,5	3,38	13,5	422
		2	2,73	10,9	473
	600	1	3,16	12,6	441
		1,5	2,51	10,0	493
		2	3,27	13,1	528
Dura	450	1	4,36	17,4	358
		1,5	2,94	11,8	457
		2	2,62	10,5	477
	500	1	4,80	19,2	349
		1,5	2,83	11,3	469
		2	3,38	13,5	422
	600	1	3,71	14,8	401
		1,5	2,94	11,8	457
		2	2,73	10,9	473

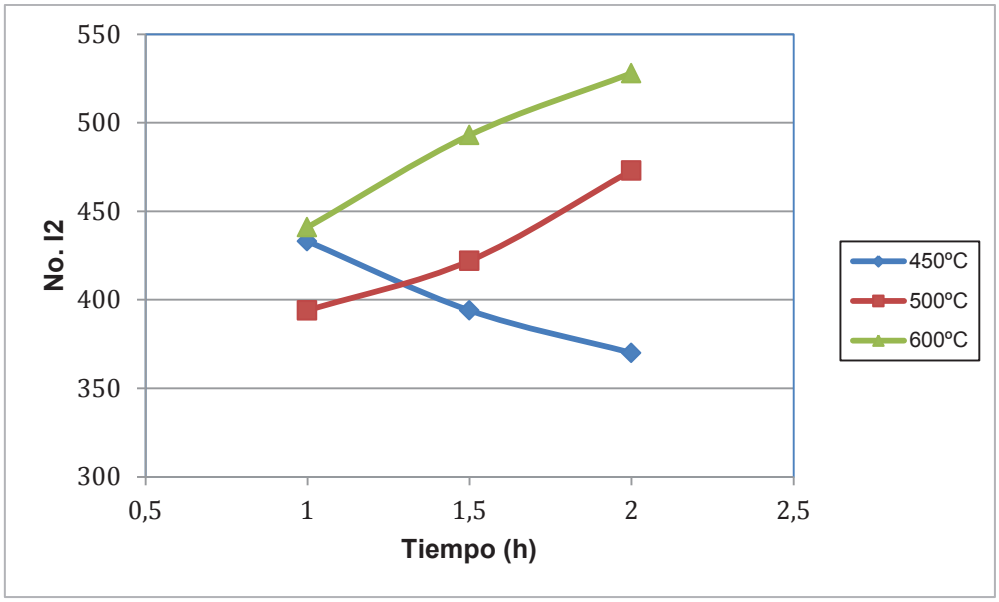


Figura AVII.1. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,4

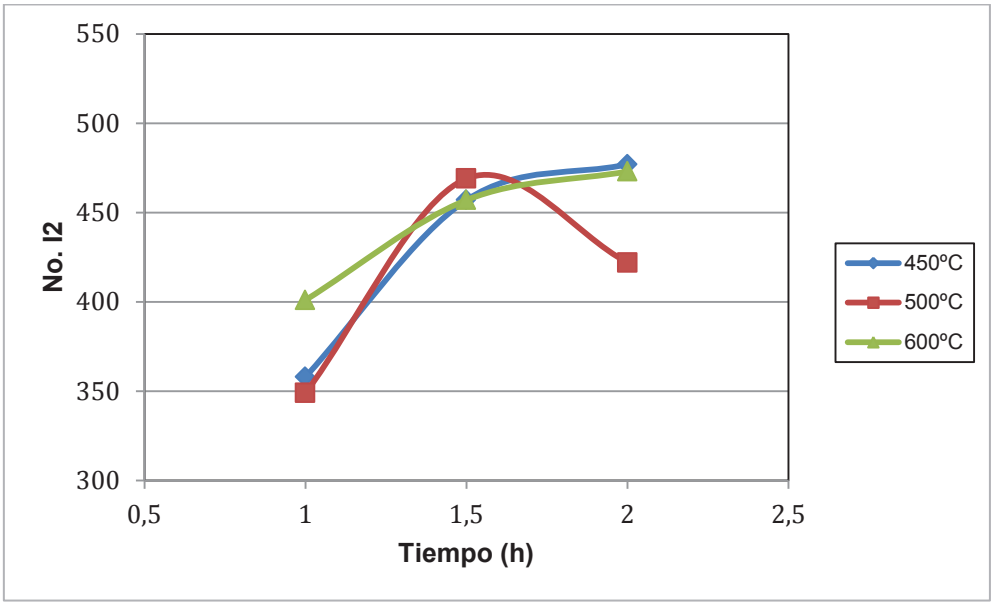


Figura AVII.2. Índice de yodo del carbón activado tipo Dura producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,4

Ficha Técnica Nº 2

Muestra: Carbón activado a X_{Zn}=0,5, pulverizado a 45 µm

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar el índice de yodo del carbón activado producido a escala laboratorio a X_{Zn}=0,5.

Tabla AVII.2. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,5

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Gasto Na_2SO_3 (ml)	Gasto Na_2SO_3 corregido (ml)	No. Iodo
Tenera	450	1	3,05	12,2	449
		1,5	2,29	9,2	513
		2	3,82	15,3	394
	500	1	2,07	8,3	538
		1,5	2,29	9,2	513
		2	3,82	15,3	394
	600	1	2,51	10,0	493
		1,5	1,53	6,1	600
		2	2,18	8,7	528
Dura	450	1	2,18	8,7	528
		1,5	2,94	11,8	457
		2	2,83	11,3	469
	500	1	4,80	19,2	349
		1,5	2,83	11,3	469
		2	2,94	11,8	457
	600	1	3,60	14,4	408
		1,5	2,83	11,3	469
		2	2,18	8,7	528

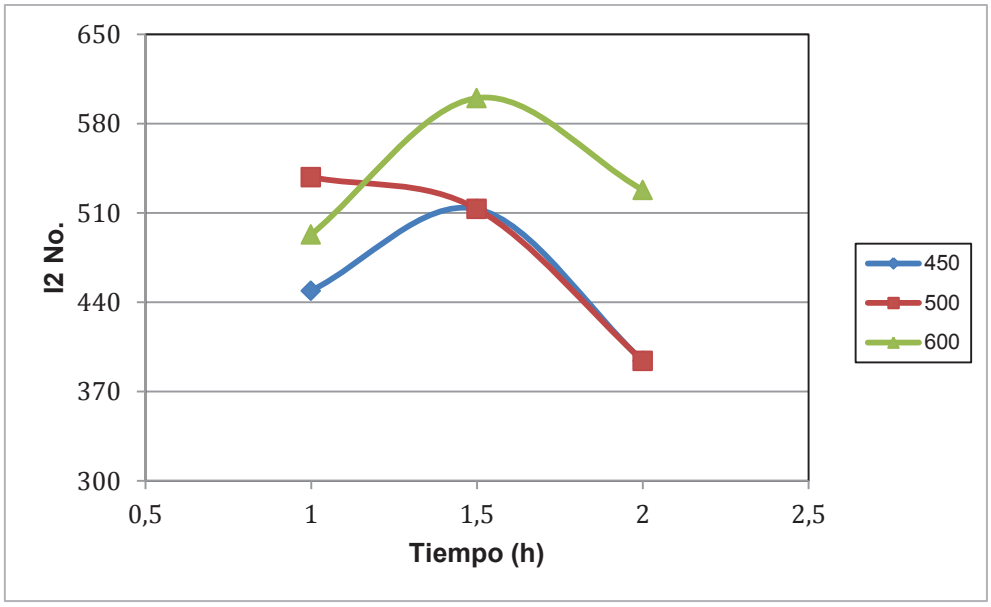


Figura AVII.3. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,5

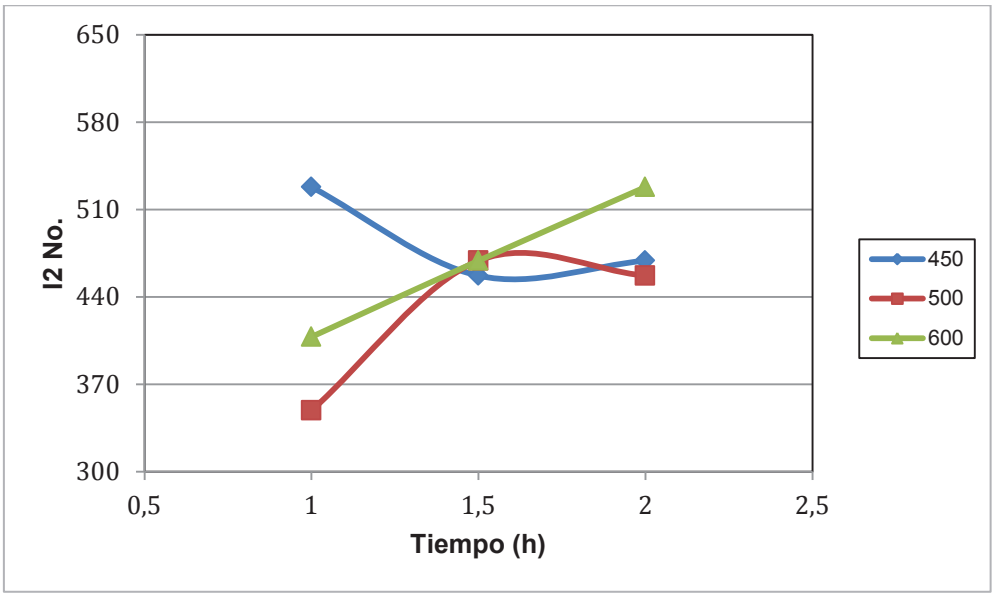


Figura AVII.4. Índice de yodo del carbón activado tipo Dura producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,5

Ficha Técnica Nº 3

Muestra: Carbón activado a X_{Zn}=0,6, pulverizado a 45 µm

Ensayo No: 3

Objetivo: Determinar el índice de yodo del carbón activado producido a escala laboratorio a X_{Zn}=0,6.

Tabla AVII.3. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,6

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Gasto Na_2SO_3 (ml)	Gasto Na_2SO_3 corregido (ml)	No. Iodo
Tenera	450	1	3,33	13,3	426
		1,5	2,35	9,4	508
		2	2,06	8,2	538
	500	1	3,43	13,7	422
		1,5	2,84	11,4	465
		2	2,16	8,6	528
	600	1	2,25	9,0	518
		1,5	2,06	8,2	513
		2	2,35	9,4	508
Dura	450	1	3,43	13,7	418
		1,5	1,96	7,8	528
		2	2,45	9,8	498
	500	1	2,65	10,6	481
		1,5	2,94	11,8	457
		2	1,96	7,8	548
	600	1	3,04	12,2	449
		1,5	2,06	8,2	538
		2	2,35	9,4	508

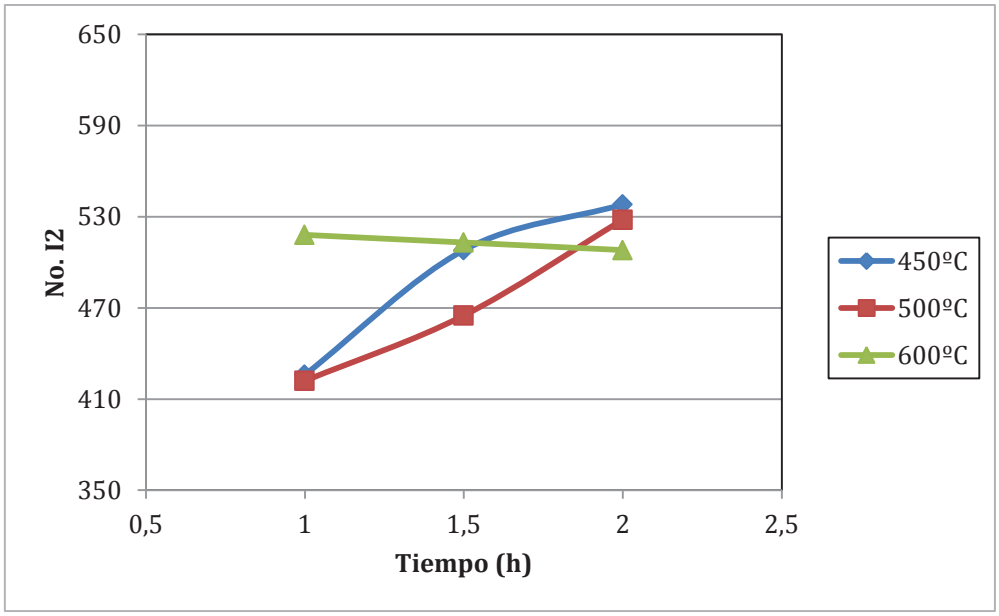


Figura AVII.5. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,6

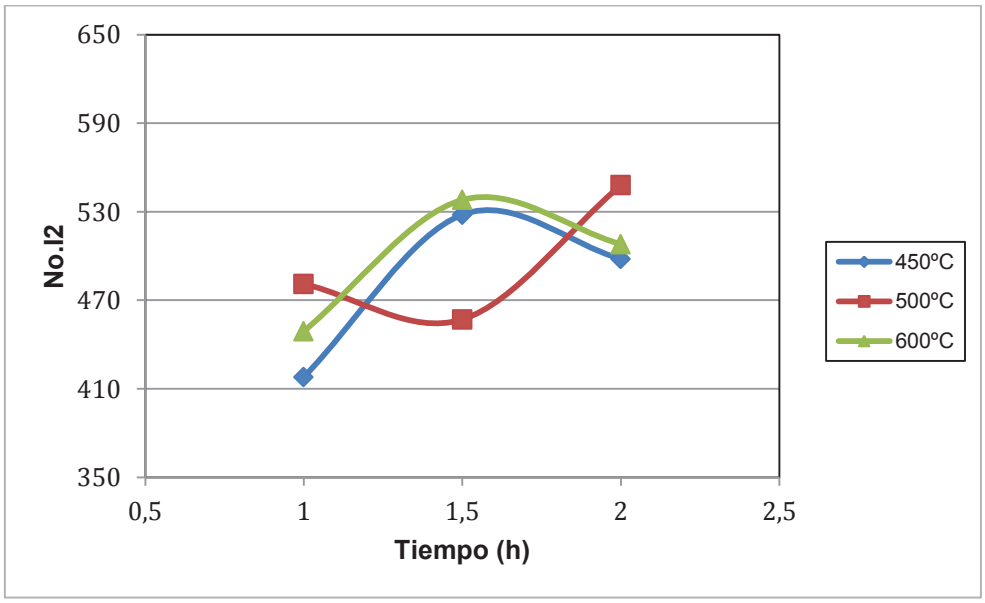


Figura AVII.6. Índice de yodo del carbón activado tipo Dura producido a nivel laboratorio a X_{Zn}=0,6

Ficha Técnica Nº 4

Muestra: Carbón activado en atmósfera reductora (λ=0,9), pulverizado a 45 μm

Ensayo No: 4

Objetivo: Determinar el índice de yodo del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera en atmósfera reductora (λ=0,9).

Tabla AVII.4. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido en atmósfera reductora (λ=0,9)

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Gasto Na_2SO_3 (ml)	Gasto Na_2SO_3 corregido (ml)	No. Iodo
Tenera	λ= 0,9	0,5	3,04	12,2	453
		1	2,55	10,2	489
		1,5	2,25	9,0	518
		2	1,67	6,7	582
		2,5	1,67	6,7	582
		3	1,67	6,7	582
Dura	λ= 0,9	0,5	1,86	7,4	493
		1	1,27	5,1	498
		1,5	1,18	4,7	600
		2	1,08	4,3	620
		2,5	1,18	4,7	641
		3	3,04	12,2	657

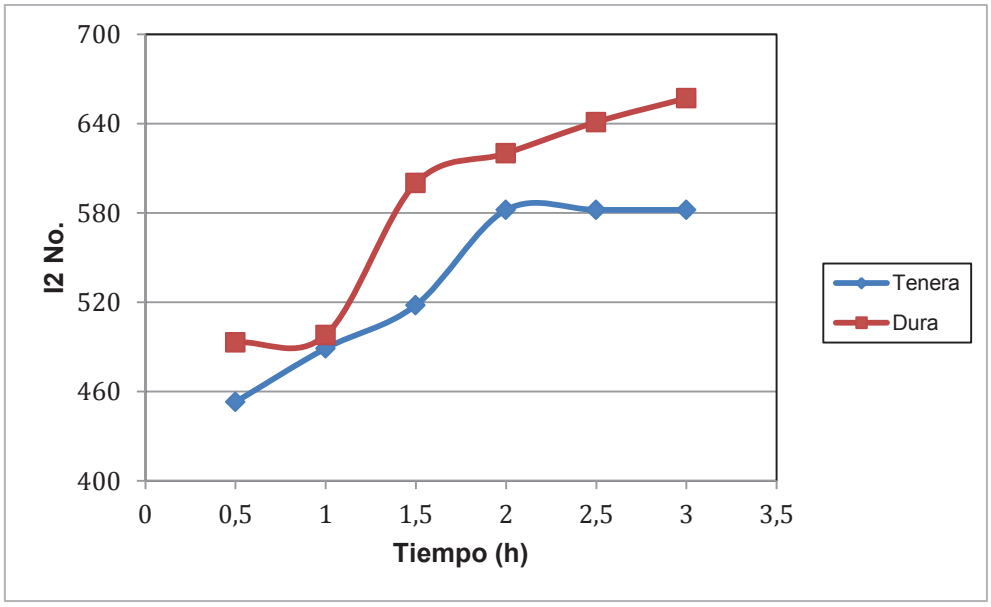


Figura AVII.7. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera y Dura producido a escala piloto en atmósfera reductora (λ=0,9)

Ficha Técnica Nº 5

Muestra: Carbón activado en atmósfera oxidante (λ=1,1), pulverizado a 45 μm

Ensayo No: 5

Objetivo: Determinar el índice de yodo del carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera en atmósfera oxidante (λ=1,1).

Tabla AVII.5. Determinación del índice de yodo para el carbón activado producido en atmósfera oxidante (λ=1,1)

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Gasto Na_2SO_3 (ml)	Gasto Na_2SO_3 corregido (ml)	No. Iodo
Tenera	λ= 1,1	0,5	2,65	10,6	493
		1	2,45	9,8	498
		1,5	1,67	6,7	600
		2	1,47	5,9	620
		2,5	2,35	9,4	641
		3	1,08	4,3	657
Dura	λ= 1,1	0,5	2,94	11,8	498
		1	2,94	11,8	503
		1,5	1,37	5,5	620
		2	0,98	3,9	657
		2,5	1,86	7,4	665
		3	1,37	5,5	673

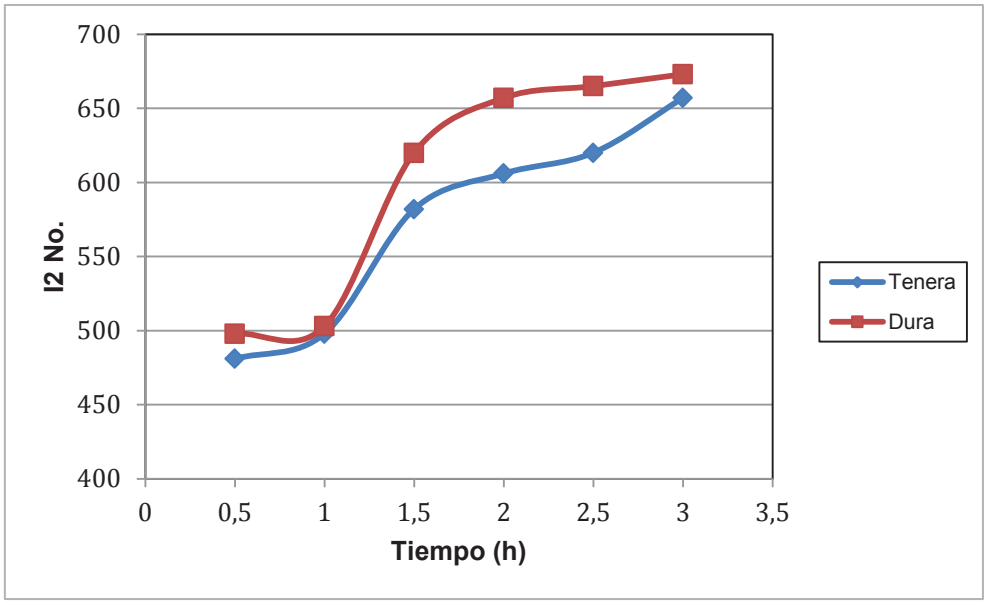


Figura AVII.8. Índice de yodo del carbón activado tipo Tenera y Dura producido a escala piloto en atmósfera oxidante (λ=1,1)

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 azul de metileno/g carbón activado)	Absorbancia
-	Blanco (Ácido acético 5%)	0,02
1:600	25 g/100 g	0,07
1:300	20 g/100 g	0,12
1:150	10 g/100 g	0,30
1:120	5 g/100 g	0,35

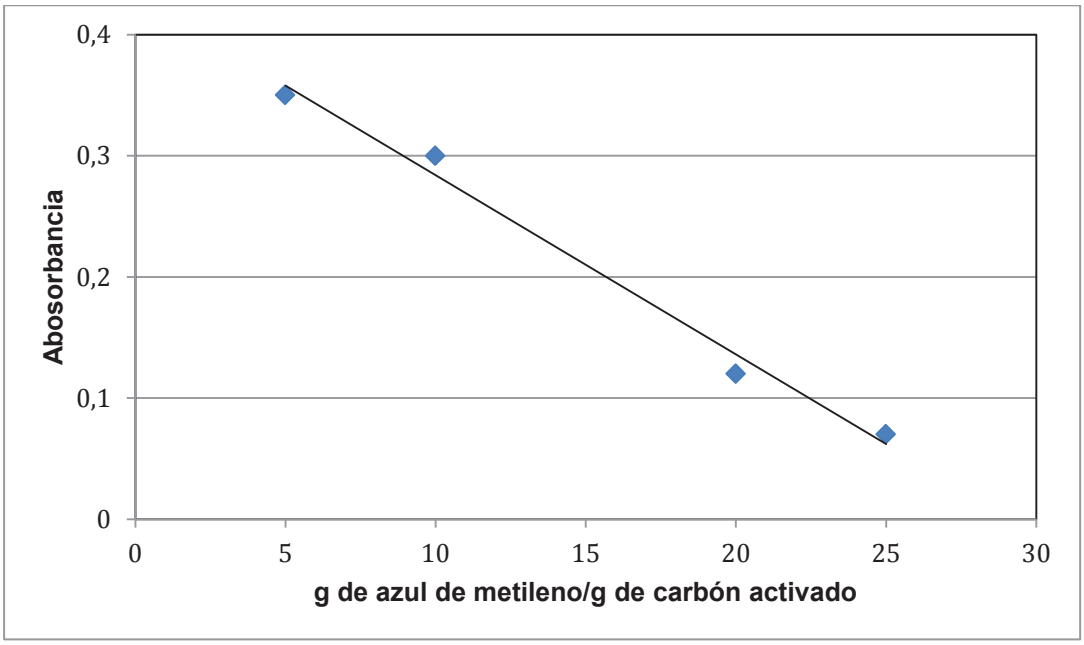


Figura AVIII.1. Curva de calibración de la absorbancia para la determinación del índice de azul de metileno para carbón activado

ANEXO IX
FICHAS TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PRODUCIDO

Ficha Técnica Nº 1

Muestra: Carbón activado en atmósfera reductora y oxidante, pulverizado a 45 µm

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 diferentes atmósferas (λ=0,9, λ=1,1)

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

	Atmósfera	λ=430 nm	λ=710 nm	UBR
Blanco	-	0,2	0,36	199,28
Tenera	λ=0,9	0,15	0,33	149,34
	λ=1,1	0,14	0,39	139,22
Dura	λ=0,9	0,15	0,36	149,28
	λ=1,1	0,14	0,55	138,90

Ficha Técnica Nº 2

Muestra: Precursor cuesco de palmiste Tenera y Dura, carbón activado a nivel laboratorio a diferentes tiempos y temperaturas, carbón activado a escala piloto en atmósfera reductora y oxidante, pulverizado a 45 µm

Ensayo No: 2

Objetivo: Determinar los grupos oxigenados presentes en el precursor, carbón activado producido a nivel laboratorio, carbón activado producido a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff mono solera por medio de una titulación Boehm.

Tabla AIX.2. Titulación Boehm para determinar los grupos funcionales del cuesco de palmiste tipo Tenera y Dura carbonizado

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Solución	Gasto con muestra (ml)	Gasto de blancos (ml)	Diferencia muestra/blanco	mol H^+/g CA
Tenera	500	2	$NaHCO_3$	3,80	4,25	-0,45	-0,0116
			Na_2CO_3	3,77	3,68	0,09	0,0044
			NaOH	3,00	1,63	1,38	0,0722
Dura	500	2	$NaHCO_3$	4,10	4,25	-0,15	-0,0039
			Na_2CO_3	4,27	3,68	0,59	0,0284
			NaOH	2,80	1,63	1,18	0,0617

Tabla AIX.3. Titulación Boehm para determinar los grupos funcionales del carbón activado producido a nivel laboratorio

	Temperatura (ºC)	Tiempo (h)	Solución	Gasto con muestra (ml)	Gasto de blancos (ml)	Diferencia muestra/blanco	mol H^+/g CA
Tenera	450	1	$NaHCO_3$	4,73	4,55	0,18	0,0045
			Na_2CO_3	4,93	4,55	0,38	0,0180
			NaOH	4,85	2,43	2,43	0,1273
		1.5	$NaHCO_3$	5,05	4,55	0,50	0,0129
			Na_2CO_3	5,03	4,55	0,48	0,0228
			NaOH	4,33	2,43	1,90	0,0997
		2	$NaHCO_3$	6,73	6,23	0,50	0,0129
			Na_2CO_3	6,60	6,37	0,23	0,0112
			NaOH	5,00	3,07	1,93	0,1015
	500	1	$NaHCO_3$	5,63	6,23	-0,61	-0,0157
			Na_2CO_3	5,37	6,37	-1,00	-0,0479
			NaOH	3,77	3,07	0,70	0,0368
		1.5	$NaHCO_3$	5,95	6,23	-0,28	-0,0073
			Na_2CO_3	6,07	6,37	-0,30	-0,0144
			NaOH	4,57	3,07	1,50	0,0788
		2	$NaHCO_3$	6,00	6,23	-0,23	-0,0060
			Na_2CO_3	6,07	6,37	-0,30	-0,0144
			NaOH	4,57	3,07	1,50	0,0788
	600	1	$NaHCO_3$	5,35	6,23	-0,88	-0,0229
			Na_2CO_3	5,65	6,37	-0,72	-0,0343
			NaOH	4,03	3,07	0,96	0,0503
		1.5	$NaHCO_3$	5,63	6,23	-0,61	-0,0157
			Na_2CO_3	5,73	6,37	-0,64	-0,0308
			NaOH	4,25	3,07	1,18	0,0621
		2	$NaHCO_3$	5,63	4,55	1,08	0,0278
			Na_2CO_3	5,13	4,55	0,57	0,0276
			NaOH	3,75	2,43	1,33	0,0696
Dura	450	1	$NaHCO_3$	5,13	4,55	0,58	0,0149
			Na_2CO_3	4,08	4,55	-0,48	-0,0228
			NaOH	3,78	2,43	1,35	0,0709

		1.5	$NaHCO_3$	4,00	4,55	-0,55	-0,0142
			Na_2CO_3	4,78	4,55	0,22	0,0108
			NaOH	3,88	2,43	1,45	0,0761
		2	$NaHCO_3$	4,35	4,55	-0,20	-0,0052
			Na_2CO_3	4,30	4,55	-0,25	-0,0120
			NaOH	3,93	2,43	1,50	0,0788
	500	1	$NaHCO_3$	3,88	4,80	-0,93	-0,0239
			Na_2CO_3	3,53	4,33	-0,81	-0,0387
			NaOH	3,53	1,70	1,83	0,0958
		1.5	$NaHCO_3$	4,10	4,80	-0,70	-0,0181
			Na_2CO_3	3,88	4,33	-0,46	-0,0220
			NaOH	3,95	1,70	2,25	0,1181
		2	$NaHCO_3$	4,68	4,80	-0,12	-0,0032
			Na_2CO_3	5,28	4,33	0,94	0,0451
			NaOH	4,40	1,70	2,70	0,1418
	600	1	$NaHCO_3$	5,00	4,80	0,20	0,0052
			Na_2CO_3	4,68	4,33	0,34	0,0164
			NaOH	4,75	1,70	3,05	0,1601
		1.5	$NaHCO_3$	4,20	4,80	-0,60	-0,0155
			Na_2CO_3	4,27	4,33	-0,07	-0,0032
			NaOH	3,47	1,70	1,77	0,0928
		2	$NaHCO_3$	4,57	4,80	-0,23	-0,0060
			Na_2CO_3	4,30	4,33	-0,03	-0,0016
			NaOH	3,30	1,70	1,60	0,0840

Tabla AIX.4. Titulación Boehm para determinar los grupos funcionales del a escala piloto en el horno Nichols

	Temperatura (ºC)	**Tiempo (h)**	**Solución**	**Gasto con muestra (ml)**	**Gasto de blancos (ml)**	**Diferencia muestra/blanco**	**mol H^+/g CA**
Tenera	λ= 0,9	3	$NaHCO_3$	2,97	3,37	-0,40	-0,0103
			Na_2CO_3	2,63	2,50	0,13	0,0064
			NaOH	2,27	1,63	0,64	0,0337
	λ= 1,1	3	$NaHCO_3$	2,23	3,37	-1,13	-0,0293
			Na_2CO_3	2,23	2,50	-0,27	-0,0128
			NaOH	1,90	1,63	0,28	0,0144
Dura	λ= 0,9	3	$NaHCO_3$	2,80	3,37	-0,57	-0,0147
			Na_2CO_3	3,03	2,50	0,53	0,0256
			NaOH	2,50	1,63	0,88	0,0459
	λ= 1,1	3	$NaHCO_3$	4,67	3,37	1,30	0,0336
			Na_2CO_3	2,07	2,50	-0,43	-0,0208
			NaOH	1,73	1,63	0,11	0,0057

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 de los tipos de cuesco de palmiste

	Tiempo (s)	Carbón fijo (%)	x	dx	dt	dx/dt	1-x
Tenera	0	15,20	0,0000	0,5455	1800	3,030E-04	1,0000
	1800	42,20	0,5455	0,1677	1800	9,315E-05	0,4545
	3600	50,50	0,7131	0,0808	1800	4,489E-05	0,2869
	5400	54,50	0,7939	0,0485	1800	2,694E-05	0,2061
	7200	56,90	0,8424	0,0646	1800	3,591E-05	0,1576
	9000	60,10	0,9071	0,0929	1800	5,163E-05	0,0929
	10800	64,70	1,0000				
Dura	0	15,70	0,0000	0,7750	1800	4,3058E-04	1,0000
	1800	56,70	0,7750	0,0870	1800	4,8309E-05	0,2250
	3600	61,30	0,8620	0,0019	1800	1,0502E-06	0,1380
	5400	61,40	0,8639	0,0548	1800	3,0456E-05	0,1361
	7200	64,30	0,9187	0,0378	1800	2,1004E-05	0,0813
	9000	66,30	0,9565	0,0435	1800	2,4155E-05	0,0435
	10800	68,60	1,0000				

ANEXO XI
DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

Dimensionamiento del horno rotatorio

a) Ángulo de reposo del cuesco de palmiste

Se determinó el ángulo de reposo de los tipos de cuesco de palmiste. La Tabla AXI.1 muestra los datos obtenidos para la determinación del ángulo de reposo de los tipos de cuesco de palmiste. A partir de la Tabla AXI.1 se construyó la Figura AXI.1 en donde se señala el ángulo de reposo para cada tipo de cuesco de palmiste.

Tabla AXI.1. Datos obtenidos para la determinación del ángulo de reposo de los tipos de cuesco de palmiste

Muestra	Ancho (cm)	Altura (cm)	Ángulo de reposo θ (º)
Tenera	2	1,3	33,02
Dura	2,8	2	35,54

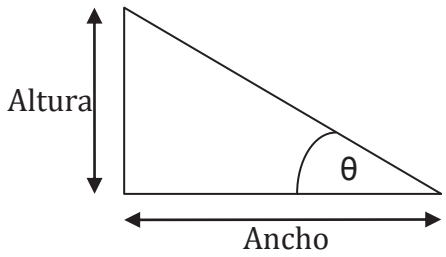


Figura AXI.1. Gráfico para la determinación del ángulo de reposo de los tipos de cuesco de palmiste

b) Cálculo de la Longitud y Diámetro interno del horno giratorio

Para el cálculo de la longitud y el diámetro del horno se tomará en cuenta tan solo los datos del cuesco de palmiste tipo Dura, ya que estos datos son representativos también del cuesco de palmiste tipo Tenera. Con la ecuación AXI.1 se obtendrá el tiempo de residencia en el horno giratorio.

$$t = 1{,}77\frac{L * F * \overline{\theta}}{D_i * \beta * \omega} \qquad AXI.1$$

$D_i = 1m$

$L = D_i * 6 = 6m$

$\beta = 2^{o}$

$\omega = 1\ RPM$

$\theta = 35{,}54^{o}$

$F = 2$

$$t = 1{,}77\frac{6 * 2 * \overline{35{,}54}}{1 * 2 * 1}$$

$t = 63{,}31\ min$

c) Cálculo de los flujos de entrada y salida al horno rotatorio

Flujo de entrada

$$\frac{100\ 000\ kg\ materia\ prima}{mes} * \frac{1\ mes}{15\ días} * \frac{1\ día}{24\ h} * \frac{4\ horas}{1\ ciclo}$$
$$= 1111{,}11\ \frac{kg\ materia\ prima}{ciclo} = 277{,}78\ \frac{kg\ materia\ prima}{h}$$

Flujo de salida

$$\frac{20\ 000\ kg\ carbón\ activado}{mes} * \frac{1\ mes}{30\ días} * \frac{1\ día}{8\ h} * \frac{4\ horas}{1\ ciclo}$$
$$= 333{,}33\frac{kg\ carbón\ activado}{ciclo} = 83{,}33\ \frac{kg\ carbón\ activado}{h}$$

d) Cálculo del número de Froude

$$Fr = \frac{\omega^2 R_i}{g} \qquad AXI.2$$

$\omega = 1\ RPM = 0{,}1047\ rad/s$

$R_i = 0{,}5\ m$

$g = 9{,}8\ m/s^2$

$$Fr = \frac{0{,}1047^2 * 0{,}5}{9{,}8}$$

$$Fr = 0{,}00055$$

e) Cálculo del combustible necesario para obtener la temperatura requerida

Se determinó la entalpía de reacción para la activación del cuesco de palmiste. Se estableció que la cantidad de carbón presente en la muestra es el porcentaje de carbón fijo, para esto se considera la muestras de carbón activado del cuesco tipo Dura debido que este posee mayor cantidad de carbón fijo que el carbón activado a partir del cuesco tipo Tenera, estos porcentajes se encuentran en la Tabla AIII.5. Los cálculos se presentan a continuación:

$$\frac{100\ t\ cuesco}{mes} * \frac{12{,}23\ t\ carbón}{100\ t\ cuesco} * \frac{1 \times 10^6 g}{1\ t} * \frac{58\ g\ C}{100\ g\ carbón} * \frac{1\ mol\ C}{12\ g\ C} * \frac{1\ mes}{15\ días} * \frac{1\ día}{24\ h} * -\frac{21{,}55\ kcal}{1\ mol\ C} = -35\ 384{,}90 \frac{kcal}{h}$$

La Tabla AXI.2 señala los calores de formación estándar del GLP, cuya composición es 40 % butano y 60 % propano.

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

Elemento	Entalpía (kJ/gmol)
C_3H_8	-104,7
C_4H_{10}	-127,1
CO_2	-393,51
H_2O	-285,83
CO	-110,35

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.

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

Reacción	Entalpía (kJ/gmol)
$C_3H_8 + 4\ O_2 \rightarrow H_2 + CO + 2CO_2 + 3H_2O$	-1 650,16
$2C_4H_{10} + 11\ O_2 \rightarrow 2H_2 + 2CO + 6CO_2 + 8H_2O$	-4 614,20
GLP	-1 912,94

Se tomó en cuenta una eficiencia del horno del 70 % debido a la moderada temperatura con la que se trabaja.

$$Q_P = Q_G$$

$$-35\ 384{,}90\frac{kcal}{h} = -1912{,}94\ \frac{kJ}{gmol} * \frac{1\ gmol}{49{,}6\ g} * \frac{1000\ g}{1\ kg} * \frac{1\ kcal}{4{,}18\ kJ} * m * 0{,}7$$

$$m = 5{,}48\frac{kg}{h}$$

f) Cálculo del aire necesario para producir carbón activado a partir de cuesco de palmiste

Para los siguientes cálculos se considera la atmósfera reductora ya que a pesar de que se obtuvieron resultados de carbón activado ligeramente superiores que las obtenidas en la atmósfera oxidante, en la atmósfera reductora se tendrá menor consumo de combustible y menor generación de cenizas.

$$n_{GLP} = 5{,}48\frac{kg}{h} * \frac{1000\ g}{1\ kg} * \frac{1\ mol}{49{,}6\ g}$$

$$n_{GLP} = 110{,}48\frac{mol\ GLP}{h}$$

$$60\%\ Propano\ \rightarrow 66{,}29\frac{mol\ C_3H_8}{h}$$

$$40\%\ Butano\ \rightarrow\ 44{,}19\frac{mol\ C_4H_{10}}{h}$$

$$66{,}29\frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{4\ mol\ O_2}{1\ mol\ C_3H_8} = 265{,}16\frac{mol\ O_2}{h}$$

$$44{,}19\frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{11\ mol\ O_2}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 243{,}06\frac{mol\ O_2}{h}$$

$$508{,}23\frac{mol\ O_2}{h} * \frac{100\ mol\ Aire}{21\ mol\ O_2} * \frac{28{,}96\ g\ Aire}{1\ mol\ Aire} * \frac{1\ kg}{1000\ g} = 70{,}09\frac{kg\ Aire}{h}$$

g) Cálculo de λ

Como la atmósfera tiene que ser reductora (λ < 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.3 para el propano y ecuación AXI.4 para el butano.

$$C_3H_8 + 5\ O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O \qquad AXI.3$$

$$2C_4H_{10} + 13\ O_2 \rightarrow 8CO_2 + 10H_2O \qquad AXI.4$$

$$66{,}29\frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{5\ mol\ O_2}{1\ mol\ C_3H_8} = 331{,}45\frac{mol\ O_2}{h}$$

$$44{,}19\frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{13\ mol\ O_2}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 287{,}26\frac{mol\ O_2}{h}$$

$$\lambda = \frac{n_{O_2}Entrada}{n_{O_2}Estequiométrico}$$

$$\lambda = \frac{n_{O_2}Entrada}{n_{O_2}Estequiométrico} = \frac{508{,}23\ \frac{mol\ O_2}{h}}{618{,}71\ \frac{mol\ O_2}{h}} = 0{,}86$$

h) Cálculo de la composición de los gases de salida

1) Monóxido de carbono (CO)

$$66{,}29\frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{1\ mol\ CO}{1\ mol\ C_3H_8} = 66{,}29\frac{mol\ CO}{h}$$

$$44{,}19\frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{2\ mol\ CO}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 44{,}19\frac{mol\ CO}{h}$$

$$n_{CO\ Total} = 110{,}48\frac{mol\ CO}{h} * \frac{28\ g\ CO}{1\ mol\ CO} * \frac{1\ kg}{1000\ g} = 3{,}09\frac{kg\ CO}{h}$$

2) Dióxido de carbono (CO_2)

$$66{,}29\frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{2\ mol\ CO_2}{1\ mol\ C_3H_8} = 132{,}58\frac{mol\ CO_2}{h}$$

$$44{,}19\frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{6\ mol\ CO_2}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 132{,}57\frac{mol\ CO_2}{h}$$

$$n_{CO_2\ Total} = 265{,}15\frac{mol\ CO_2}{h} * \frac{44\ g\ CO_2}{1\ mol\ CO_2} * \frac{1\ kg}{1000\ g} = 11{,}67\frac{kg\ CO_2}{h}$$

3) Gas hidrógeno (H_2)

$$66{,}29\frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{1\ mol\ H_2}{1\ mol\ C_3H_8} = 66{,}29\frac{mol\ H_2}{h}$$

$$44{,}19\frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{2\ mol\ H_2}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 44{,}19\frac{mol\ H_2}{h}$$

$$n_{H_2\ Total} = 110{,}48\frac{mol\ H_2}{h} * \frac{2\ g\ H_2}{1\ mol\ H_2} * \frac{1\ kg}{1000\ g} = 0{,}22\frac{kg\ H_2}{h}$$

4) Vapor de agua (H_2O)

$$66{,}29\frac{mol\ C_3O_8}{h} * \frac{3\ mol\ H_2O}{1\ mol\ C_3H_8} = 198{,}87\frac{mol\ H_2O}{h}$$

$$44{,}19\frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{8\ mol\ H_2O}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 176{,}76\frac{mol\ H_2O}{h}$$

$$n_{H_2O\ Total} = 375{,}63\frac{mol\ H_2O}{h} * \frac{18\ g\ H_2O}{1\ mol\ H_2O} * \frac{1\ kg}{1000\ g} = 6{,}76\frac{kg\ H_2O}{h}$$

5) Nitrógeno

$$508{,}23\frac{mol\ O_2}{h} * \frac{79\ mol\ N_2}{21\ mol\ O_2} * \frac{28\ g\ N_2}{1\ mol\ N_2} * \frac{1\ kg}{1000\ g} = 53{,}53\frac{kg\ N_2}{h}$$

Dimensionamiento de equipos de reducción de tamaño y clasificación para el cuesco de palmiste

La Figura AXI.2 muestra el diagrama del proceso de reducción de tamaño y clasificación del cuesco de palmiste.

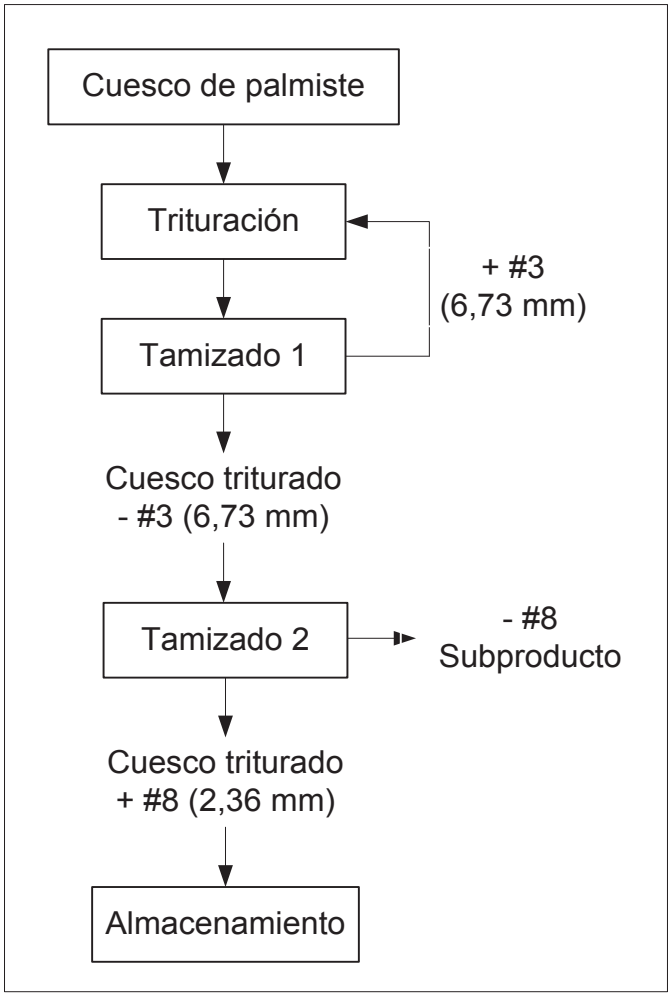


Figura AXI.2. Diagrama de bloques del proceso de reducción y clasificación

a) Reducción de tamaño

Para la reducción de tamaño se eligió el equipo mostrado en la tabla 3.30. Se calculó la energía por tonelada. Se asumió que la máquina opera las 8 h de la jornada de trabajo.

$$\frac{8\,h}{día} * \frac{0,3\,t}{h} = 2,4\frac{t}{día}$$

Además se calculó el consumo energético

$$1{,}325\ kW * \frac{h}{0{,}4\ t} = 3{,}313\ \frac{kWh}{t}$$

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:

$$2{,}4 \frac{t}{día} * \frac{1\ día}{8\ h} = 0{,}3 \frac{t}{h}$$

De ahí que los datos para el diseño del primer grizzly son:

- Alimentación = 0,3 t/h
- Abertura = # 3 = 6,73 mm

La constante de tamizado para esta abertura es:

$$C = 78{,}577\ \frac{t}{m^2 h}$$

El área necesaria es:

$$A = \frac{a}{C} \qquad AXI.5$$

$$A = \frac{0{,}3 \frac{t}{h}}{78{,}577\ \frac{t}{m^2 h} * \frac{m^2}{100^2 cm^2}} = 38{,}179\ cm^2$$

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 = 0,24 t/h
- Abertura = # 8 = 2,36 mm

La constante de tamizado para esta abertura es:

$$C = 24{,}865\ \frac{t}{m^2 h}$$

Y tenemos un área de:

$$A = \frac{0{,}24\frac{t}{h}}{24{,}865\ \frac{t}{m^2 h} * \frac{m^2}{100^2 cm^2}} = 96{,}521\ cm^2$$

c) Diseño de la Pila Stock

El número de días que se desea que la planta trabaje sin alimentación son 2 cubriendo las 24 horas de trabajo del horno rotatorio al cual esta pila va a almacenar. Por lo tanto, la cantidad de material que se va a almacenar en la pila stock es:

$$\frac{278\ kg\ cuesco}{h} * \frac{24\ h}{1\ día} * \frac{1\ t}{1000\ kg} = 6{,}67\frac{t}{día} \approx 7\frac{t}{día}$$

$$m_{stock} = 7\frac{t}{día} * 2\ días = 14\ t$$

$$V_{stock} = 14\ t * \frac{100^3 g}{1\ t} * \frac{cm^3}{2\ g} * \frac{m^3}{100^3\ cm^3} = 7\ m^3$$

La Figura AXI.2 muestra el esquema de la pila stock

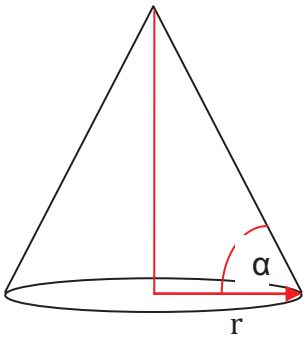


Figura AXI.3. Diagrama de la pila stock

Como se puede observar en la Figura AXI.3 se va a diseñar una pila stock con forma de cono. Por lo tanto, su volumen viene dado por la ecuación AXI.1:

$$V_{stock} = \frac{1}{3}\pi\, r^2 h \qquad AXI.6$$

El ángulo de reposo, se encuentra en la Tabla 3.26. Por lo tanto, la relación entre el radio de la base y la altura del cono está dada por la ecuación AXI.7:

$$\tan\ \alpha\ = \frac{h}{r} \qquad AXI.7$$

$$V_{stock} = \frac{1}{3}\pi\, r^2\ r\ \tan\ \alpha$$

$$7\ m^3 = \frac{1}{3}\pi\, r^3 \tan\ 35{,}54$$

$$r = 2{,}11\ m$$

$$h = 1{,}51\ m$$

Dimensionamiento de equipos de reducción de tamaño y clasificación para el carbón activado de cuesco de palmiste producido

a) Reducción de tamaño

Para la reducción de tamaño se eligió el equipo mostrado en la Tabla 3.30. Se calculó la energía por tonelada corta. Se asumió que la máquina opera las 8 h de la jornada de trabajo.

$$\frac{8\ h}{día} * \frac{0{,}08\ t}{h} = 0{,}66 \frac{t}{día}$$

Además se calculó el consumo energético

$$75\ kW * \frac{h}{0{,}08\ t} = 937{,}5\ \frac{kWh}{t}$$

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:

$$0{,}66\ \frac{t}{día} * \frac{1\ día}{8\ h} = 0{,}08 \frac{t}{h}$$

De ahí que los datos para el diseño del primer grizzly son:

- Alimentación = 0,08 t/h
- Abertura = # 6 = 3,35 mm

La constante de tamizado para esta abertura es:

$$C = 27{,}248\ \frac{t}{m^2 h}$$

El área necesaria es:

$$A = \frac{a}{C} \qquad AXI.8$$

$$A = \frac{0{,}08 \frac{t}{h}}{27{,}248\ \frac{t}{m^2 h} * \frac{m^2}{100^2 cm^2}} = 29{,}36\ cm^2$$

Para la segunda clasificación se consideró que el 80 % del primer tamizado va al segundo y que de este solo 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 = 0,05 t/h
- Abertura = # 12 = 1,70 mm

La constante de tamizado para esta abertura es:

$$C = 23{,}276 \frac{t}{m^2 h}$$

Y tenemos un área de:

$$A = \frac{0{,}05 \frac{t}{h}}{23{,}276\ \frac{t}{m^2 h} * \frac{100^2 m^2}{cm^2}} = 21{,}481\ cm^2$$

Dimensionamiento del reactor

Masa de cuesco de palmiste que ingresa al reactor:

$$m_{Cuesco} = 278\ \frac{kg}{h} = 6666{,}72\ \frac{kg}{día}$$

La densidad del cuesco de palmiste es 1,25 g/ml:

$$6666{,}72\ \frac{kg}{día} * \frac{1000\ g}{1\ kg} * \frac{1\ ml}{1{,}25\ g} * \frac{1\ L}{1000\ ml} = 5333{,}38\ \frac{L}{día} = 222{,}22\ \frac{L}{h}$$

El volumen de mezcla reaccionante es 5333,38 L/día.
Cada día tiene 6 ciclos de reacción.

$$5333{,}38\ \frac{L}{día} * \frac{1\ día}{6\ ciclos} = 888{,}89\ \frac{L}{ciclo} = 234{,}82\ \frac{gal}{ciclo}$$

El volumen del reactor es 234,82 gal
Relación L/D=1 en base al volumen del reactor circular, tenemos:

$$V = V_{tanque} - V_{tapas}$$

$$234{,}82\ gal = \frac{\pi}{4} * D^3 - 0{,}416 * D^3$$

$$D = 8{,}6\ ft = 2{,}62\ m$$

$$L_C = D$$

$$L_C = 2{,}62\ m$$

Calor de reacción para el cuesco de palmiste:

$$\Delta H_{Rx} = -\frac{21{,}55\ kcal}{1\ mol\ carbón} = -\frac{1795{,}83\ kcal}{kg\ carbón}$$

En esta reacción exotérmica se tiene 6 ciclos con 4 horas de reacción cada uno, entonces en un día existen 24 horas de reacción:

$$Q = \frac{-\frac{1795{,}83\ kcal}{kg\ carbón}}{24\ h} = -74{,}83\frac{kcal}{kg\ h}$$

$$-74{,}83\frac{kcal}{kg\ h} * 6666{,}72\ kg\ Cuesco = -498\ 870{,}66\ \frac{kcal}{h}$$

Masa de vapor de agua necesaria para que la solución llegue a 150ºC:

$$m_{vapor} = -\frac{Q}{C_p * \Delta T}$$

$$m_{vapor} = -\frac{-498\ 870{,}66\ \frac{kcal}{h}}{1\frac{kcal}{kg\ °C} * 125°C}$$

$$m_{vapor} = 3\ 897{,}43\ \frac{kg}{h}$$

Área de transferencia:

$$\Delta T_1 = 100 - 25 = 75$$
$$\Delta T_2 = 150 - 30 = 120$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\ \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

$$LMTD = \frac{75 - 120}{ln\ \frac{75}{120}} = 95{,}74°C$$

$$A = \frac{Q}{U * LMTD}$$

$$A = \frac{498\ 870{,}66\ \frac{kcal}{h}}{200\frac{kcal}{h\ m^2\ ºC} * 95{,}74\ °C} = 26{,}05\ m^2$$

Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de la solución de Cloruro de Zinc

El tanque será construido para un abastecimiento diario. Para este tanque se estableció que la mejor forma es un cilindro vertical con una altura de 2 m, como se muestra en la Figura AXI.4.

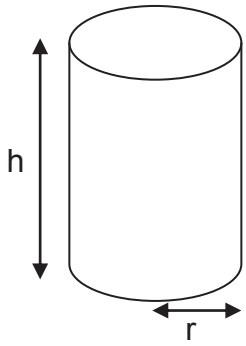


Figura AXI.4. Diagrama del tanque de reserva de la solución de cloruro de zinc

El volumen diario que se utilizará de la solución activante será:

$$1112\ \frac{kg_{cuesco}}{ciclo} * \frac{1000\ g}{1\ kg} * \frac{2\ ml_{solución}}{g_{cuesco}} * \frac{1\ L}{1000\ ml} * \frac{1\ m^3}{1000\ L} * \frac{1\ ciclo}{4\ h} * \frac{24\ h}{1\ día}$$
$$= 13{,}33\ \frac{m^3}{día} = 1616\frac{kg}{h}$$

Para el dimensionamiento del tanque de reserva de la solución de cloruro de zinc se estableció que fuera un cilindro vertical. Los cálculos se muestran a continuación:

$$V = \pi * r^2 * h$$
$$13{,}33\ m^3 = \pi * r^2 * h$$
$$h = 2\ m$$
$$r = 1{,}5\ m$$

Dimensionamiento del tanque de lavado para el carbón activado

El tanque para el lavado del carbón activado será dimensionado para un ciclo, ya que el proceso tanto en el reactor como posteriormente en el horno rotatorio es de un ciclo (4 horas) cada uno.

Para este tanque se estableció que la mejor forma es un cilindro vertical con una altura de 1 m, como se muestra en la Figura AXI.5.

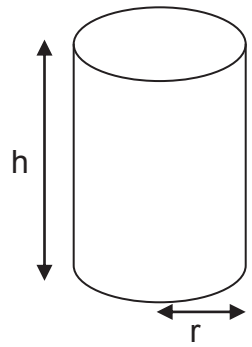


Figura AXI.5. Diagrama del tanque de lavado para el carbón activado

$$332\ \frac{kg\ carbón\ activado}{ciclo} * \frac{1000\ g}{1\ kg} * \frac{cm^3}{1{,}256\ g\ carbón\ activado} * \frac{1\ L}{1000\ cm^3} * \frac{1\ m^3}{1000\ L}$$
$$= 0{,}26\ \frac{m^3\ carbón\ activado}{ciclo} = 0{,}066\ \frac{m^3\ carbón\ activado}{h}$$

Para el dimensionamiento del tanque de lavado para el carbón activado se estableció que fuera un cilindro vertical. Los cálculos se muestran a continuación:

$$V = \pi * r^2 * h$$
$$0{,}26\ m^3 = \pi * r^2 * h$$
$$h = 1\ m$$
$$r = 0{,}30\ m$$

Calor de reacción para el cuesco de palmiste:

$$\Delta H_{Rx} = -\frac{21{,}55\ kcal}{1\ mol\ carbón} = -\frac{1795{,}83\ kcal}{kg\ carbón}$$

Esta reacción exotérmica se tardara 1 hora por cada ciclo en el horno rotatorio:

$$Q = \frac{-\frac{1795{,}83\ kcal}{kg\ carbón}}{1\ h} = -1795{,}83\frac{kcal}{kg\ h}$$

$$-1795{,}83\ \frac{kcal}{kg\ h} * 1992\ kg\ Carbón\ activado = -3\ 577\ 293{,}36\ \frac{kcal}{h}$$

Masa de vapor de agua necesaria para llegar a 100ºC:

$$m_{vapor} = -\frac{Q}{C_p * \Delta T}$$

$$m_{vapor} = -\frac{-3\ 577\ 293{,}36\ \frac{kcal}{h}}{1\frac{kcal}{kg\ ºC} * 75ºC}$$

$$m_{vapor} = 47\ 697{,}24\ \frac{kg}{h}$$

Área de transferencia:

$$\Delta T_1 = 100 - 25 = 75$$
$$\Delta T_2 = 100 - 30 = 70$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\ \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

$$LMTD = \frac{75 - 70}{ln\ \frac{75}{70}} = 72{,}47ºC$$

$$A = \frac{Q}{U * LMTD}$$

$$A = \frac{3\ 577\ 293{,}36\ \frac{kcal}{h}}{200\frac{kcal}{h\ m^2\ ºC} * 72{,}47\ ºC} = 246{,}81\ m^2$$

Dimensionamiento de la cámara de enfriamiento

Se asumió que el agua de salida es de 90 ºC. También se asumió que la eficiencia debido a la gran transferencia de calor es del 80 %. A partir de la ecuación AXI.9 se calculó el flujo de agua necesario.

$$Q_p = -Q_g * \varepsilon \qquad AXI.9$$

$$Q_p = m_{carbón} * Cp$$

$$Q_p = -83 \frac{kg\ carbón\ activado}{h} * 2000 \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_p = -166\ 000 \frac{kcal}{h}$$

$$Q_g = m_{H_2O} * Cp * \Delta T$$

$$Q_g = \ m_{H_2O} * 1 \frac{kcal}{kg\ °C} * \ 100 - 25\ °C\ * 0{,}8$$

$$Q_g = m_{H_2O} * 60 \frac{kcal}{kg}$$

$$166\ 000 \frac{kcal}{h} = m_{H_2O} * 60 \frac{kcal}{kg}$$

$$m_{H_2O} = 2\ 766{,}67 \frac{kg}{h}$$

Una vez que se obtuvo el flujo de vapor se calculó el área necesaria para el intercambiador a partir de la ecuación AXI.10.

$$Q_p = U * A * LMTD \qquad AXI.10$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\ \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

$$LMTD = \frac{410 - 75}{ln\ \frac{410}{75}}$$

$$LMDT = 197{,}21ºC$$

$$193\ 058\ W = 10 \frac{W}{m^2\ ºC} * A * 197{,}21ºC$$

$$A = 97{,}89\ m^2$$

$$A = 2\ \pi\ R\ L$$

$$97{,}89\ m^2 = 2 * \pi * R * 6m$$

$$R = 2{,}60\ m$$

Cámara de secado para el carbón activado

Los datos técnicos para el diseño de la cámara de secado, se asumen según las necesidades requeridas, además se considerara datos bibliográficos de la madera como material semejante al cuesco de palmiste. Por lo tanto se tienen los siguientes datos con los que se realizaron a los cálculos de diseño.

Datos del cuesco de palmiste:

- Volumen del cuesco: 0,53 m^3/día
- Contenido de humedad inicial: 80%
- Contenido humedad final: 10%

Datos de la cámara de secado:

- Volumen para secado: 0,53 m^3
- Volumen interior: 15,63 m^3
- Dimensiones interiores: Ancho: 2,5 m
  Alto: 2,5 m
  Largo: 2,5 m
- T_o máxima de operación: 80ºC
- T_o ambiente: 10ºC
- Medio de calentamiento: Vapor saturado del 98% a 10 bar

Requerimientos térmicos de la cámara de secado

Para determinar la energía térmica necesaria para el proceso de secado del cuesco de palmiste, es necesario identificar y calcular los requerimientos térmicos. Para esto se calcularán los siguientes requerimientos:

a) Calor necesario para elevar la temperatura de la carga desde temperatura ambiente hasta temperatura de operación (q_1)

Es el calor que necesita para elevar la temperatura del cuesco de palmiste, desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación. Para que el cuesco

de palmiste pierda humedad, primero esta debe ser calentada perdiendo el agua libre que posee y luego perderá el agua ligada. Para el cálculo se establece que: (William T. Simpson, 1991)

$$q_1 = V_c * \rho_c * H_i * C_{ch} * \Delta T \qquad AXI.11$$

Donde:

V_c: Volumen de cuesco de palmiste a secar

ρ_c: Densidad del carbón de cuesco de palmiste

H_i: Humedad inicial del cuesco de palmiste

ΔT: Diferencia de temperatura, desde la ambiental hasta la de operación

C_{ch}: Calor específico del cuesco de palmiste húmedo

$V_c = 0{,}53\ m^3$

$\rho_c = 1{,}25\ \frac{g}{cm^3} = 1250\ \frac{kg}{m^3}$

$H_i = 80\%$

$\Delta T = 70ºC$

$$C_{ch} = \frac{H + C_{co}}{1 + H} + A \qquad AXI.12$$

Dónde:

C_{co}: Calor específico de la madera seca

A : Valor para la madera, al 10% de humedad, oscila entre 0,02 a 29ºC y 0,04 a 60ºC, para una madera con 30% de humedad, oscila entre 0,04 a 29ºC, y 0,09 a 60ºC. (Koch, 1972)

$$C_{co} = 0{,}2651 + 0{,}001004\ T \qquad AXI.13$$

$C_{ch} = 1{,}032\ \frac{kcal}{kg\ ºC}$

$$q_1 = 38\ 287{,}2\ kcal$$

b) Calor necesario para elevar la temperatura del aire en el interior de la cámara desde temperatura ambiente hasta temperatura de operación (q_2)

Al igual que en el cálculo anterior, se debe elevar la temperatura de otro elemento, que es el aire que se encuentra en el interior de la cámara de secado, y para ello disponemos de los datos de volumen, densidad, calor especifico y la variación de temperatura. Por lo tanto el cálculo se expresa de la siguiente manera: (William T. Simpson, 1991)

$$q_2 = V_{aire} * \rho_{aire} * C_{aire} * \Delta T \qquad AXI.14$$

Donde:
V_{aire}: Volumen de aire interior de la cámara de secado
ρ_{aire}: Densidad del aire
C_{aire}: Calor especifico del aire

Para determinar el volumen de aire de la cámara de secado, se debe restar el volumen interior de la cámara de secado ($V_{cámara}$) con el volumen del cuesco de palmiste (V_c), por lo tanto tenemos los siguientes datos:

$V_{aire} = 15{,}1\ m^3$
$\rho_{aire} = 1{,}2048\ \frac{kg}{m^3}$
$C_{aire} = 0{,}24 \frac{kcal}{kg\ ºC}$
$\Delta T = 70ºC$

$$q_2 = 305{,}63\ kcal$$

c) Calor necesario para evaporar el agua del carbón de cuesco de palmiste (q_3)

Es el calor que se necesita para poder evaporar el agua del carbón de cuesco de

palmiste desde un contenido de humedad inicial hasta el que se desee. Por lo tanto el cuesco de palmiste será secado desde una humedad de 80% hasta una humedad final de 10%. Por lo tanto se tiene que: (William T. Simpson, 1991)

$$q_3 = T_a * V_c * \rho_c * \frac{H_i - H_f}{T_b} \; CLV \qquad AXI.15$$

Donde:

T_a: Tiempo inicial de calentamiento de la cámara de secado

T_b: Tiempo de operación de la cámara de secado

CLV: Calor latente de evaporización de la madera

H_i: Humedad inicial del cuesco de palmiste

H_f: Humedad final del cuesco de palmiste

$T_a = 5\ h$

$T_b = 240\ h$

$CVL = 550\ \frac{kcal}{kg}$

$V_c = 0{,}53\ m^3$

$\rho_c = 1{,}25\ \frac{g}{cm^3} = 1250 \frac{kg}{m^3}$

$H_i = 80\%$

$H_f = 10\%$

$$q_3 = 5\ 313{,}80\ kcal$$

Masa de vapor de agua necesaria para llegar a 80ºC:

$$m_{vapor} = \frac{Q}{C_p * \Delta T}$$

$$m_{vapor} = \frac{5\ 313{,}80\ \frac{kcal}{h}}{1 \frac{kcal}{kg\ °C} * 55°C}$$

$$m_{vapor} = 96{,}61\ \frac{kg}{h}$$

d) Total calculo térmico fase de calentamiento

Teniendo cada uno de los factores que implican la fase de calentamiento de la cámara de secado, se determina el consumo total.

$$q_a = \quad q_{1\rightarrow 3} \qquad AXI.16$$

$$q_a = 43\ 906{,}63\ kcal$$

Se adiciona un factor de seguridad de 15%, debido a posibles pérdidas del sistema.

$$q_a = 10\ 098{,}52\ \frac{kcal}{h}$$

Dimensionamiento del caldero

a) Cálculo del flujo de vapor requerido

$$m_{vapor} = m_{vapor\ reactor} + m_{vapor\ tanque\ lavado} + m_{vapor\ cámara\ de\ secado}$$

$$m_{vapor\ reactor} = 3\ 897{,}43\ \frac{kg}{h}$$

$$m_{vapor\ tanque\ lavado} = 47\ 697{,}24\ \frac{kg}{h}$$

$$m_{vapor\ cámara\ de\ secado} = 96{,}61\ \frac{kg}{h}$$

$$m_{vapor} = 51\ 691{,}28\ \frac{kg}{h}$$

La Tabla AXI.4 señala las condiciones del caldero, estos valores se basan en la puesta en planta en la provincia de Esmeraldas, la misma que se encuentra a nivel del mar.

Tabla AXI.4. Condiciones iniciales del caldero

	Valor	**Unidades**
Vapor requerido	51 691,28	kg/h
Presión de operación	10	bar
Calidad del vapor	98	%
Temperatura vapor sobrecalentado	200	ºC
Temperatura de agua precalentada	90	ºC
Temperatura aire precalentado	100	ºC
Temperatura ambiente	25	ºC
Temperatura permisible gases de chimenea	125	ºC
Presión atmosférica	760	mmHg
Exceso de aire a la entrada	20	%

La Tabla AXI.5 señala las pérdidas que posee cada parte del caldero.

Tabla AXI.5. Pérdidas en los equipos

	Porcentaje de pérdida
Caldero	8
Sobrecalentador	8
Economizador	10
Pre calentador de aire	10

La Figura AXI.6 muestra el diagrama de los procesos en el caldero. La Tabla AXI.6 indica la composición química del Diésel que será útil para los cálculos posteriores.

Tabla AXI.6. Composición del diésel II

	Porcentaje
Carbón	87,3
Oxígeno	0,04
Hidrógeno	12,6
Nitrógeno	0,006
Azufre	0,22
Cenizas	< 0,01

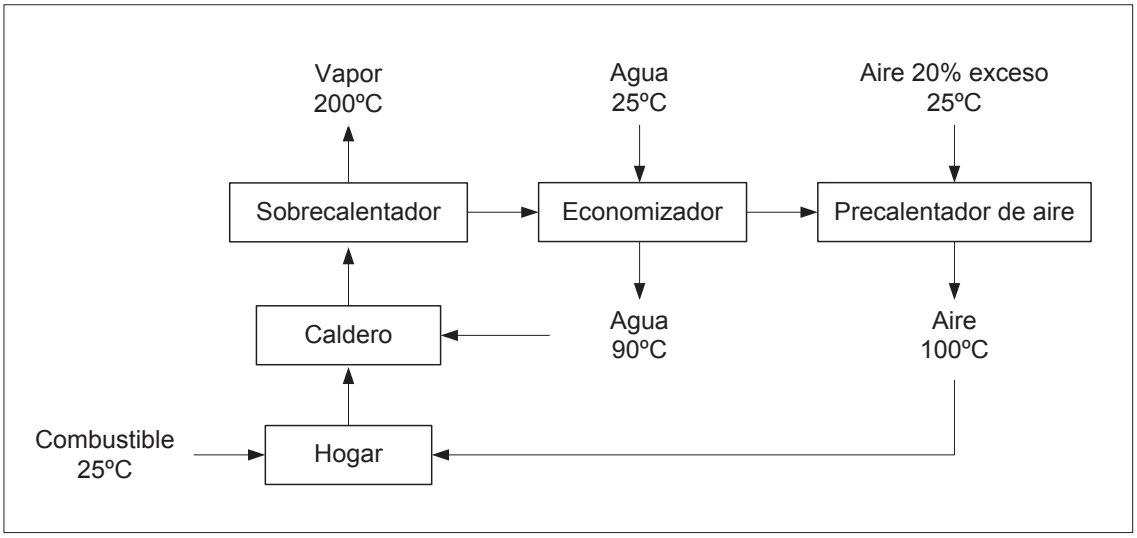


Figura AXI.6. Diagrama de bloques del caldero

b) Balance energético de los diferentes componentes del caldero

1) Caldero

$$P_{operación} = P_{caldero} + P_{Atm}$$

$$P_{ATM} = 760\ mmHg = 1{,}01\ bar$$

$$P_{operación} = 11\ bar \quad T_{operación} = 184{,}09\ ºC$$

$$\Delta H = H_{vapor\ 98\%} - H_{agua\ 90ºC}$$

$$H_{vapor\ 98\%} = X * H_v + H_l * \ 1 - X$$

$$H_{vapor\ 98\%} = 0{,}98 * 2\ 781{,}7 \frac{kJ}{kg} + 781{,}34 \frac{kJ}{kg} * \ 1 - 0{,}98$$

$$H_{vapor\ 98\%} = 2\ 741{,}69\ \frac{kJ}{kg}$$

$$H_{agua\ 90ºC} = 376{,}92\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta H = 2\ 741{,}69 - 376{,}92 = 2\ 364{,}77\ \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{caldero} = m_{vapor} * \Delta H$$

$$Q_{caldero} = 51\ 691{,}28\ \frac{kg}{h} * 2\ 364{,}77\ \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{caldero} = 122\ 237\ 988{,}2\ \frac{kJ}{h}$$

$$Q_{real\ caldero} = \frac{Q_{caldero}}{\varepsilon}$$

$$Q_{real\ caldero} = \frac{122\ 237\ 988{,}2\ \frac{kJ}{h}}{0{,}92}$$

$$Q_{real\ caldero} = 132\ 867\ 378{,}5\ \frac{kJ}{h}$$

2) *Sobrecalentador*

$$\Delta H = H_{vapor\ 200ºC} - H_{vapor\ 98\%}$$

$$\Delta H = 2\ 793{,}5\ \frac{kJ}{kg} - 2\ 741{,}69\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta H = 51{,}81\ \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{útil} = m_{vapor} * \Delta H$$

$$Q_{útil} = 51\ 691{,}28\ \frac{kg}{h} * 51{,}81\ \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{útil} = 2\ 678\ 125{,}22\ \frac{kJ}{h}$$

$$Q_{real} = \frac{Q_{útil}}{\varepsilon}$$

$$Q_{real} = \frac{2\ 678\ 125{,}22\ \frac{kJ}{h}}{0{,}92}$$

$$Q_{real} = 2\ 911\ 005{,}67\ \frac{kJ}{h}$$

3) Economizador

$$\Delta H = H_{l\ 90ºC} - H_{l\ 25ºC}$$

$$\Delta H = 376{,}92\ \frac{kJ}{kg} - 104{,}89\ \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta H = 272{,}03\ \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{útil} = m_{vapor} * \Delta H$$

$$Q_{útil} = \ 51\ 691{,}28 - 2766{,}67\ \ \frac{kg}{h} * 272{,}03 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{útil} = 13\ 308\ 961{,}66\ \frac{kJ}{h}$$

$$Q_{real} = \frac{Q_{útil}}{\varepsilon}$$

$$Q_{real} = \frac{13\ 308\ 961{,}66\ \frac{kJ}{h}}{0{,}8}$$

$$Q_{real} = 16\ 636\ 202{,}07\ \frac{kJ}{h}$$

4) Para el Precalentador de aire

$$\Delta H = H_{aire\ 100ºC} - H_{25ºC}$$

$$\Delta H = m * Cp * \Delta T$$

$$\Delta H = m * 1{,}0079\ \frac{kJ}{kg\ ºC} *\ \ 100 - 25\ \ ºC$$

$$\Delta H = m * 75{,}59 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta H_{real} = \frac{\Delta H}{\varepsilon}$$

$$\Delta H_{real} = \frac{m * 75{,}59 \frac{kJ}{kg}}{0{,}9}$$

$$\Delta H_{real} = m * 83{,}99 \frac{kJ}{kg}$$

5) *Cálculo del aire real*

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$
$$2\,H + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$$
$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$
$$N + O_2 \rightarrow NO_2$$

$$87{,}3\ kg\ C * \frac{1\ kmol\ C}{12\ kg\ C} * \frac{1\ kmol\ O_2}{1\ kmol\ C} * \frac{32\ kg\ O_2}{1\ kmol\ O_2} = 232{,}8\ kg\ O_2$$

$$12{,}6\ kg\ H * \frac{1\ kmol\ H}{1\ kg\ H} * \frac{\frac{1}{2}\ kmol\ O_2}{2\ kmol\ H} * \frac{32\ kg\ O_2}{1\ kmol\ O_2} = 100{,}8\ kg\ O_2$$

$$0{,}22\ kg\ S * \frac{1\ kmol\ S}{32\ kg\ S} * \frac{1\ kmol\ O_2}{1\ kmol\ S} * \frac{32\ kg\ O_2}{1\ kmol\ O_2} = 0{,}22\ kg\ O_2$$

$$0{,}006\ kg\ N * \frac{1\ kmol\ N}{14\ kg\ N} * \frac{1\ kmol\ O_2}{1\ kmol\ C} * \frac{32\ kg\ O_2}{1\ kmol\ O_2} = 0{,}014\ kg\ O_2$$

$$\frac{333{,}83\ kg\ O_2}{100\ kg\ combustible} = 3{,}34\ \frac{kg\ O_2}{kg\ combustible}$$

6) *Aire teórico*

$$3{,}34\ kg\ O_2 * \frac{1\ kmol\ O_2}{32\ kg\ O_2} * \frac{100\ kmol\ aire}{21\ kmol\ O_2} * \frac{28{,}96\ kg\ aire}{1\ kmol\ aire} = 14{,}39\ kg\ aire$$

7) *Aire real = 20 % exceso*

$$W_a = 14{,}39\ kg\ aire * 1{,}20 = 17{,}27\ \frac{kg\ aire}{kg\ combustible}$$

$$W_a = W_a * W_c$$

Para el Precalentador:

$$Q_{total} = 83{,}99 * 17{,}27$$
$$Q_{total} = 1\,450{,}51 * W_c$$

8) Calor total del sistema (Q_1)

$$Q_1 = 132\,867\,378{,}5\frac{kJ}{h} + 2\,911\,005{,}67\ \frac{kJ}{h} + 16\,636\,202{,}07\ \frac{kJ}{h} + 1\,450{,}51 * W_c$$
$$Q_1 = 152\,414\,586{,}2\ \frac{kJ}{h} + 1\,450{,}51 * W_c$$

9) Cálculo de Q_2

$$Q_2 = W_g * \Delta H_{gases}$$
$$\Delta H_{gases} = \Delta H_{gases}\ Tc, Tr\ - \Delta H_{gases}\ Tgs, Tr$$

$$\Delta H_{gases}\ Tgs, Tr\ = Cp_{gases}\ Tgs, Tr$$
$$\Delta H_{gases}\ Tc, Tr\ = \frac{PC * R_H}{W_g}$$
$$W_g = W_g * W_c$$
$$R_H = 95\%$$

$$PC = 84\%C + 290\ \ \%H - \frac{\%O}{8}\ + 25\%S - 6\%H_2O$$
$$PC = 84 * 87{,}3 + 290\ \ 12{,}6 - \frac{0{,}04}{8}\ + 25 * 0{,}22$$
$$PC = 10\,991{,}25\ \frac{kcal}{kg\ combustible} = 46\,018{,}17\ \frac{kJ}{kg\ combustible}$$

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_2O	9,91
SO_2	0,011
NO_2	0,001
O_2	3,30
N_2	75,31

$$\frac{87{,}3\ kg\ C}{100\ kg} * \frac{1\ kmol\ C}{12\ kg\ C} * \frac{1\ kmol\ CO_2}{1\ kmol\ C} * \frac{44\ kg\ CO_2}{1\ kmol\ CO_2} = 0{,}073\ kmol\ CO_2 = 3{,}20\ kg\ CO_2$$

$$\frac{12{,}6\ kg\ H}{100\ kg} * \frac{1\ kmol\ H}{1\ kg\ H} * \frac{1\ kmol\ H_2O}{2\ kmol\ H} * \frac{18\ kg\ H_2O}{1\ kmol\ H_2O} = 0{,}063\ kmol\ H_2O = 1{,}13\ kg\ H_2O$$

$$\frac{0{,}22\ kg\ S}{100\ kg} * \frac{1\ kmol\ S}{32\ kg\ S} * \frac{1\ kmol\ SO_2}{1\ kmol\ S} * \frac{64\ kg\ SO_2}{1\ kmol\ SO_2} = 6{,}88 \times 10^{-5}\ kmol\ SO_2$$
$$= 4{,}40 \times 10^{-3}\ kg\ SO_2$$

$$\frac{0{,}006\ kg\ N}{100\ kg} * \frac{1\ kmol\ N}{14\ kg\ N} * \frac{1\ kmol\ NO_2}{1\ kmol\ N} * \frac{46\ kg\ NO_2}{1\ kmol\ NO_2} = 4{,}29 \times 10^{-6}\ kmol\ NO_2$$
$$= 1{,}97 \times 10^{-4}\ kg\ NO_2$$

$$\frac{17{,}27\ kg\ aire\ real}{kg\ combustible} - \frac{14{,}39\ kg\ aire\ teórico}{kg\ combustible} * \frac{0{,}23\ kg\ O_2}{1\ kg\ aire} * \frac{1\ kmol\ O_2}{32\ kg\ O_2}$$
$$= 0{,}021\ kmol\ O_2 = 0{,}66\ kg\ O_2$$

$$\frac{17{,}27\ kg\ aire\ real}{kg\ combustible} * \frac{0{,}77\ kg\ N_2}{1\ kg\ aire} * \frac{1\ kmol\ N_2}{28\ kg\ N_2} = 0{,}48\ kmol\ N_2 = 13{,}30\ kg\ N_2$$

$$TOTAL = 0{,}64\ kmol = 18{,}30\ kg\ gases = W_g$$

$$Cp = \quad X_i Cp_i \ = 1{,}087\ \frac{kJ}{kg\ ºC}$$

$$\Delta H_{gases}\ Tc, Tr\ = \frac{46\ 018{,}17\ \frac{kJ}{kg\ combustible}\ * 0{,}95}{18{,}30\ \frac{kg\ gas}{kg\ combustible}}$$

$$\Delta H_{gases}\ Tc, Tr\ = 2\ 388{,}92\ \frac{kJ}{kg\ gas}$$

$$\Delta H_{gases}\ Tgs, Tr\ = 1{,}087\ \frac{kJ}{kg\ ºC} *\ 125 - 100\ ºC$$

$$\Delta H_{gases}\ Tgs, Tr\ = 27{,}18\ \frac{kJ}{kg\ gas}$$

$$\Delta H_{gases} = 2\ 361{,}74\ \frac{kJ}{kg\ gas}$$

$$Q_2 = W_g * \Delta H_{gases}$$

$$Q_2 = 18{,}30 \frac{kJ}{kg\ combustible} * W_c * 2\ 361{,}74 \frac{kJ}{kg\ gas}$$

$$Q_2 = 43\ 219{,}84 \frac{kJ}{kg\ combustible} * W_c$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$43\ 219{,}84 \frac{kJ}{kg\ combustible} * W_c = 1\ 208\ 359\ 076\ \frac{kJ}{h} + 1\ 450{,}51 * W_c$$

$$W_c = 28\ 929{,}34\ \frac{kg}{día}$$

10) Temperatura de Combustión

$$\Delta H_{gases} = \frac{PC * R_H}{W_g} - Cp_{gases}\ Tgs - Tr$$

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 AXI.7.

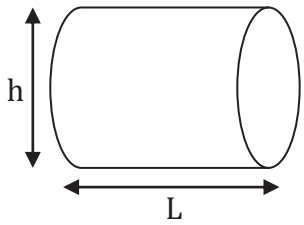


Figura AXI.7. Diagrama del tanque de reserva de GLP

Para el diseño del tanque de GLP se partió de la ecuación de los gases a las condiciones de Esmeraldas.

$$PV = nRT$$

$$V = \frac{R * 298ºC * 28\,379{,}03\ mol}{100\ atm}$$

$$V = 2{,}13\ m^3$$

$$V * f = L\ \ r^2 cos^{-1}\ \ 1 - \frac{h}{r}\ \ +\ \ h + r\ \ \ \overline{h\ \ 2r - h}$$

$$3m^3 = L\ \ r^2 cos^{-1}\ \ 1 - \frac{h}{r}\ \ +\ \ h + r\ \ \ \overline{h\ \ 2r - h}$$

$$L = 2\ m^3$$

Para el dimensionamiento del tanque de combustible se estableció que fuera un cilindro vertical. Los cálculos se muestran a continuación:

$$V * f = \pi * r^2 * h$$

$$1{,}4\ m^3 = \pi * r^2 * h$$

$$h = 1{,}6\ m$$

$$r = 0{,}53\ m$$

Dimensionamiento de la cámara de post combustión

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

$$504{,}03\ \frac{mol\ H_2}{h} * \frac{1\ mol\ O_2}{2\ mol\ H_2} = 252{,}02\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$504{,}03\ \frac{mol\ CO}{h} * \frac{1\ mol\ O_2}{2\ mol\ CO} = 252{,}02\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$504{,}03\ \frac{mol\ GLP}{h} * \frac{49{,}6\ g}{mol\ GLP} * \frac{1\ kg}{1000\ g} = 25{,}20\ \frac{kg}{h} \rightarrow \begin{array}{l} 30{,}24\ \frac{mol\ C_3H_8}{h} \\ 20{,}16\ \frac{mol\ C_4H_{10}}{h} \end{array}$$

$$30{,}24\ \frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{4\ mol\ O_2}{1\ mol\ C_3H_8} = 120{,}97\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$20{,}16\ \frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{11\ mol\ O_2}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 110{,}89\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$n_{O_2}TOTAL = 735{,}88\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

b) Flujo de aire que ingresa

$$n_{o_2}Ingresa = n_{o_2}TOTAL * 1{,}20 = 883{,}06\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$883{,}06\ \frac{mol\ O_2}{h} * \frac{100\ mol\ aire}{21\ mol\ O_2} * \frac{28{,}96\ g\ aire}{1\ mol\ aire} = 121{,}78\ \frac{kg\ aire}{h}$$

c) Composición final de los gases de salida

Dióxido de carbono (CO_2)

$$30{,}24\ \frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{2\ mol\ CO_2}{1\ mol\ C_3H_8} = 60{,}48\ \frac{mol\ CO_2}{h}$$

$$20{,}16\ \frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{6\ mol\ CO_2}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 60{,}48\ \frac{mol\ CO_2}{h}$$

$$n_{CO_2}TOTAL = 120{,}97\ \frac{mol\ CO_2}{h} = 5{,}32\frac{kg\ CO_2}{h}$$

Vapor de agua (H_2O)

$$30{,}24\ \frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{3\ mol\ H_2O}{1\ mol\ C_3H_8} = 90{,}73\ \frac{mol\ H_2O}{h}$$

$$20{,}16\ \frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{8\ mol\ H_2}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 80{,}64\ \frac{mol\ H_2}{h}$$

$$n_{H_2O}TOTAL = 171{,}37\ \frac{mol\ H_2O}{h} = 3{,}09\frac{kg\ H_2O}{h}$$

Oxígeno (O_2)

$$n_{O_2}No\ Rx = n_{O_2}Ingresa - n_{O_2}Rx$$

$$n_{O_2}No\ Rx = 883{,}06 - 735{,}88 = 147{,}18\ \frac{mol\ O_2}{h} = 4{,}71\ \frac{kg\ O_2}{h}$$

Nitrógeno (N_2)

$$n_{O_2}Ingresa = n_{O_2}Total * 1{,}20 = 883{,}06\frac{mol\ O_2}{h}$$

$$883{,}06\frac{mol\ O_2}{h} * \frac{79\ mol\ N_2}{21\ mol\ O_2} = 3\ 321{,}99\ \frac{mol\ N_2}{h} = 93{,}02\ \frac{kg\ N_2}{h}$$

d) Oxígeno necesario

$$504{,}03\frac{mol\ H_2}{h} * \frac{1\ mol\ O_2}{2\ mol\ H_2} = 252{,}02\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$504{,}03\frac{mol\ CO}{h} * \frac{1\ mol\ O_2}{2\ mol\ CO} = 252{,}02\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$504{,}03\ \frac{mol\ GLP}{h} * \frac{49{,}6\ g}{mol\ GLP} * \frac{1\ kg}{1000\ g} = 25{,}20\ \frac{kg}{h} \rightarrow \begin{array}{l} 30{,}24\ \frac{mol\ C_3H_8}{h} \\ 20{,}16\ \frac{mol\ C_4H_{10}}{h} \end{array}$$

$$30{,}24\ \frac{mol\ C_3H_8}{h} * \frac{4\ mol\ O_2}{1\ mol\ C_3H_8} = 120{,}97\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$20{,}16\ \frac{mol\ C_4H_{10}}{h} * \frac{11\ mol\ O_2}{2\ mol\ C_4H_{10}} = 110{,}89\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$n_{O_2}TOTAL = 735{,}88\ \frac{mol\ O_2}{h}$$

Dimensionamiento del lavador de gases de combustión

A partir de las Tabla 3.28 y de las capacidades calóricas se construyó la Tabla AXI.8. A partir de la Tabla AXI.8 se estableció el flujo de agua necesaria, por medio de un balance de energía.

$$Q_e = Q_s$$

$$95\ 006{,}10\ \frac{kcal}{h} = m * 1\frac{kcal}{kg\ ºC} *\ \ 90 - 25\ \ ºC$$

$$m = 1\ 461{,}63\ \frac{kg}{h}$$

Tabla AXI.8. Balance de energía de los gases de salida

Gas	Flujo (kg/h)	Cp (Kcal/kg ºC)	Calor (Kcal/h)
CO_2	58,55	0,27	12 015,08
H_2O	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