

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

**DISEÑO DE REACTOR, PRODUCCIÓN Y
CARACTERIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO DE
CÁSCARAS DE NUEZ PARA USO EN SEPARACIÓN
DE CIANUROS METÁLICOS.**

Hernán Cancino Riquelme

Profesores Guías:
María Victoria García de Pablo
Carlos Carlesi Jara

2011

*A mi madre.
Sin su amor y apoyo incondicional
este momento no habría llegado,
ni yo sería la persona que soy.*

Resumen

El trabajo aquí presentado consiste en el diseño y puesta en marcha de un reactor a escala de laboratorio en donde realizar las reacciones de pirólisis y activación térmica de carbón, empleando como precursor cáscaras de nueces, y luego caracterizar y determinar la capacidad de separación selectiva del producto de cianuros de oro y cobre en columnas de adsorción empacadas.

El proceso seleccionado es la activación térmica empleando vapor de agua como agente activante, por lo que el reactor se diseñó en acero inoxidable, el vapor se generó en una caldera eléctrica y la temperatura necesaria para las reacciones se obtuvo a partir del calor generado por resistencias eléctricas.

Con el equipo diseñado se activó carbón durante 45 minutos a 550°C en ambiente saturado de vapor de agua a presión de 40 psi, mientras que la etapa de pirólisis se llevó a cabo con anterioridad a 300°C durante 30 minutos.

Al producto final se le realizó la prueba de número de azul de metileno, resultando ser de 190 mg/l de azul de metileno adsorbidos por gramo de carbón, prueba de índice de yodo de acuerdo a la norma ASTM D4607, el cual resultó ser de 539 mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón, y finalmente pruebas de adsorción de soluciones cianuradas de oro y cobre, para determinar su selectividad por el oro, resultando una adsorción de cianuro de oro superior a 175 ppm en 100 ml de solución por gramo de carbón, demostrando su selectividad al contrastarlo con la adsorción de menos de 3 ppm de cianuro de cobre en 100 ml por gramo de carbón, por lo tanto, el carbón obtenido es apto para la aplicación de separación de estos iones, y por ende resultará útil en el campo de minería de oro.

Índice Temático

Capítulo 1. Introducción y Fundamentos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Principales procesos de activación del carbón	3
1.3.1 Activación Térmica	4
1.3.2 Activación Química	6
1.4 Clasificación y características del carbón activado	8
1.5 Adsorción	11
1.5.1 Isotermas de adsorción	11
1.6 Precedentes en diseño de reactores de activación de carbón	13
1.7 Conclusiones	16
1.8 Bibliografía	17
Capítulo 2. Análisis de Mercado	19
2.1 Alcances	19
2.2 Análisis de la Demanda	20
2.3 Análisis de la Oferta	24
2.4 Análisis de Precios	27
2.5 Análisis de Materia Prima	29
2.6 Conclusiones	34
2.7 Bibliografía	35
Capítulo 3. Diseño del Reactor	36
3.1 Introducción	36
3.2 Pasos iniciales en el diseño de un reactor continuo	37
3.3 Diseño del Reactor Batch	39
3.3.1 Introducción	40
3.3.2 Diseño Operativo	41
3.3.3 Diseño Mecánico	46
3.4 Montaje y Puesta en Marcha	52
3.4.1 Montaje del sistema calefactor	54
3.4.2 Montaje del piping	58
3.4.3 Puesta en Marcha del Reactor	59
3.4.4 Puesta en Marcha del Evaporador	60
3.5 Conclusiones	62
3.6 Bibliografía	63
Capítulo 4. Trabajo experimental	64
4.1 Introducción	64
4.2 Modificaciones a las instalaciones de producción de carbón activado	65
4.2.1 Modificaciones eléctricas en el sistema calefactor y LOU	65
4.2.2 Modificaciones a la conexión de vapor	67

4.2.3 Nuevas mantenciones y modificaciones al evaporador.....	69
4.3 Producción de carbón activado.....	72
4.3.1 Molienda y tamizado.....	73
4.3.2 Experiencia 1. Sólo pirólisis.....	74
4.3.3 Experiencia 2: Intento de activación a partir de carbón sin emplear convección....	75
4.3.4 Experiencia 3: Activación a 400°C a partir de cáscaras de nueces, empleando convección, sin aislamiento térmico completo.....	78
4.3.5 Experiencia 4: Activación a 550°C a partir de cáscaras de nueces, empleando convección, con aislamiento térmico completo.....	80
4.4 Manual empírico de operación de la caldera eléctrica y del reactor.....	83
4.4.1 Operación de la caldera eléctrica.....	83
4.4.2 Operación del Reactor.....	86
4.5 Pruebas de Índice de Azul de Metileno.....	92
4.5.1 Descripción de la prueba.....	92
4.5.2 Materiales y reactivos necesarios.....	93
4.5.3 Procedimiento.....	93
4.5.4 Resultados.....	95
4.6 Pruebas de Número de Yodo: Norma ASTM D4607.....	102
4.6.1 Descripción de la prueba.....	102
4.6.2 Materiales y reactivos necesarios.....	103
4.6.3 Procedimiento.....	104
4.6.4 Resultados.....	109
4.7 Pruebas de adsorción de oro y cobre.....	112
4.7.1 Descripción de la prueba.....	112
4.7.2 Materiales y Reactivos necesarios.....	113
4.7.3 Procedimiento.....	113
4.7.4 Resultados.....	116
4.8 Conclusiones.....	122
4.9 Bibliografía.....	124
Capítulo 5. Evaluación Económica.....	127
5.1 Introducción.....	127
5.2 Inversión Total.....	127
5.2.1 Capital Fijo.....	127
5.2.2 Capital de Trabajo.....	131
5.2.3 Costos de Puesta en Marcha.....	132
5.2.4 Inversión Total.....	132
5.3 Beneficio Actual.....	133
5.3.1 Costo Total del Producto.....	133
5.3.2 Ganancias Totales por Venta.....	139
5.4 Flujo de Caja.....	140
5.4.1 Cálculo del VAN.....	142
5.4.2 Cálculo del TIR.....	143
5.5 Análisis de Sensibilidad.....	144
5.5.1 Variación del Precio de compra de las cáscaras de nueces.....	144
5.5.2 Variación del Precio de venta del Carbón Activado.....	147
5.5.3 Variación del Volumen de Producción de carbón activado.....	150

5.6 Postulación a la Incubadora de Proyectos PUCV, <i>Chrysalis</i>	153
5.6.1 Idea presentada	153
5.6.2 Formulario entregado.....	154
5.6.3 Resultados.....	154
5.7 Capital total de inversión real	155
5.8 Conclusiones.....	157
5.9 Bibliografía	158
Capítulo 6. Conclusiones	159
Apéndice A. Diseño del Reactor	162
A.1 Diseño del tornillo sinfín para un reactor continuo	162
A.2 Diseño Mecánico del Reactor Batch.....	169
A.3 Balances de Energía y diseño de sistema calefactor.....	174
A.4 Bibliografía	185
Apéndice B. Evaluación Económica	187
B.1 Estimación de Costo de equipos principales e instrumentación	187
B.2 Determinación del Capital Total de Inversión	188
B.3 Determinación del Beneficio Actual y Flujo de Caja	190
Anexo A. Formulario entregado a la Incubadora de Proyectos PUCV, <i>Chrysalis</i>	193
Anexo B. Carta de retiro presentada en <i>Chrysalis</i>	201
Anexo C. Cotización del reactor	202

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1: Etapas del proceso de activación física del carbón.	5
Figura 1.2: Etapas del proceso de activación química del carbón.	7
Figura 1.3: Distribución de poros en el carbón activado.	10

Capítulo 2

Figura 2.1: Caja de carbón activado Tetratec.	28
Figura 2.2: Caja de Azoo Carbón Súper Activado.	29

Capítulo 3

Figura 3.1: Esquema del tornillo alimentador.	38
Figura 3.2: Plano 1.....	49
Figura 3.3: Plano 2.....	50
Figura 3.4: Plano 3.....	51
Figura 3.5: Cuerpos calefactores situados a ambos lados del reactor.....	56
Figura 3.6: Cuerpos calefactores montados.....	56
Figura 3.7: Sistema controlador de temperatura.....	57
Figura 3.8: Sistema de cañería de cobre montado.	59

Capítulo 4

Figura 4.1: Cañerías de conexión de vapor.....	68
Figura 4.2: Reactor aislado completamente.....	80
Figura 4.3: Caldera eléctrica.....	84
Figura 4.4: Árbol de platos cargado de cáscaras.	87
Figura 4.5: Reactor cargado de cáscaras de nueces (vista superior).....	87
Figura 4.6: Válvulas a operar en proceso de convección forzada.	90
Figura 4.7: Soluciones empleadas en curva de calibración.	94
Figura 4.8: Soluciones finales luego de efectuar pruebas de azul de metileno.	100
Figura 4.9: Soluciones residuales de yodo luego de las pruebas.	111
Figura 4.10: Columna de adsorción y sistema de goteo montados.....	115

Apéndice A

Figura. A.1: Esquema de ambos tipos de tornillos alimentadores.	165
Figura. A.2: Disposición propuesta de las resistencias calefactoras en el circuito.....	182

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1: Importaciones de carbón activado en dólares.	20
Tabla 2.2: Importaciones de carbón activado en kilogramos netos.	21
Tabla 2.3: Clasificación de las principales empresas importadoras de carbón activado por rubro.	23
Tabla 2.4: Exportaciones de carbón activado desde Chile en dólares.	25
Tabla 2.5: Exportaciones de carbón activado desde Chile en kilogramos netos.	26
Tabla 2.6: Precios de importación de carbón activado al 2007.	27
Tabla 2.7: Exportaciones de nueces sin cáscaras.	31
Tabla 2.8: Participación de empresas en exportaciones.	32
Tabla 2.9: Producción de CA si hipotéticamente se utilizaran todas las cáscaras producidas.	33

Capítulo 3

Tabla 3.1: Datos de diseño y operativos del reactor.	46
---	----

Capítulo 4

Tabla 4.1: Intensidad de corriente admisible para conductores.	66
Tabla 4.2: Color del acero a diferentes temperaturas.	77
Tabla 4.3: Valores registrados en la curva de calibración de azul de metileno.	96
Tabla 4.4: Valores registrados en ensayos de Azul de Metileno.	99
Tabla 4.5: Resultados calculados en ensayos de Azul de Metileno.	99
Tabla 4.6: Valores obtenidos en ensayo de número de yodo.	110
Tabla 4.7: Valores registrados para las pruebas con cianuro de cobre.	116
Tabla 4.8: Resultados obtenidos para las pruebas con cianuro de cobre.	117
Tabla 4.9: Valores registrados para las pruebas con cianuro de cobre.	119
Tabla 4.10: Resultados obtenidos para las pruebas con cianuro de cobre.	119
Tabla 4.11: Valores registrados para las pruebas con cianuro de oro.	120
Tabla 4.12: Resultados obtenidos para las pruebas con cianuro de oro.	121

Capítulo 5

Tabla 5.1: Costo de los equipos.	128
Tabla 5.2: Costo de la instrumentación del reactor.	129
Tabla 5.3: Costos de inversión en capital fijo directo.	130
Tabla 5.4: Costos considerados para el capital fijo indirecto.	131
Tabla 5.5: Ítems considerados en el costo directo de producción.	135
Tabla 5.6: Ítems considerados en los costos indirectos de producción.	137
Tabla 5.7: Ítems considerados en los gastos generales de empresa.	139
Tabla 5.8: Flujo de caja para una vida de 5 años.	141
Tabla 5.9: Variación de los indicadores económicos según precio de cáscaras de nueces. ...	145
Tabla 5.10: Variación de los indicadores económicos según precio de venta del carbón activado.	148
Tabla 5.11. Variación de los indicadores según volumen de producción.	151
Tabla 5.12. Costo total de inversión del proyecto.	156

Apéndice A

Tabla. A.1: Características de las cáscaras de coco molidas.	162
Tabla. A.2: Código de clasificación de materiales.	163
Tabla. A.3: Selección de tornillo alimentador.	164
Tabla. A.4: Datos del tornillo alimentador tipo B.	164
Tabla. A.5: Largo equivalente del tornillo alimentador.	166
Tabla. A.6: Factor de diámetro.	168
Tabla. A.7: Factor de eficiencia.	168
Tabla. A.8: Velocidad de vapor recomendada en cañerías.	172
Tabla. B.1: Índices de escalamiento por capacidad para reactores..	187

Índice de Gráficos

Capítulo 2

Gráfico 2.1: Importaciones de carbón activado.	21
Gráfico 2.2: Exportaciones de carbón activado desde Chile.	26
Gráfico 2.3: Exportaciones de nueces sin cáscaras.....	31

Capítulo 4

Gráfico 4.1: Temperaturas registradas.....	74
Gráfico 4.2: Temperaturas registradas.....	76
Gráfico 4.3: Temperaturas registradas.....	78
Gráfico 4.4: Temperaturas registradas.....	81
Gráfico 4.5: Curva de barrido para azul de metileno.....	95
Gráfico 4.6: Curva de calibración de azul de metileno.....	96
Gráfico 4.7: Curva de calibración y ajuste mediante mínimos cuadrados.....	97
Gráfico 4.8: Regresiones lineales de los valores extremos de la curva de calibración.....	98
Gráfico 4.9: Isoterma de adsorción de yodo.....	110
Gráfico 4.10: Adsorción de cobre respecto a concentraciones residuales.....	117
Gráfico 4.11: Isoterma de Freundlich para adsorción de cianuro de cobre.....	120

Capítulo 5

Gráfico 5.1: Variación del TIR respecto al precio de las cáscaras de nueces.....	146
Gráfico 5.2: Variación del VAN respecto al precio de las cáscaras de nueces.	146
Gráfico 5.3: Variación del TIR respecto al precio de venta del carbón activo.....	149
Gráfico 5.4: Variación del VAN respecto al precio de venta del carbón activo.....	149
Gráfico 5.5. Variación del TIR respecto al volumen de producción de carbón activo.....	152
Gráfico 5.6. Variación del VAN respecto al volumen de producción de carbón activo.	152

Apéndice A

Gráfico. A.1: Gráfica de obtención del factor de sobrecarga, Fo.	167
---	-----

Capítulo 1. Introducción y Fundamentos

1.1 Introducción

Carbón activado se define como un material de carbón no cristalino, cuya porosidad ha sido aumentada al someterlo a reacción con gases oxidantes (como CO₂ o aire), con vapor de agua, o bien a un tratamiento con adición de productos químicos como ácido fosfórico, durante o después de un proceso de carbonización.¹

Posee una capacidad de adsorción elevada, por lo que se utiliza para la filtración de líquidos y gases en procesos de purificación, decoloración, desodorización, entre muchos otros.

Mediante el control adecuado de los procesos de carbonización y activación se puede obtener una gran variedad de carbones activados que posean diferentes distribuciones de tamaño de poros, lo cual dependerá de las aplicaciones a las cuales estarán destinados.

El interés por este tipo de material se basa en algunas de sus propiedades, tales como:

- a) Estabilidad térmica.
- b) Resistencia al ataque ácido.
- c) Carácter esencialmente hidrófobo.
- d) Bajo costo relativo.
- e) Estructura porosa.

Es por ello que en los últimos años la cantidad de investigaciones relacionadas a su producción y aplicaciones ha aumentado notablemente.²

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general del presente Proyecto de Título es diseñar, fabricar y poner en marcha un reactor a escala de laboratorio con el cual realizar la reacción de pirólisis de cáscaras de nueces y posteriormente la reacción de activación térmica controlada del carbón de cáscaras generado mediante vapor de agua.

Además de lo anterior, el proyecto contempla la determinación de la capacidad adsorbente del carbón activado producido. Con dicho fin se utilizarán dos pruebas de laboratorio, las cuales son las pruebas de Índice de Azul de Metileno y Número de Yodo: Norma ASTM D4607, además de comprobar la selectividad de adsorción de oro sobre cobre, con motivo de posibles aplicaciones futuras en la separación de estos dos iones.

Finalmente, por medio de esta etapa experimental de montaje y caracterización, se contempla realizar un análisis de prefactibilidad económica de la producción de carbón activado orientado al mercado de la minería de oro.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Confeccionar el diseño operativo y el diseño mecánico del reactor de activación térmica, incluido el ploteo de los planos técnicos.
A partir de dichos planos, cotizar mano de obra y dar orden de construcción y compra del equipo.
2. Diagnosticar posibles problemas eléctricos o mecánicos del generador de vapor eléctrico perteneciente a la Escuela de Ingeniería Química. Encargar o realizar las reparaciones necesarias y poner en marcha dicho equipo.

3. Adecuar el reactor construido con un sistema de calefacción eléctrico y control de temperatura.

Conectar una línea de vapor entre el generador de vapor y el reactor construido.

4. Poner en marcha el proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de nueces vía activación térmica.

Producir carbón activado y realizar las pruebas de capacidad adsorbente de Índice de Azul de Metileno, Número de Yodo: Norma ASTM D4607 y realizar pruebas de adsorción en columnas para cianuro de cobre y cianuro de oro.

5. Confeccionar el análisis económico del mercado del carbón activado, a nivel nacional e internacional.

Realizar un análisis de la oferta y la demanda, así como un análisis de precios del producto final y disponibilidad de materia prima, para luego analizar la prefactibilidad económica del proyecto.

1.3 Principales procesos de activación del carbón

La activación del carbón es la generación de partículas altamente porosas con una enorme superficie de contacto en el interior de los gránulos o polvos de carbón, que le otorgan a éste un alto poder de adsorción.³

Existen dos tecnologías básicas para lograr la activación del carbón: activación térmica (o física) y activación química.

1.3.1 Activación Térmica

Llamada también activación física, a pesar de que la activación se produce por la reacción química del agente activante (un oxidante como aire, vapor de agua, CO₂, etc.) con el carbono del material que está siendo activado.¹

Este tipo de activación consta de dos etapas básicas: pirólisis y activación. No obstante, a veces son necesarios ciertos pretratamientos como la molienda y el tamizado para obtener un tamaño adecuado del precursor. Si el precursor es un carbón coquizable será necesario entonces una etapa de oxidación para eliminar las propiedades coquizables. En otras ocasiones el material de partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. De esta forma se consigue una mejor difusión del agente activante y por tanto una mejor porosidad en el carbón activado resultante.

En la pirólisis, el precursor es sometido a elevadas temperaturas (del orden de los 800 °C, dependiendo del precursor) en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación. Durante esta etapa, la salida de los gases y vapores del precursor aumenta la porosidad en el carbonizado, la cual se desarrolla aun más durante la etapa de activación.¹

El proceso completo se esquematiza en la figura 1.1.

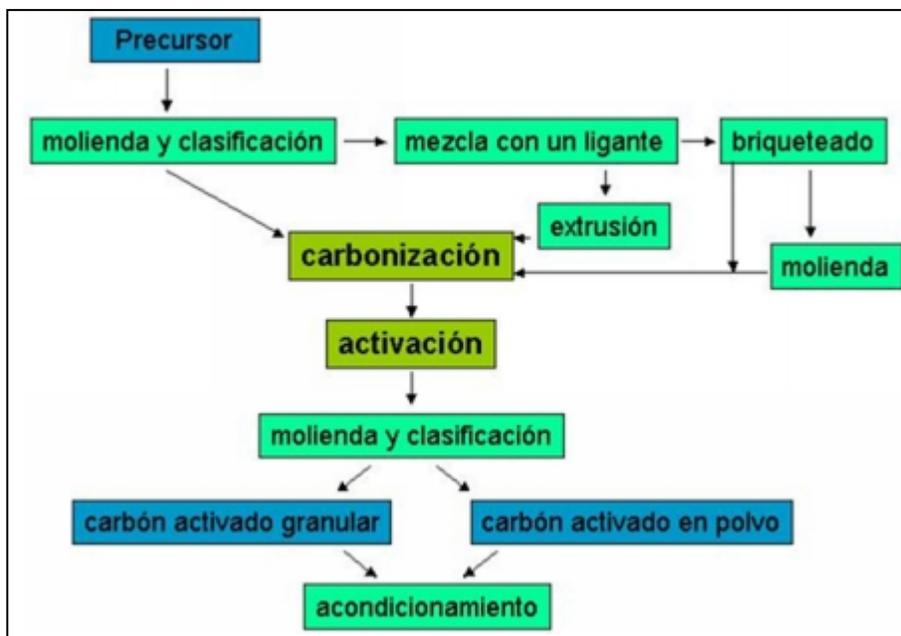
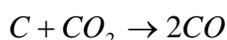
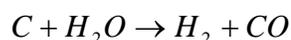
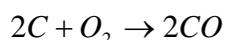
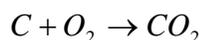


Figura 1.1: Etapas del proceso de activación física del carbón. ¹

Los agentes activantes que se suelen usar son oxígeno (raramente a escala industrial), aire, vapor de agua (el más usado) y CO₂. Estos agentes dan lugar a las siguientes reacciones químicas que eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad: ¹



El carbón activado (abreviado CA) puede fabricarse a partir de todo tipo de material carbonoso, o bien, a partir de cualquier carbón mineral no grafitico. Sin embargo, cada materia prima brindará características y calidades distintas al producto. ⁴

Cuando se parte de un material orgánico, tal como madera, cáscara de coco, u otro, el proceso se inicia con su carbonización, la cuál debe realizarse a una baja temperatura (entre 300 a 600°C) en la que no se favorezca la grafitización. Si se parte de carbón mineral, es obvio que no se requiere la carbonización. Sin embargo, en el caso de los carbones minerales suele ser

necesario un lavado previo para extraer contaminantes como azufre y metales pesados, que típicamente se encuentran en los yacimientos.

El carbón resultante se somete a temperaturas cercanas a los 1000°C, en una atmósfera inerte, usualmente saturada con vapor de agua. En estas condiciones, y a lo largo de un cierto tiempo, algunos átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de CO₂, y otros se recombinan y condensan en forma de placas grafiticas.

El CA sale del horno al rojo vivo, por lo que debe enfriarse antes de entrar en contacto con el aire a temperatura ambiente, de lo contrario, una parte de éste desaparecería como CO₂ y el producto resultaría con una cantidad muy grande de óxidos superficiales, que podrían afectarlo negativamente. Para lograr este enfriamiento, puede recibirse el carbón en agua, o en un equipo sellado con enfriamiento indirecto.⁴

Lo anterior constituye la etapa principal del proceso. El resto consiste en operaciones de molido y tamizado para brindar al producto el rango buscado de tamaños de partícula.

1.3.2 Activación Química

La activación química es utilizada generalmente cuando se trabaja con materiales lignocelulíticos y es llevada a cabo a una temperatura entre 500 a 700°C. Los agentes químicos utilizados reducen la formación de material volátil y alquitranes, aumentando el rendimiento del carbono.⁵

El precursor se hace reaccionar con un agente químico activante. En este caso la activación suele tener lugar en una única etapa, aunque es necesario un lavado posterior del carbón activado para eliminar los restos del agente activante. Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes, sin embargo, los más usados industrialmente son cloruro de zinc (ZnCl₂), ácido fosfórico (H₃PO₄) e hidróxido de potasio (KOH), aunque el más utilizado es el ácido fosfórico.¹

Los precursores usados en la activación con H_3PO_4 y $ZnCl_2$ son en su mayoría residuos forestales, tales como madera, cáscaras de coco, cuercos de aceituna, etc.

La activación con H_3PO_4 comprende las siguientes etapas:

- Molienda y clasificación del material de partida.
- Mezcla del precursor con H_3PO_4 reciclado y fresco.
- Tratamiento térmico en atmósfera inerte entre 100 y 200°C, manteniendo la temperatura aproximadamente 1 hora, seguido de un nuevo tratamiento térmico entre 400 a 500 °C, manteniendo esta temperatura en torno a 1 hora.
- Lavado, secado y clasificación del carbón activado.
- Reciclado del H_3PO_4 .

Las mismas se esquematizan en la figura 1.2.

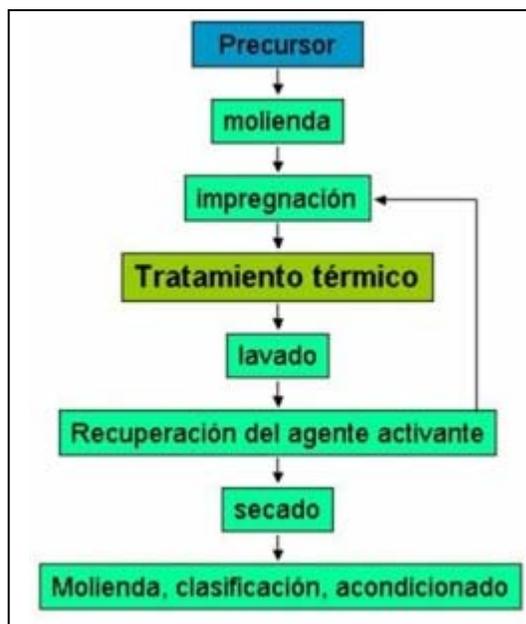


Figura 1.2: Etapas del proceso de activación química del carbón. ¹

La proporción entre H_3PO_4 y precursor más empleada suele ser 1:5 (aunque proporciones diferentes dan lugar a carbones con distintas propiedades), el rendimiento en carbón activado suele ser del 50%. ¹

La activación química con KOH se desarrolló durante los años 70 para producir los denominados “carbones superactivados”, con superficies específicas del orden de los 3000 m²/g. A diferencia de los otros dos agentes activantes, los precursores preferibles para esta activación son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbones minerales de alto rango, carbonizados, coque de petróleo, etc. En esta activación, el KOH se mezcla con el precursor en una suspensión acuosa o mediante una simple mezcla física, en proporciones entre KOH y precursor de 2:1 a 4:1.

Cuando la impregnación tiene lugar en medio acuoso, la activación se lleva a cabo en dos tratamientos térmicos consecutivos en atmósfera inerte. El primero a temperaturas del orden de 200°C cuyo único objetivo es evaporar el agua y dispersar el KOH, y el segundo entre 700 y 900°C.¹

1.4 Clasificación y características del carbón activado

Los diferentes tipos de carbón activado pueden clasificarse según:

El precursor

- Bituminoso
- Antracita
- Lignito
- Cáscaras de coco o similares
- Madera
- (En teoría, toda materia que contenga carbono puede ser utilizada)

El proceso de activación

- Activación térmica o física
- Activación química

La forma física

- Carbón activado en polvo (CAP)
- Carbón activado granular (CAG)
- Carbón activado cilíndrico (en pellets)
- Esférico, etc. ⁶

Esta última es la clasificación más empleada, en donde el CAP corresponde a partículas de carbón de diámetro inferior a los 100 μm (típicamente entre 15 μm a 25 μm), mientras que las partículas en los CAG oscilan entre 1 mm a 5 mm de diámetro.

Como se mencionó anteriormente, el carbón activo presenta grandes superficies específicas (oscilando entre 1000 m^2/g hasta valores incluso del orden de los 3000 m^2/g). Estos elevados valores de superficie se deben a la porosidad propia de los materiales carbonosos, aumentada en el proceso de activación. ¹

El CA tiene una gran variedad de tamaños de poros, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su función, en poros de adsorción y poros de transporte.

Los primeros consisten en espacios entre placas gráficas con una separación entre una y cinco veces el diámetro de la molécula que va a retenerse. En éstos, ambas placas de carbón están lo suficientemente cerca como para ejercer atracción sobre el adsorbato (sustancia a adsorber) y retenerlo con mayor fuerza. ⁴

Los poros mayores que los de adsorción son de transporte, y tienen un rango muy amplio de tamaños, que van hasta el de las grietas que están en el límite detectable por la vista, y que corresponde a 0,1 mm. En esta clase de poros, solo una placa ejerce atracción sobre el adsorbato, por lo que la fuerza es menor, o incluso insuficiente para retenerlo. Actúan como caminos de difusión por los que circula la molécula hacia los poros de adsorción en los que hay una atracción mayor. Por lo tanto, aunque tienen poca influencia en la capacidad del CA, afectan la cinética o velocidad con la que se lleva a cabo la adsorción.

Otra clasificación de los poros, es la de la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), que se basa en el diámetro de los mismos, de acuerdo a lo siguiente:

Microporos: menores a 2 nm

Mesoporos: entre 2 y 50 nm

Macroporos: mayores a 50 nm (típicamente 200 a 2000 nm) ⁴

Se observa una representación de la microestructura porosa del carbón activado en la figura 1.3.

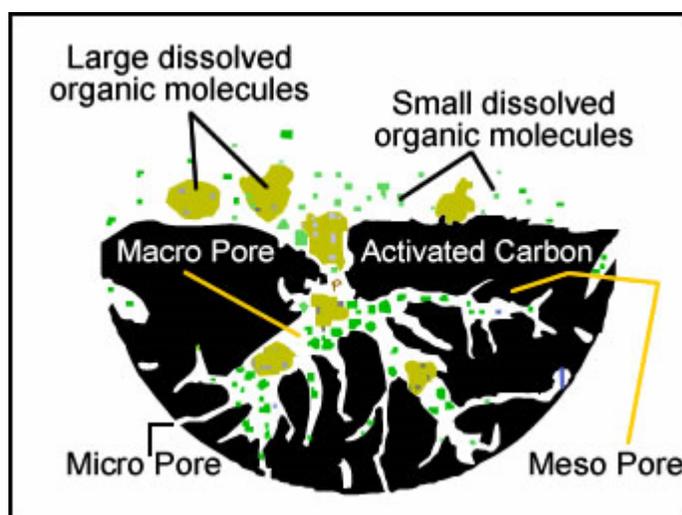


Figura 1.3: Distribución de poros en el carbón activado. ⁷

Los microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas, que corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes.

Los macroporos atrapan moléculas grandes, tales como las que son coloridas o las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan al descomponerse la materia orgánica.

Los mesoporos son los apropiados para moléculas intermedias entre las anteriores.

Por lo tanto, la capacidad de un CA para retener una sustancia determinada no solo está dada por su área superficial, sino también por la proporción de poros. ⁴

1.5 Adsorción

La adsorción es la remoción por adherencia de impurezas tales como líquidos, gases, materia suspendida, coloides, moléculas, átomos e iones en solución de una sustancia, en la superficie de un segundo material, denominado adsorbente, incluyendo sus poros y superficie interna. El proceso se puede representar mediante la siguiente ecuación química:



donde A es la sustancia adsorbida, denominada adsorbato, B es el adsorbente, y $A \cdot B$ es el compuesto formado con la adsorción.⁸

La adsorción es gobernada por una atracción electro-química y no por un proceso mecánico. No obstante, se le considera como un tipo de filtración muy fina.

Las fuerzas moleculares en la superficie del adsorbente están en un estado de insaturación. Según la naturaleza del enlace de adsorción, la misma puede ser física, en la cual las moléculas están unidas a la superficie por fuerzas físicas o de dispersión, o química, en la que las fuerzas de adsorción son de naturaleza química, por lo que se conoce como quimisorción.⁸

1.5.1 Isotermas de adsorción

La capacidad de adsorción de un adsorbente puede representarse y estimarse empleando las isotermas de adsorción. Una isoterma de adsorción se define como la relación de dependencia, a temperatura constante, entre la cantidad de adsorbato adsorbido por peso unitario de adsorbente respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio.⁸

Para obtener la isoterma de un determinado adsorbato, se hace pasar por un adsorbente una solución de concentración conocida. A continuación, se mide la concentración de la solución filtrada, obteniéndose la cantidad adsorbida por diferencia entre las concentraciones inicial y

final. Esta cantidad se divide por la masa de adsorbente utilizado, lo que representa la capacidad de intercambio al equilibrio, q_e , y se grafica (como ordenada) contra la concentración final del filtrado, también llamada concentración de equilibrio (como abscisa), C_e .

La pendiente de la isoterma corresponde a la constante de equilibrio de la reacción, K , la cual depende de la temperatura y representa la adsorptividad, es decir, la facilidad con que el adsorbato es adsorbido. Cabe destacar que cada adsorbato tiene una adsorptividad diferente.

Las isotermas experimentales no siempre presentan un comportamiento lineal, por lo que se han desarrollado distintos modelos matemáticos para representar estos variados comportamientos. Las ecuaciones más empleadas son las de Langmuir, Freundlich y Brunauer-Emmet y Teller (BET).

La ecuación de Langmuir es una de las más conocidas, y se emplea generalmente para la quimisorción y para la adsorción física a presiones bajas y temperaturas moderadamente elevadas. Su ecuación general es:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q \cdot K} + \frac{C_e}{Q}$$

donde Q es una constante relacionada con los lugares ocupados y libres en la superficie del adsorbente.⁸

La ecuación de Freundlich predice de manera satisfactoria el comportamiento del carbón activado en aplicaciones en fase líquida, relacionando la cantidad de carbón a utilizar, la masa de adsorbato retenido y la concentración residual del filtrado. Su ecuación es la siguiente:

$$q_e = K \cdot C_e^{1/n}$$

donde n es una constante adimensional que depende de la temperatura.

Al graficar la isoterma de Freundlich en papel logarítmico se obtiene una recta. Al realizar múltiples experiencias con diferentes dosis de carbón, se aprecia que existe un rango en el que el carbón activado es eficiente, luego del cual, aunque se agregue más carbón, la ganancia en adsorción es cada vez menor. ⁹

La ecuación de Brunauer-Emmet y Teller (BET) describe las distintas isotermas encontradas experimentalmente. Se emplea para calcular la superficie específica (es decir, de un gramo) de carbón activado. Su expresión es la siguiente:

$$S = a_m \cdot W_m \cdot N_A \cdot 10^{-20}$$

donde

S = superficie específica (m²/g)

a_m = capacidad de monocapa (mol/g)

W_m = superficie que ocupa la molécula en la superficie (Å²)

N_A = número de Avogadro

Se puede usar la isoterma de cualquier sustancia para obtener su superficie específica si se conoce la superficie que ocupa la molécula de adsorbato en un adsorbente determinado. ⁸

1.6 Precedentes en diseño de reactores de activación de carbón

Uno de los precursores más empleados en la producción de carbón activado corresponde a las cáscaras de coco. En este caso, variando las condiciones de activación es posible obtener distintas características en el carbón activado, lo cual tendrá interés según la aplicación a la cual se destine.

Si la activación se lleva a cabo a temperaturas del orden de 800°C empleando vapor de agua, el carbón activado obtenido será microporoso, con poros de diámetro inferior a los 0,7 nm, apropiado para la separación de gases, mientras que si se activa a temperaturas cercanas a los

450°C mediante activación química, aumentará la proporción de mesoporos con diámetro mayor a 2 nm, apropiado para aplicaciones en fase líquida.²

En general, una ventaja de los carbones activados cuyo precursor es materia orgánica sobre aquellos de precursor inorgánico es su menor porcentaje de cenizas.²

Luna *et. al.*² han diseñado un sistema de activación térmica de carbón proveniente de cáscaras de coco en un horno rotatorio.

Un horno rotatorio es un cilindro que rota alrededor de un eje longitudinal a baja velocidad. Su interior está cubierto con ladrillos refractarios, y está ligeramente inclinado (con una pendiente de 2 a 6%) para permitir el desplazamiento axial del contenido.²

El horno rotatorio diseñado cuenta con un cuerpo cilíndrico de acero, recubierto internamente de ladrillos refractarios y externamente por una capa de aislante térmico, montado sobre anillos metálicos en contacto con los apoyos que permiten la libre rotación.

El calor necesario para las reacciones es suministrado por un quemador de gas natural que se ubica cercano a la tapa de alimentación. La activación térmica se lleva a cabo con vapor de agua inyectado en contracorriente por un difusor en forma de gotas de agua impulsadas con presión neumática que se evaporan al entrar en contacto con el calor interno del horno, el cual estará a elevada temperatura (del orden de 1000°C).²

Empleando también un horno rotatorio, Márquez *et. al.*¹⁰ realizaron activación térmica de carbón en pellets proveniente de aserrín de pino *Caribaea* con vapor de agua, consiguiendo características similares o superiores a las exhibidas por el carbón activado comercial.

El horno rotatorio empleado por ellos tenía un cuerpo cilíndrico de 1 metro de largo y 20 centímetros de diámetro, con calentamiento eléctrico. No obstante, en este caso la pirólisis se llevó a cabo con anterioridad, en una retorta estática de 25 litros de capacidad.

A continuación de la pirólisis se efectuó la pelletización, la cual se logró mezclando el carbón con el aglutinante en una malaxadora (básicamente un estanque provisto de un tornillo sinfín mezclador) y a continuación se formaron los pellets sometiendo la mezcla a presión.

Las experiencias llevadas a cabo con el carbón de pino demostraron que los mayores índices de caracterización se consiguieron a una temperatura de 900°C con un tiempo de activación de 4 horas, (número de azul de metileno de 280 mg/g e índice de yodo de 833 mg/g) ya que a mayores temperaturas y tiempos de residencia tiene lugar el fenómeno de sobreactivación, el cual consiste en el crecimiento grosero de los poros y consiguiente destrucción de la estructura porosa.¹⁰

Por supuesto, el horno rotatorio no es el único reactor en el cual se puede efectuar la activación térmica del carbón, ni el carbón vegetal es el único precursor que puede ser empleado. Zapata *et. al.*⁵ realizaron activación térmica de carbón subbituminoso con aire y vapor de agua en reactores de lecho fluidizado, para lo cual, entre otros, se basaron en el trabajo de Martin-Gullon *et. al.* quienes estudiaron la producción de carbón activado a partir de carbón bituminoso en reactores de lecho fluidizado, empleando temperaturas del orden de 800 a 850°C y velocidades de vapor entre 1,5 a 3 veces la velocidad mínima de fluidización.

Ya que el proceso de activación térmica involucra una reacción no catalítica entre un sólido y un gas, es necesario contar con un reactor que permita un buen contacto entre ambas fases, y los reactores de lecho fluidizado son conocidos por permitir un excelente contacto entre sólido y gas.⁵

La reacción de activación térmica fue llevada a cabo en dos reactores, uno de 1,83 metros de alto y 10 centímetros de diámetro, y un segundo de 2 metros de alto y 22 centímetros de diámetro, compuestos de un cilindro de cemento refractario recubierto con aislante térmico y una lámina de acero, cada uno contando con un sistema de precalentamiento necesario para el arranque del proceso compuesto por un quemador de propano con aire a presión.

El proceso desarrollado fue autotérmico, por lo que la energía necesaria para llevar a cabo la reacción, luego del precalentamiento, fue proporcionada por la misma combustión del carbón, al cual se alimentó aire en una cantidad menor a la estequiométrica (defecto de aire) para evitar la combustión total del carbón.⁵

En dicho trabajo fueron realizadas 30 experiencias, con temperaturas del orden de los 800 a 850°C. Para estas condiciones de activación, el índice de yodo alcanzado osciló entre 311 a 594 mg/g, con un promedio de 460 mg/g.⁵

1.7 Conclusiones

Debido a que la activación térmica es un proceso más económico que la activación química, tanto desde el punto de vista operativo como a causa de los agentes activantes empleados, se seleccionó este proceso para el diseño del reactor del presente Proyecto de Título.

Otras ventajas del proceso de activación térmica que llevaron a su selección es ser menos corrosivo y poder ser llevado a cabo a temperaturas menores que las necesarias para la activación química tradicional.²

Se seleccionó como agente activante el vapor de agua, por ser de fácil manejo y producción, ya que la Escuela de Ingeniería Química dispone de una caldera eléctrica. Esto, sumado a las ventajas ya mencionadas, se traduce en un menor costo del trabajo a desarrollar.

Finalmente, existen pruebas estandarizadas para determinar la relación entre la cantidad de adsorbato adsorbido por el carbón activado y la concentración de la solución tratada, las cuales se llevarán a cabo para caracterizar el carbón activado producido en la etapa experimental.

1.8 Bibliografía

1. MENÉNDEZ, José. El carbón activado. [en línea]. España, 2006. [citado Marzo 15, 2009]. Disponible en World Wide Web:
<http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm>
2. LUNA, Donaciano; GONZÁLES, Armando; GORDON, Manuel; MARTÍN, Nancy. Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. [en línea] UAM-Iztapalapa, Depto. Química. D.F., México. Febrero, 2007 [citado Abril 5, 2009]. Disponible en World Wide Web: http://www.izt.uam.mx/contactos/n64ne/carbon_v2.pdf
3. APELSA CARBONES. Procesos de activación [en línea]. México, 2004. Apelsa Guadalajara, S.A. de C.V. [citado Abril 27, 2009]. Disponible en World Wide Web:
<http://www.carbonapelsa.com.mx/pages/spanish/activacion.html>
4. CHIEMIVALL, CARBÓN ACTIVADO. El carbón activado, materias primas y aplicaciones. [en línea] ChiemiVall, s.l. Avda. Can Bordoll, 71 P.I. Can Roqueta 08202 Sabadell. Barcelona, España. [citado Abril 27, 2009]. Disponible en World Wide Web:
<http://www.carbonactivo.com/ca/introduccion.htm>
5. ZAPATA, Zulamita; ROJAS, Diego; ARENAS, Erika; CHEJNE, Farid; LONDOÑO, Carlos; PÉREZ, Juan. Producción de carbón activado a partir de carbón subbituminoso en reactores de lecho fluidizado por proceso autotérmico. Dyna, noviembre 2005, año/vol. 72, no. 147, p. 47-56. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
6. DESOTEC, ACTIVATED CARBON. Types of activated carbon. [en línea] Bélgica, 2009. DESOTEC N.V. - S.A. Regenbeekstraat 44. B-8800 Roeselare. [citado Mayo 18, 2009]. Disponible en World Wide Web:
http://www.desotec.com/ES/carbon_activo/p14/tipos_de_carbon_activo

7. SUSHRUT CHEMICALS. Activated Carbon. Diagram of Activated Carbon. [en línea] India. Sushrut Chemicals. VADODARA - 390 016, Gujarat, India. [citado Octubre 22, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.sushrutchemicals.com/activatedCarbon.html>
8. PONCE, Efraín. 2005. “Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada”. Capítulo 4. Tesis para optar al Título de Licenciatura en Ingeniería Civil. Cholula, Puebla, México. Universidad de las Américas Puebla.
9. DE LA CERDA, Marcela. 2009. “Factibilidad técnica-económica de planta de carbón activo”. Aplicación: Decoloración y clasificación. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso, Chile. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.
10. MÁRQUEZ, Francisco; BLANCO, Javier; PLASENCIA, Juan; CASTALLANOS, Marlena. Obtención de carbón activado a partir del aserrín de pino por activación con vapor en horno rotatorio. [en línea]. U. Pinar del Río, Cuba. [citado Marzo 15, 2009]. Disponible en World Wide Web: <http://www.citma.pinar.cu/ciget/No.%202000-1/coniferas.htm>

Capítulo 2. Análisis de Mercado

2.1 Alcances

En el capítulo que inicia a continuación se entrega un estudio de mercado tanto a nivel nacional como internacional del producto de interés al actual trabajo, es decir, “Carbón Activado”.

Los datos presentados abarcan el período de tiempo comprendido entre los años 2002 a 2009, centrándose en datos sobre importación y exportación del producto. Se considera que el rango de tiempo presentado de 8 años es representativo al comportamiento de este producto, tanto en Chile como en el mundo.

Para el actual análisis de mercado se consultaron principalmente 3 fuentes de información:

- Departamento de Informática del Servicio Nacional de Aduanas, Registros Aduaneros de Importaciones y Exportaciones Chilenas.
- Comité chileno de nueces, CHILENUT.
- Biblioteca Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería.

En las bases de datos consultadas, los códigos referidos al Carbón Activo no diferencian según aplicación a la cual está destinada el producto ni materia prima del cual proviene, sino que simplemente está catalogado como “Carbón Activo”, pero en su descripción se hace referencia a su aplicación, formato, etc.

En la base de datos de Aduana, el producto “Carbón Activado” se encuentra bajo el código 38021000.¹

2.2 Análisis de la Demanda

En Chile, las importaciones de carbón activado superan con creces las exportaciones, lo cual deja en evidencia la necesidad de nuestro país de éste producto y la baja producción del mismo.

Las principales aplicaciones del producto, entre muchas otras, radican en la minería, química, farmacéutica, industria alimenticia, tratamientos de agua, etc. No obstante, la intención del presente Proyecto de Título es la producción de un carbón activo destinado a la adsorción de oro, por lo que, si bien es cierto cabe tener en cuenta el amplio espectro de aplicaciones del mismo, la atención debe centrarse en el rubro minero.

Se presentan los datos de importación de carbón activo desde el año 2002 en las tablas 2.1 y 2.2 (Fuente: Base de Datos Aduana):

Año	Imp. US\$
2002	1.591.635
2003	1.989.508
2004	1.902.031
2005	2.162.330
2006	1.926.837
2007	2.380.500
2008	2.706.440
2009	2.581.936

Tabla 2.1: Importaciones de carbón activado en dólares. ¹

Año	Imp. kilogramo neto (KN)
2002	1.035.072
2003	1.435.001
2004	1.404.285
2005	1.272.301
2006	1.333.073
2007	1.344.621
2008	1.340.892
2009	1.389.653

Tabla 2.2: Importaciones de carbón activado en kilogramos netos. ¹

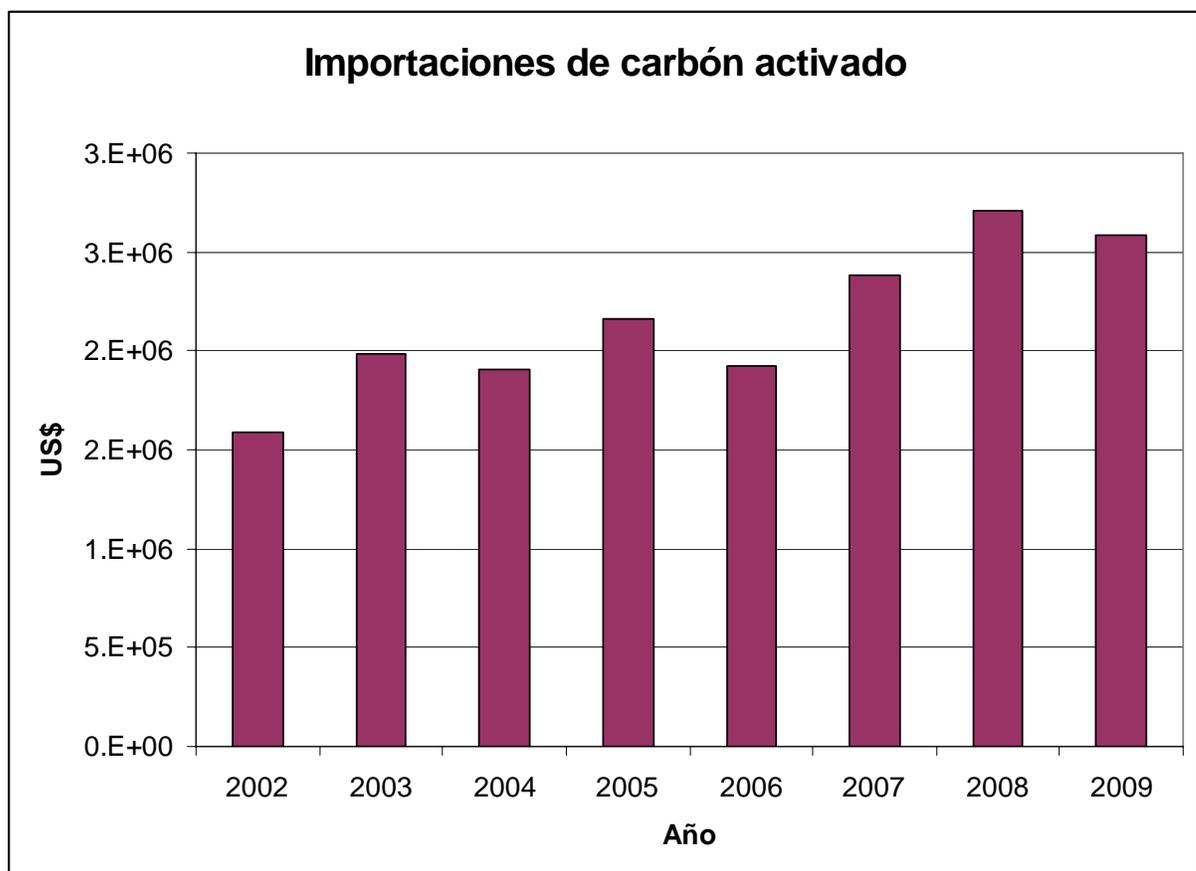


Gráfico 2.1: Importaciones de carbón activado. ¹

Se observa en la gráfica 2.1 que pese a que han existido ciertas fluctuaciones, la tendencia general es un aumento en las importaciones de producto, debido principalmente al crecimiento de las industrias demandantes de este producto y de la escasa producción nacional del mismo.

El año 2008 presenta la mayor importación en dólares en el rango analizado, y pese a que el año 2009 exhibe una pequeña baja respecto al año anterior, sigue siendo un valor más alto que los de los otros 6 años pertenecientes al rango de estudio, lo cual hace suponer que las importaciones seguirán una tendencia al alza en los años venideros.

Como ya se señaló, las aplicaciones del carbón activado son variadas, por lo que se entrega la clasificación por rubro de las principales empresas importadoras de carbón activo en Chile en la tabla 2.3.

Rubro	Empresa
Aislantes térmicos	Nikolaides S.A. TEKA Ltda.. Navarro y Cía.
Importadoras	Barcelona Navarro y Cía. Otras importadoras
Industrias de maíz y alimentos	Industria del Maíz NESTLÉ Chile
Laboratorios	Laboratorio Chile MERCK Ltda.. Anglo Sales y Compuestos Ltda.. Industrias químicas
Minería	Compañía Minera Anax Guanaco Compañía Minera Dayton S.A. Compañía Minera El Indio Compañía Minera Mantos de Oro Compañía Minera Maricunga Comercializadora Nacional del Cobre Inversiones Mineras El Inca Otras Mineras
Protección y seguridad minera	INSESA S.A. M.S.A. PROSEG
Jugos, bebidas y cervezas	Agroindustria Nacional S.A. Jugos concentrados S.A. CARGILL, jugos de fruta Embotelladora Andina Embotelladora Williamson Cervecerías Andina
Agropecuarias	
Celulosas	
Filtros	
Forestales	
Otros	

Tabla 2.3: Clasificación de las principales empresas importadoras de carbón activado por rubro. ²

Los principales países desde los cuales Chile importa carbón activado, extraídos de la Base de datos de Aduana para el último año en estudio, es decir, para el 2009 son los siguientes:

- Sudáfrica
- México
- Brasil
- Argentina
- Estados Unidos
- Canadá
- Sri Lanka
- India
- Tailandia
- Japón
- Filipinas
- China
- Italia
- Francia
- Suiza
- Inglaterra
- Holanda
- Alemania

2.3 Análisis de la Oferta

Los principales mercados de exportación del producto “Carbón Activado” son Argentina, Estados Unidos, Brasil y Alemania, siendo sus principales aplicaciones la de decoloración y filtro en tratamientos de aguas.³

Como ya se señaló, debido a la baja producción nacional del producto, las exportaciones son mínimas en comparación a las importaciones. No obstante, no deja de ser interesante el estudio de dichas exportaciones en caso de tener proyecciones internacionales como mercado para la producción industrial del producto.

El hecho de ser Argentina uno de los países a los cuales se exporta gran cantidad de carbón activado presenta la ventaja de la cercanía geográfica, lo cual disminuye los costos de envío. Sin embargo, en los últimos años, la Cooperativa Agropecuaria COTAGRO de dicho país ha iniciado la producción de carbón activado a partir del residuo cáscaras de maní a través de ECOT, lo cual amenaza este nicho de exportación.³

En las tablas 2.4 y 2.5 se presentan los datos de exportación desde Chile de carbón activo desde el año 2002 (Fuente: Base de Datos Aduana):

Año	Exp. US\$
2002	80.792
2003	40.000
2004	0
2005	2.981
2006	19.810
2007	944
2008	27.244
2009	21.352

Tabla 2.4: Exportaciones de carbón activado desde Chile en dólares.¹

Año	Exp. KN
2002	42.387
2003	45.000
2004	0
2005	510
2006	11.000
2007	1.060
2008	8.600
2009	6.384

Tabla 2.5: Exportaciones de carbón activado desde Chile en kilogramos netos. ¹

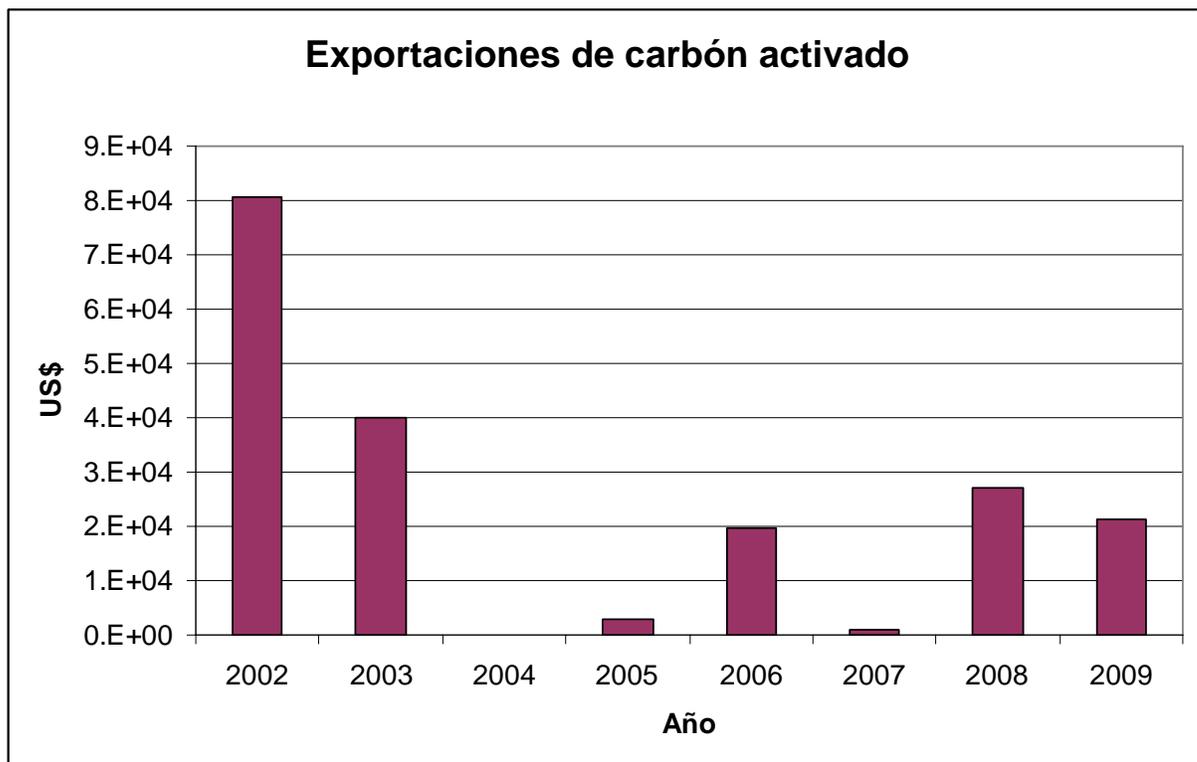


Gráfico 2.2: Exportaciones de carbón activado desde Chile. ¹

En el caso de las exportaciones, a diferencia de las importaciones, la incertidumbre se deja notar, lo cual puede explicarse argumentando que la producción nacional de carbón activo se consume casi o completamente al interior del país, sin ser suficiente la cantidad como para expandirse a un mercado internacional.

2.4 Análisis de Precios

Los precios de comercialización del carbón activado en Chile varían dependiendo de muchos factores, entre los que cabe destacar el objetivo que tendrá el producto, del cual dependen sus características y mecanismo de activación, el material de origen y si el producto es importado o de producción nacional.

Los menores costos se observan en expresas importadoras, las cuales trabajan con dichos costos por manejar grandes volúmenes de producto. En la tabla 2.6 se entregan algunos precios representativos de empresas del rubro:

Empresa	Tipo	FOB (US\$/kg)
Importadora Barcelona	CAG	2,90
	CAP	2,90
PETROCHIL S.A.	CAG	1,95
	CAP	1,95
Empresas VINICAS S.A.	CAG	2,50
	CAP	2,95
Proyectos y Equipos Hidráulicos	CAG	1,95
	CAP	2,55

Tabla 2.6: Precios de importación de carbón activado al 2007. ³

Por su parte, el carbón activado ya envasado y en ventas minoristas a nivel de tiendas del rubro o para artículos y usos determinados presenta valores mucho más elevados. De entre dichos productos se mencionan de manera representativa los siguientes:

Carbón Activado Tetrattec (\$12.290) ⁴

El medio filtrante Tetrattec® CF en forma de carbón granulado ha sido desarrollado para su uso en los filtros exteriores.

El contenido del envase es suficiente para acuarios con un volumen de hasta 500 litros, y es distribuido por la empresa acuarioVision. El mismo puede observarse en la figura 2.1.



Figura 2.1: Caja de carbón activado Tetrattec. ⁴

Azoo Carbón Súper Activado 250 grs (\$5.000) ⁵

Este carbón es fabricado con cáscara de nuez, no contiene impurezas y es muy adsorbente. Es capaz de eliminar los olores y las sustancias amarillas del agua, así como descomponer sustancias orgánicas disueltas, ácido carbónico, ácido tánico y retira el cloro residual del agua de la llave. Se presenta una fotografía del producto en la imagen 2.2.

Tiene una vida media más prolongada que la mayor parte de los carbones activados; 250 g del producto pueden tratar 200 litros de agua durante 40 días y tiene un pH neutro. Es distribuido por la empresa Aquaplant Chile.

⁴“Diseño de reactor, producción y caracterización de carbón activado de cáscaras de nuez para uso en separación de cianuros metálicos.”

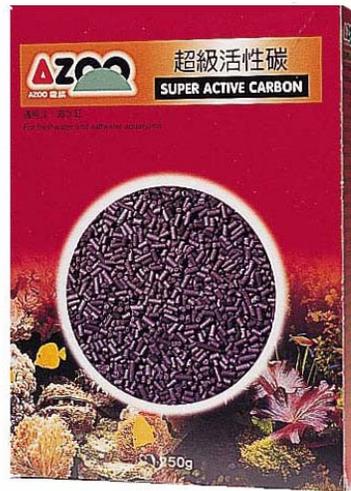


Figura 2.2: Caja de Azoo Carbón Súper Activado. ⁵

2.5 Análisis de Materia Prima

Las cáscaras de nueces pueden adquirirse de dos maneras: en grandes cantidades, a partir de empresas del rubro agropecuario productoras de nueces peladas, y de manera minorista, a personas naturales o pequeñas empresas que las comercializan como combustible o material de relleno o para paisajismo.

En distribuciones minoristas desde personas naturales, las ofertas se encuentran en avisos clasificados. Algunos ejemplos de localidades y precios (consultados en 2009) se presentan a continuación:

- **CASCARAS DE NUECES**
Región Metropolitana de Santiago
Valor: \$100/kg
Teléfono: 09-4165137
Publicado: 26/02/2009

- Se venden cáscaras de nueces
Área: Valdivia
Precio: \$ 100/kg
ID 9758459
Publicado: 30/09/2008

- Nueces, Cascaras De Nueces.
Ubicación: Metropolitana (Santiago)
Precio: \$ 200/kg
Vendedor: PAULINACARRASCO77

- **CASCARAS DE NUECES**
San Bernardo, Región Metropolitana
Precio: \$100/kg
Vendedor: PAULWONIA@GMAIL.COM - 8864469
Publicado: Domingo 15 de febrero, 2009

Por otra parte, para tener una visión global de la disponibilidad mayorista de cáscaras de nueces es necesario analizar la producción de nueces sin cáscaras en Chile, reflejadas en las exportaciones nacionales de dicho producto.

Para obtener dichos datos, la mejor fuente corresponde al Comité de nueces CHILENUT, asociación gremial nacida hace cuatro años, representante del 35% de la superficie nacional

plantada con nogales y 30% de la fuerza exportadora de Chile, única entidad representante del rubro nueces de nogal en Chile. ⁶

En la tabla 2.7 y gráfico 2.3 se presentan los datos de exportaciones de nueces sin cáscaras actualizadas hasta diciembre de 2009:

Año	Cant. Kg.N	Fob US\$	Fob /Kg. N
2000	2.225.490,0	14.023.189,0	6,9
2001	2.729.671,0	16.127.064,0	6,3
2002	2.400.947,0	13.151.664,0	5,9
2003	3.295.371,0	17.202.933,0	5,5
2004	3.224.420,0	20.628.920,0	5,2
2005	4.056.958,0	31.598.600,0	6,4
2006	5.750.026,1	46.889.227,5	8,2
2007	7.056.571,0	57.798.612,6	8,2
2008	7.376.504,0	94.838.485,3	12,9
2009	6.790.386,0	52.087.485,1	7,7

Tabla 2.7: Exportaciones de nueces sin cáscaras. Fuente: CONSULTORA MACROSCOPE CHILE. ⁶

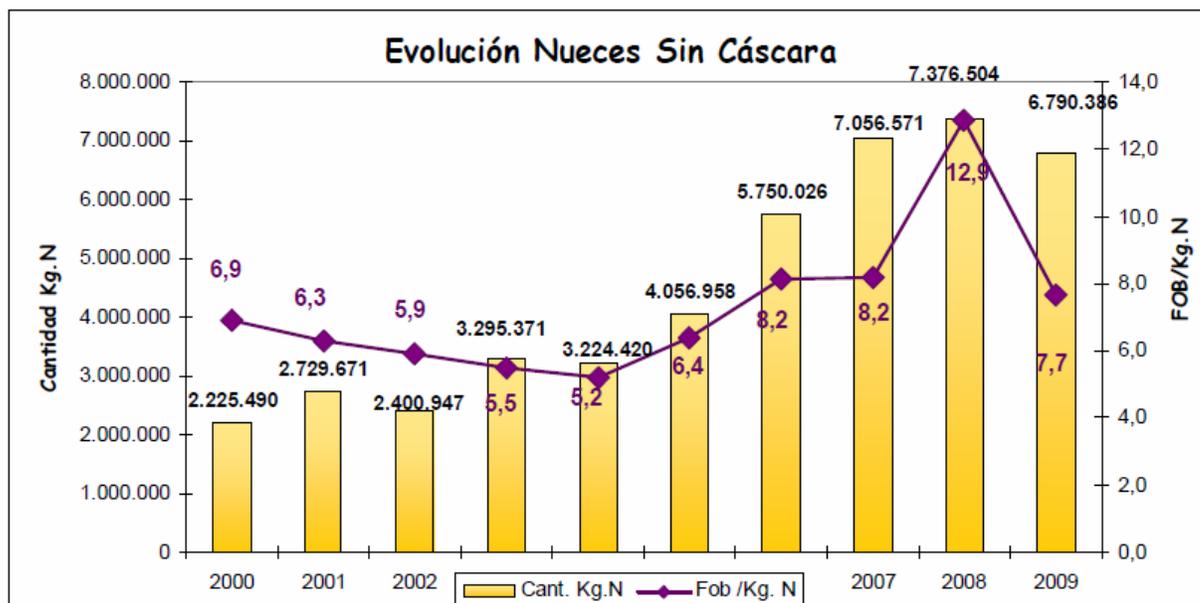


Gráfico 2.3: Exportaciones de nueces sin cáscaras. Fuente: CONSULTORA MACROSCOPE CHILE. ⁶

Las cifras presentadas corresponden al total de exportaciones, provenientes de diversas empresas exportadoras de nueces chilenas. En la tabla 2.8 se entrega un detalle de las empresas participantes:

Exportador	Fob US\$	%FOB	Cant. Kg	% Cantidad
EXPORTADORA ANAKENA LTDA.	13.366.494,5	16,0	3.883.157,0	15,5
EXPORTADORA HUERTOS DEL VALLE	8.180.553,3	9,8	2.431.915,0	9,7
VALBIFRUT S.A.	5.586.539,4	6,7	1.561.980,0	6,2
HOJAS EXPORT LTDA.	5.010.684,7	6,0	1.469.590,0	5,9
PACIFIC NUT COMPANY CHILE S.A.	4.818.057,0	5,8	1.560.250,0	6,2
FRUTAS DE EXPORTACION S.A.	4.374.762,9	5,2	1.160.085,0	4,6
COM. Y DESHID. GRANEROS LTDA	4.248.370,4	5,1	1.040.380,0	4,2
AGRICOLA BALLERINA LTDA.	2.738.014,7	3,3	897.080,0	3,6
SOCIEDAD ENGLANDER NUSS S.A.	2.593.019,7	3,1	681.460,0	2,7
ASI CHILE S.A.	2.589.985,5	3,1	749.500,0	3,0
EXPORTADORA SUN WEST S.A	2.473.118,8	3,0	674.160,0	2,7
EXPORTADORA VALVALLE LTDA	1.913.133,8	2,3	628.675,0	2,5
NATURAL NUTS S.A.	1.736.870,4	2,1	560.475,0	2,2
IMP.Y EXP.INDUFRUT INT.LTDA	1.489.540,0	1,8	600.000,0	2,4
EXPORTACIONES Y ASESORIAS ALNU	1.455.423,0	1,7	359.280,0	1,4
JORGE E. GALLARDO F.S.A.C.	1.447.330,8	1,7	414.270,0	1,7
CIA.COM.EXT.MONDIAL EXPORT S.A	1.349.819,3	1,6	332.930,0	1,3
EXPORTADORA DRYFRUT LTDA.	1.217.025,2	1,5	350.450,0	1,4
EMPRESAS TURQUESA LIMITADA	1.131.021,2	1,4	692.540,0	2,8
SUN BELLE BERRIES S.A.	1.102.109,0	1,3	310.570,0	1,2
OTROS(54)	14.835.411,2	17,7	4.680.407,3	18,7
TOTAL (74)	83.657.284,5	100,0	25.039.154,3	100,0

Tabla 2.8: Participación de empresas en exportaciones. Fuente: CONSULTORA MACROSCOPE CHILE. ⁶

Se aprecia en la gráfica 2.3 que las exportaciones de nueces sin cáscaras presentan una clara tendencia al alza, presentando el 2009 una disminución en los precios, pero menos marcada fue la disminución en la cantidad total, lo cual indica que la demanda internacional sobre este producto seguirá creciendo, aumentando así la cantidad de cáscaras de nueces residuales, asegurando la disponibilidad de materia prima para proyectos de producción de carbón activado a partir de las mismas.

Finalmente se realizó un ejercicio hipotético, el cual consiste en determinar la cantidad de carbón activado producido si todas las cáscaras de nueces residuales de las exportaciones de nueces sin cáscaras y contrastarlo con las importaciones de este producto.

Experimentalmente se determinó que la relación másica cáscara:fruto es aproximadamente 1,1:1, pero considerando pérdidas y destrucción de cáscaras en el proceso industrial de pelado, se tomará una relación másica de cáscaras utilizables:fruto de 1:1.

Como se mencionará en el Capítulo 3, sección 3.3.2, la eficiencia de pirólisis es de 33,22%, por lo que realizando los cálculos sobre los datos de la tabla 2.7 al rango de años 2002-2009 y contrastándola con los datos de la tabla 2.2, se confecciona la tabla 2.9:

Año	Nueces peladas exportadas (kg)	Cáscaras producidas (kg)	CA hipotético generado (kg)	Importaciones de CA (kg)	Diferencia (kg)
2002	2.400.947	2.400.947	797.595	1.035.072	237.477
2003	3.295.371	3.295.371	1.094.722	1.435.001	340.279
2004	3.224.420	3.224.420	1.071.152	1.404.285	333.133
2005	4.056.958	4.056.958	1.347.721	1.272.301	-75.420
2006	5.750.026	5.750.026	1.910.159	1.333.073	-577.086
2007	7.056.571	7.056.571	2.344.193	1.344.621	-999.572
2008	7.376.504	7.376.504	2.450.475	1.340.892	-1.109.583
2009	6.790.386	6.790.386	2.255.766	1.389.653	-866.113

Tabla 2.9: Producción de CA si hipotéticamente se utilizaran todas las cáscaras producidas.

Se aprecia que desde el año 2005, si todas las cáscaras generadas en el rubro de exportaciones de nueces peladas se destinaran a la producción de carbón activado, Chile ya no tendría la necesidad de importar este producto, lo cual se traduciría en un ahorro significativo para el país.

2.6 Conclusiones

La demanda de carbón activado en Chile es alta, lo cual se ve reflejado en los grandes volúmenes de importación de dicho producto, así como en la gran cantidad de dinero destinado a dichas importaciones.

La producción nacional de carbón activado es baja, hecho demostrado en la baja cantidad de exportaciones, siendo incluso nula el año 2004, por lo que la implementación de empresas en este rubro, productoras de carbón activado, presenta una buena oportunidad de mercado local a causa de la baja competencia que encontraría, teniendo que rivalizar principalmente con los productos de importación, los cuales presentan costos adicionales por conceptos de transporte.

Pese a que la producción nacional de carbón activado es baja, nuestro país exporta gran cantidad de nueces sin cáscaras a diversos países del mundo, exhibiendo un alza en las exportaciones en los últimos años, lo cual demuestra que la disponibilidad de cáscaras de nueces seguirá en aumento, pudiendo sustentar de materia prima a las empresas productoras de carbón activado proveniente de este sustrato, ya que es la única materia prima necesaria, y debido a los usos actuales que se le da a las cáscaras, su valor comercial es bajo, no dificultando así su adquisición por parte de una empresa naciente.

Los valores de comercialización del carbón activado varían según los volúmenes del mismo y según sus características y sustrato de origen. Los precios de venta al detalle de este producto pueden ascender a \$20.000 el kilogramo, lo cual, contrastado al bajo precio de compra de las cáscaras de nueces, deja en evidencia el marcado valor agregado que adquiere este desecho agropecuario, prometiendo una buena rentabilidad a la producción del mismo.

2.7 Bibliografía

1. SERVICIO NACIONAL DE ADUANAS. Estadísticas, Estudios y Publicaciones. [en línea] Chile. Agosto, 2010 [citado Agosto 9, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://www.aduana.cl/prontus_aduana/site/edic/base/port/list_estadisticas.html

2. DE LA CERDA, Marcela. 2009. “Factibilidad técnica-económica de planta de carbón activo”. Aplicación: Decoloración y clasificación. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso, Chile. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

3. LEÓN, Marcelo. 2008. Producción de Carbón Activo a Partir de Cáscaras de Nueces: Vía Activación Química y Física. Informe Investigación y Proyecto III. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. 61 p.

4. ACUARIOVISION, Acuarismo regional. Tetratéc carbón Activado. [en línea] Chile. Agosto, 2010 [citado Agosto 9, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://www.acuariovision.com//catalogo/catalog/product_info.php?products_id=1619

5. AQUAPLANT ® CHILE, Acuarismo regional. Azoo Carbon Super Activado 250 grs [en línea] Chile. 2010 [citado Agosto 9, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://www.aquaplant.cl/store/view_product.php?product=1472&PHPSESSID=d30920178df1be125021896a40de9595

6. PUENTES, Elena. Informe Anual Mercado Nueces de Nogal Chilena. [en línea]. CHILENUT, Chile. Febrero, 2010 [citado Agosto 10, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.chilenut.cl/archivos/anual%20nueces%202009.pdf>

Capítulo 3. Diseño del Reactor

3.1 Introducción

El objetivo principal de este Proyecto de Título, que nació como una idea en el curso de Investigación y Proyecto II, luego se prosiguió en Investigación y Proyecto III y ahora se finaliza en este trabajo, es el diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor de activación térmica de carbón, por lo que éste capítulo contiene la esencia del presente proyecto.

Para llegar al diseño final aquí presentado fue necesario superar una serie de pasos y tomar decisiones sobre el equipo más adecuado.

En una primera instancia, pensando en la implementación industrial del proceso, se pensó en un reactor continuo, pero sin llegar a concretar finalmente el diseño inicial.

Luego de estudiar diversos ensayos y publicaciones sobre el tema, y ya teniendo en mente la idea futura de construir y probar el equipo que se diseñara, se optó por un equipo batch, de más fácil manejo en el laboratorio, con el cual se pudieran realizar pruebas controladas.

El capítulo que inicia a continuación refleja todo el trabajo efectuado en el diseño, construcción y puesta en marcha de dicho reactor.

3.2 Pasos iniciales en el diseño de un reactor continuo

La primera idea de diseño, pensando en la implementación del proceso en una industria de operación continua, fue de un reactor continuo de activación.

La idea consistía en una tolva en donde se alimentaran las cáscaras de nueces molidas, que las conduciría a un cuerpo cilíndrico calefaccionado, al cual se inyectaría vapor de agua desde una línea de vapor ubicada en el exterior.

La base de este diseño descansaba en el sistema impulsor de las cáscaras de nueces a lo largo del cuerpo del reactor a medida que tuviera lugar la pirólisis seguida de la activación térmica, etapas divididas en 2 cámaras separadas al interior de la carcasa, el cual se diseñó como un tornillo sinfín o tornillo de Arquímedes.

Se realizó el diseño del tornillo a partir del catálogo de la empresa GOODMAN CONVEYOR¹ para un flujo de carbón de 5 [kg/h], del cual se debe seleccionar el material a transportar para obtener sus características, conociéndose así el tornillo necesario y sus especificaciones.

La cantidad de carbón que desea producirse es baja, ya que sólo tendrá fines de estudio, razón por lo que se estimó que 5 [kg/h] serían aceptables, lo cual equivale a 11 [lb/h], y utilizando la densidad aparente del material extraída del mismo catálogo, se estima que este valor correspondería a 0,525 [pie³/h]

A partir de las necesidades de carga se determina que es necesario un tornillo alimentador de 6 pulgadas de diámetro, siendo la velocidad requerida la siguiente:

$$N = 0.2 \text{ RPM}$$

El esquema del tornillo alimentador seleccionado se entrega en la figura 3.1:

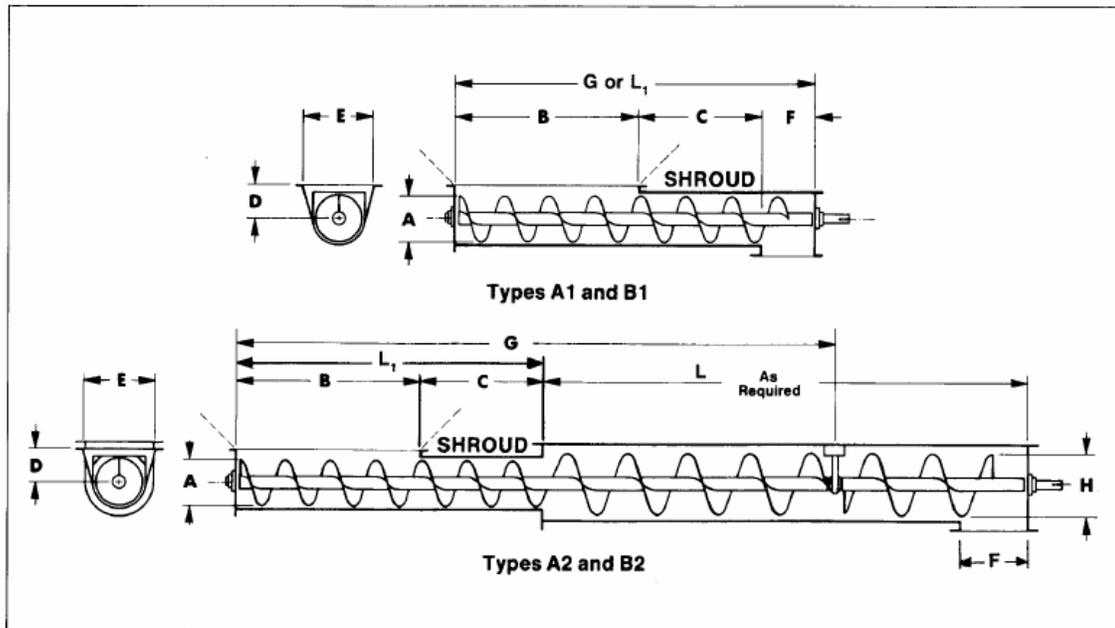


Figura 3.1: Esquema del tornillo alimentador. ¹

Sin embargo, este diseño presentaba los inconvenientes de no poseer un cierre hermético, lo que provocaría el escape de vapor de agua, así como la imposibilidad de aislar la sección en donde se llevaría a cabo la pirólisis del ingreso de vapor de agua que se estaría inyectado en la cámara de activación, sin mencionar los elevados costos del tornillo sin fin, el cual debía confeccionarse en su totalidad en acero inoxidable dada la alta corrosividad que debería soportar. Por todas las razones anteriores este diseño de reactor fue descartado.

Para detalles de cálculos, consultar el Apéndice A, sección A.1.

3.3 Diseño del Reactor Batch

Luego de descartar el diseño de un reactor continuo, la opción más atractiva de diseño correspondía a la de un reactor batch, principalmente debido a la practicidad de su manejo en pruebas de laboratorio y operación controlada.

La primera alternativa, y ampliamente utilizada en la actualidad en empresas productoras de carbón activado fue la de un reactor de horno rotatorio, consistente de un tambor rotatorio calefaccionado por combustión en su parte inferior, al cual se inyecta vapor de agua desde una línea externa.

Este diseño, pese a estar ampliamente difundido, fue descartado debido a la suposición de que la rotación del tambor provocaría roce y choques entre las partículas de carbón de cáscaras de nueces, de por sí ya porosas de forma natural, destruyendo así parte de la estructura porosa y disminuyendo la capacidad adsorbente del carbón producido.

La siguiente alternativa de diseño, que finalmente fue la que se llevó a cabo, correspondía a un reactor consistente en un árbol de platos interior, en donde descansaran las cáscaras de nueces en la superficie de platos de malla de acero inoxidable, presentando un bajo espesor de torta por plato, permitiendo de esta forma difundir al vapor de agua consiguiendo una activación homogénea del carbón, emulando de alguna manera el funcionamiento de un reactor de lecho fluidizado.

En dicho reactor se llevarán a cabo las dos etapas necesarias para transformar las cáscaras de nueces en carbón activado, es decir, en primera instancia tendrá lugar la pirólisis, a temperatura controlada y en ausencia de vapor de agua, y posteriormente se llevará a cabo la activación térmica, momento en el cual la temperatura se elevará hasta obtener la temperatura necesaria para que la reacción tenga lugar y se alimentará el vapor de agua necesario.

3.3.1 Introducción

Una de las mayores dificultades en la activación de carbón es que pese a conocerse la reacción química llevada a cabo, es decir, la combustión parcial del carbono empleando vapor de agua como agente oxidante, la porosidad obtenida depende del tiempo y parámetros de reacción y variará en cada escenario de trabajo, consiguiéndose establecer finalmente las condiciones de activación óptimas de manera empírica una vez montado el sistema.

Teniendo la idea anterior en mente, tanto la capacidad de cáscaras de nueces y la distribución de platos se determinaron de manera tentativa, siendo el punto de partida para el diseño, los que gobernarán los siguientes cálculos hasta obtener el diseño final.

Partiendo de la base de crear un diseño de costos no muy elevados, se seleccionó un tubo comercial para la carcasa, con capacidad interna suficiente para activar una cantidad de carbón considerable para efectuar pruebas de laboratorio. La elección fue cañería comercial de acero inoxidable AISI 304 DN 4 pulgadas (diámetro externo 114,3 mm) Sch. 40 (6,02 mm espesor).

A continuación, considerando la elevada temperatura a la que tiene lugar la reacción, fue necesario calcular el coeficiente de dilatación térmica del acero, tanto de la carcasa como de los platos del árbol, para de esta manera obtener el máximo diámetro permisible del plato y calcular el área de la torta de cáscaras de nueces, y considerando un alto de torta de 5 milímetros, finalmente pudo obtenerse el volumen de la torta de cáscaras por plato, el cual resultó ser de 35,48 cm³.

Posteriormente, trabajando con la densidad aparente de las cáscaras de nueces obtenida del catálogo de GOODMAN para diseño de tornillos sinfín explicado en la sección anterior, se obtiene la masa de cáscaras por plato, la cual resultó ser de 11,92 gramos.

El paso siguiente fue determinar el alto del reactor, el cual, siguiendo con la línea de una estimación tentativa de la capacidad, y atendiendo a disminuir el presupuesto, se seleccionó de

30 centímetros, con un espacio entre platos de 3 centímetros, pudiendo determinarse que la cantidad total de platos sería de 9.

3.3.2 Diseño Operativo

El primer paso consiste en determinar la masa de cáscaras de nueces que serán transformadas en carbón activo. Para ello es necesario determinar las dimensiones de la carcasa:

Carcasa: Cañería comercial de acero inoxidable AISI 304 DN 4 pulgadas (diámetro externo 114,3 mm) Sch. 40 (6,02 mm espesor).

Se calcula el diámetro interno de la carcasa, que será el espacio ocupado por los platos que se llenarán con el precursor restando 2 veces el espesor de pared al diámetro externo de la cañería comercial:

$$\text{Diámetro interno carcasa: } 114,3 - 2 \cdot 6,02 = 102,26 \text{ mm}$$

No obstante, este valor no corresponderá directamente al diámetro que tendrán los platos, ya que debido a las altas temperaturas de trabajo, la dilatación térmica del material será considerable, por lo que se hace necesario su cálculo:

$$\text{Dilatación térmica lineal: } \alpha \cdot \Delta T \cdot L_0$$

En donde,

α = coeficiente de dilatación lineal

ΔT = diferencia de temperaturas

L_0 = largo inicial ⁽²⁾

Se tienen los siguientes parámetros:

Coefficiente de dilatación lineal del acero inoxidable (α): $1,73 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Temperatura de las resistencias calefactoras: 750°C

Temperatura ambiente promedio: 20°C

Reemplazando en la ecuación de dilatación térmica se obtiene la dilatación máxima al interior de la carcasa:

$$\text{Dilatación: } 1,73 \cdot 10^{-5} \cdot (750-20) \cdot 102,26 = 1,29 \text{ mm}$$

Por lo tanto, dicho valor debe dejarse como claro entre los platos y la carcasa, por lo que descontándose al diámetro interno de la carcasa se obtiene el diámetro máximo permisible para los platos:

$$\text{Diámetro permisible: } 102,26 - 1,29 = 100,97 \text{ mm}$$

Aunque por conceptos de seguridad, dicho claro será ligeramente sobredimensionado:

Claro (espacio) de seguridad: 1,5 mm por lado

Diámetro platos: 98 mm

A continuación, para calcular el área efectiva de los platos que será ocupada por las cáscaras de nueces debe descontarse el diámetro del eje:

Diámetro del eje: $3/8$ pulgada = 9,525 mm (4,763 mm de radio)

Nuevamente, debido a las altas temperaturas, es recomendable considerar la dilatación térmica. En este caso se calculará la dilatación superficial que experimentará el eje transversalmente, para lo cual se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Dilatación térmica superficial: } 2 \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot A_0$$

En donde,

α = coeficiente de dilatación lineal

ΔT = diferencia de temperaturas

A_0 = área inicial ⁽²⁾

Reemplazando los datos ya mencionados en la fórmula se obtiene la dilatación superficial transversal del eje:

$$\text{Dilatación del eje: } 2 \cdot 1,73 \cdot 10^{-5} \cdot (750-20) \cdot \pi \cdot 4,763^2 = 1,8 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, sumando la superficie dilatada a la superficie inicial del eje y despejando el radio, se obtiene el radio (o bien el diámetro) del eje una vez dilatado:

$$\text{Diámetro del eje dilatado: } \pi \cdot 4,763^2 + 1,8 = \pi \cdot r_f^2 \Rightarrow d_f = 9,65 \text{ mm}$$

Descontando el diámetro inicial del eje del diámetro dilatado se obtiene el claro de seguridad que debe dejarse, y a su vez se obtiene el diámetro interno recomendado de los platos:

Claro (espacio) de seguridad: 0,9 mm por lado

Diámetro interno anillo interior plato: 11,5 mm

Recopilando, se cuenta con los siguientes datos para el diseño de los platos:

Espesor anillos del plato: 1 mm

Diámetro interno anillo exterior plato: 96 mm

Diámetro externo anillo interior plato: 13,5 mm

Alto torta de cáscaras por plato: 5 mm

Reemplazando los datos en la fórmula para el cálculo de volumen de un cilindro hueco se obtiene el volumen que ocuparán las cáscaras de nueces por plato:

$$\text{Volumen de cáscaras: } 0,5 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{9,6}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{1,35}{2} \right)^2 \right) = 35,48 \text{ cm}^3$$

Del catálogo de GOODMAN¹ se obtuvo la densidad aparente de las cáscaras, que resulta ser de 0,336 g/cm³, la cual arrojará la masa de cáscaras por plato al multiplicarla por el volumen recién calculado:

$$\text{Masa cáscaras por plato: } 0,336 \cdot 35,48 = 11,92 \text{ g}$$

De trabajos anteriores sobre el carbón de cáscaras de nueces, se sabe que la eficiencia de la pirólisis de este sustrato es del 33,22%, valor que al multiplicarlo por la masa de cáscaras arrojará la masa de carbón que se obtendrá finalmente por plato³:

$$\text{Masa carbón: } 0,3322 \cdot 11,92 = 3,96 \text{ g}$$

Los cálculos anteriores se hicieron por plato. Para determinar la masa total es necesario conocer la cantidad de platos, la cual se calcula a partir del alto del reactor. Se tienen los siguientes parámetros:

Alto reactor: 30 cm

Distancia entre platos: 3 cm

Distancia entre último plato y extremos: 3 cm

Por lo tanto:

$$\text{Número de platos: } \frac{30 - 2 \cdot 3}{3} + 1 = 9$$

Y luego:

$$\text{Masa carbón total: } 9 \cdot 3,96 = 35,64 \text{ g}$$

Ahora bien, si consideramos que la compactación de partículas está relacionada a la eficiencia de la pirólisis, luego de carbonizadas las cáscaras de nueces quedará un gran espacio sin utilizar en cada plato por concepto de compactación debido a la eliminación de volátiles y otros gases, ya que el volumen del carbón se espera sea inferior al volumen ocupado inicialmente por las cáscaras.

Para hacer un mejor uso del vapor de agua y del tiempo de activación térmica, se considera en el diseño del reactor una doble etapa de pirólisis previa a la activación, en la cual, luego de una primera pirólisis, el reactor será vaciado, vuelto a cargar con cáscaras de nueces a capacidad completa, y luego de realizada esta nueva etapa de pirólisis se rellenará con el carbón de la primera etapa para dar paso al proceso de activación.

Con este paso de optimización, el carbón producido será de:

$$\text{Masa carbón total: } 9 \cdot 2 \cdot 3,96 = 71,28g$$

Que será el valor empleado para todos los cálculos de diseño.

Cabe señalar que este paso es sólo opcional, ya que perfectamente puede realizarse la pirólisis y posterior activación térmica con sólo una carga de cáscaras de nueces al reactor.

El resumen de los datos operativos del reactor se presenta en la tabla 3.1:

Propiedad	Valor
Masa de cáscaras de nueces por plato por etapa	11,92 g
Masa de cáscaras de nueces totales por etapa	107,28 g
Masa de carbón por plato	7,92 g
Masa de carbón total	71,28 g
Cantidad de platos	9
Temperatura de pirólisis	350°C
Temperatura de activación	600°C
Presión de trabajo	1 atm

Tabla 3.1: Datos de diseño y operativos del reactor.

3.3.3 Diseño Mecánico

Para confeccionar el diseño mecánico del reactor, en primer lugar fue necesario definir la presión de trabajo, la cual vendría dictada por las condiciones necesarias para la reacción y los equipos disponibles en laboratorio.

La reacción de activación térmica del carbono no requiere un ambiente presurizado para llevarse a cabo, siendo la elevada temperatura su único requerimiento. Lo anterior, sumado al hecho de que el generador de vapor presente en la escuela no es capaz de entregar vapor presurizado hacen que el diseño se lleve a cabo a presión atmosférica, lo cual permitirá trabajar con bajos espesores de pared.

Aplicando la ecuación de ASME para obtener el espesor de carcasa necesario para un equipo cilíndrico operando a presión interna se determina que el espesor requerido es de 1,2 milímetros, mucho menor a los 6,02 milímetros que posee la cañería comercial seleccionada, por lo que no existen problemas de diseño.

Como cabezales del equipo se decidió emplear tapas planas apernadas y calcular su espesor empleando la ecuación de diseño ASME, tras lo cual se obtuvo un espesor mínimo recomendado de 3 milímetros.

El anterior corresponde al espesor necesario para soportar la presión de trabajo. Sin embargo, debido a las altas temperaturas, es recomendable emplear un espesor mucho mayor para evitar el efecto de pandeo, por lo que el espesor real utilizado es de 10 mm.

Por otra parte, originalmente se consideró inyectar el vapor de agua proveniente del generador de vapor a través de una cañería soldada transversalmente al exterior de la carcasa, realizando orificios en la misma cañería y haciéndolos coincidir con una hilera de orificios en la carcasa, similar al sistema de toberas por las cuales se inyecta aire enriquecido a los hornos de fundición.

No obstante, este diseño presentaba dos inconvenientes. El primero consistía en la necesidad de rotación de los platos debido a que el vapor no se inyectaría de forma homogénea, sino que ingresaría únicamente por una línea a lo largo de la carcasa, para lo cual se hacía necesario unir el eje del árbol de platos a un motor eléctrico al exterior del reactor, lo cual traía consigo un incremento en los gastos por concepto de compra del motor eléctrico además de existir la necesidad de existir un orificio en la tapa inferior por donde conectar el eje de rotación, lo cual conllevaría una pérdida de hermeticidad, implicando el uso de empaquetaduras grafitadas para subsanar dicho problema.

El segundo inconveniente, y probablemente el más importante, era que debido a las pequeñas dimensiones de diseño del reactor, hacer coincidir exactamente la línea de orificios de la cañería, orificios de diámetro no superior a 2 milímetros, con la hilera de toberas de la carcasa sería una tarea casi imposible de conseguir por parte de la maestranza. Por lo tanto, considerando los dos inconvenientes mencionados, este diseño de inyección de vapor fue descartado.

La segunda alternativa, de mucho más fácil diseño y construcción, que fue la que finalmente se llevó a cabo, fue la incorporación de una chaqueta a la carcasa del reactor, a través de la cual se inyectara el vapor de manera homogénea al interior del mismo.

Para el cálculo del espesor de la chaqueta nuevamente se empleó la ecuación de diseño ASME para cilindros trabajando a presión interna, considerando los mismos parámetros que para el cálculo del espesor de pared de la carcasa.

Por lo tanto, el mecanismo de inyección de vapor finalmente consistirá en un orificio lateral a la chaqueta con hilo NPT de $\frac{1}{2}$ pulgada, al cual se conectará la línea de vapor y por donde ingresará al provenir del generador de vapor. Por su parte, la carcasa estará dotada de pequeños orificios distribuidos de manera uniforme por toda su superficie, a través de los cuales el vapor ingresará de manera homogénea al interior del reactor, eliminando de esta manera la necesidad de rotación de los platos.

Se confeccionaron tres planos de AutoCAD, acotados completamente en milímetros: uno con el detalle acotado de la carcasa y tapas (plano 1), un segundo con el detalle acotado de las estructuras internas del equipo (plano 2), y un tercero con la distribución de los agujeros en la carcasa por los cuales ingresará el vapor proveniente de la chaqueta (plano 3). Los mismos se presentan en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4, mientras que todos los detalles de cálculos se presentan en el Apéndice A, sección A.2.

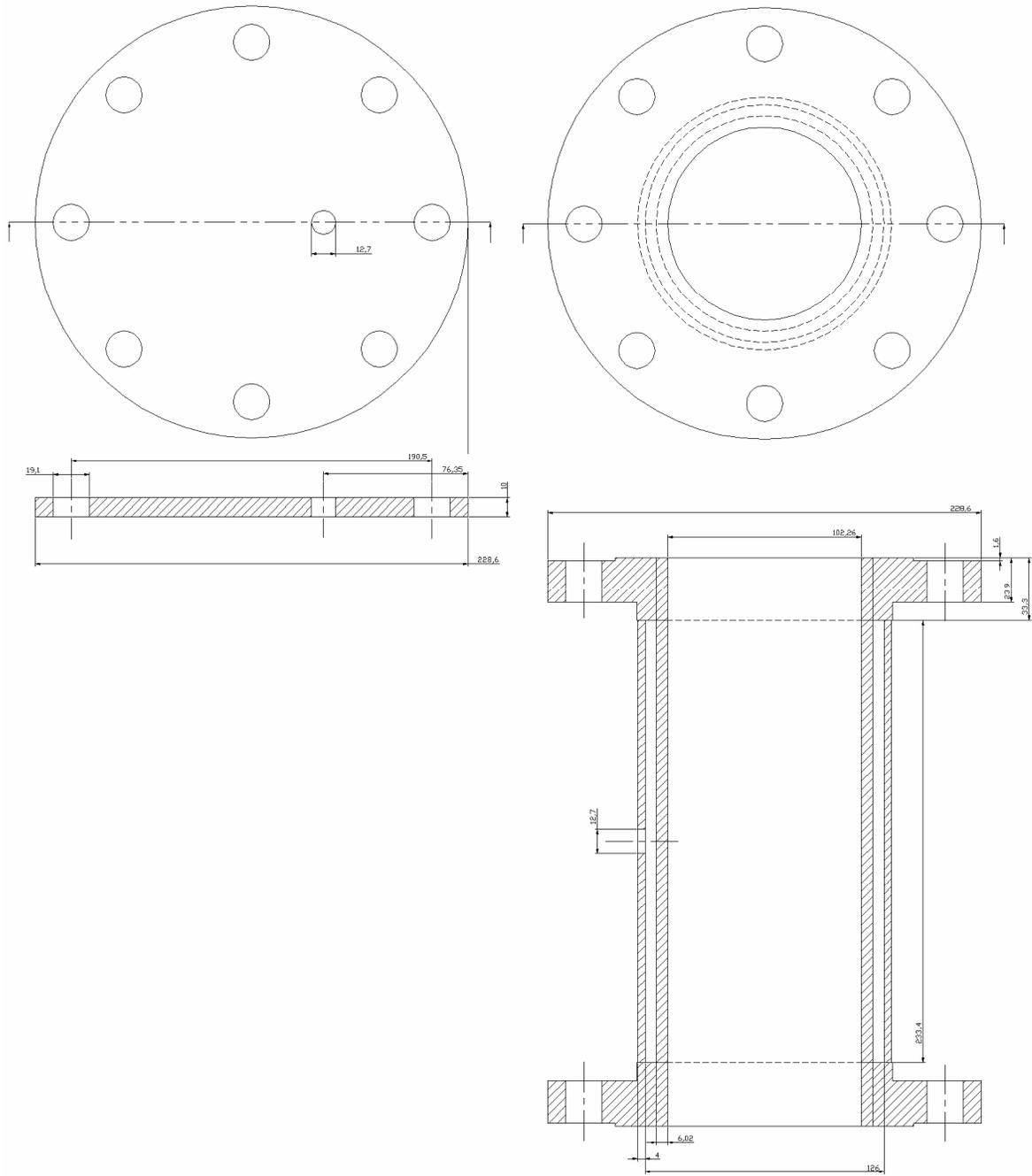


Figura 3.2: Plano 1

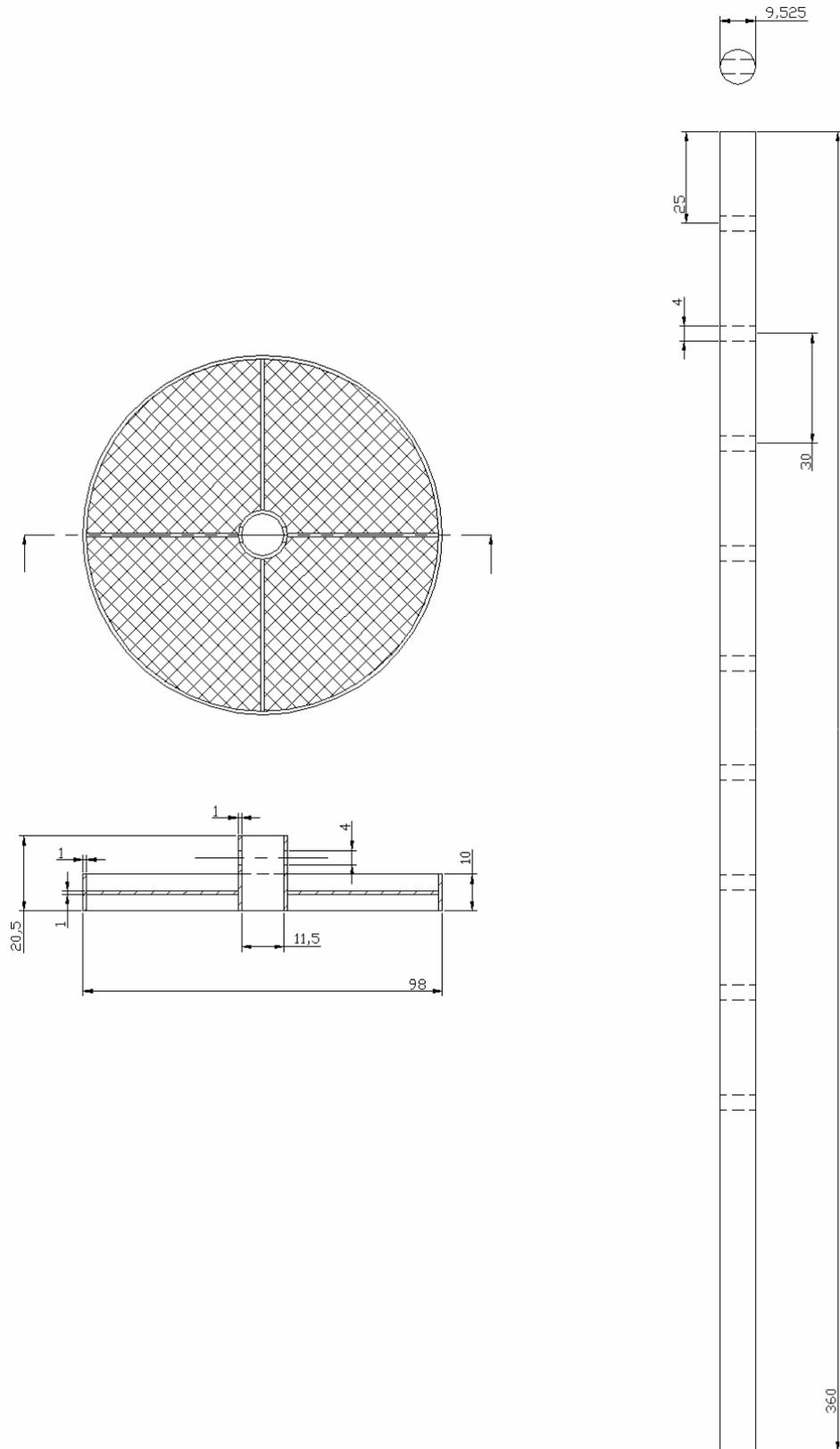


Figura 3.3: Plano 2

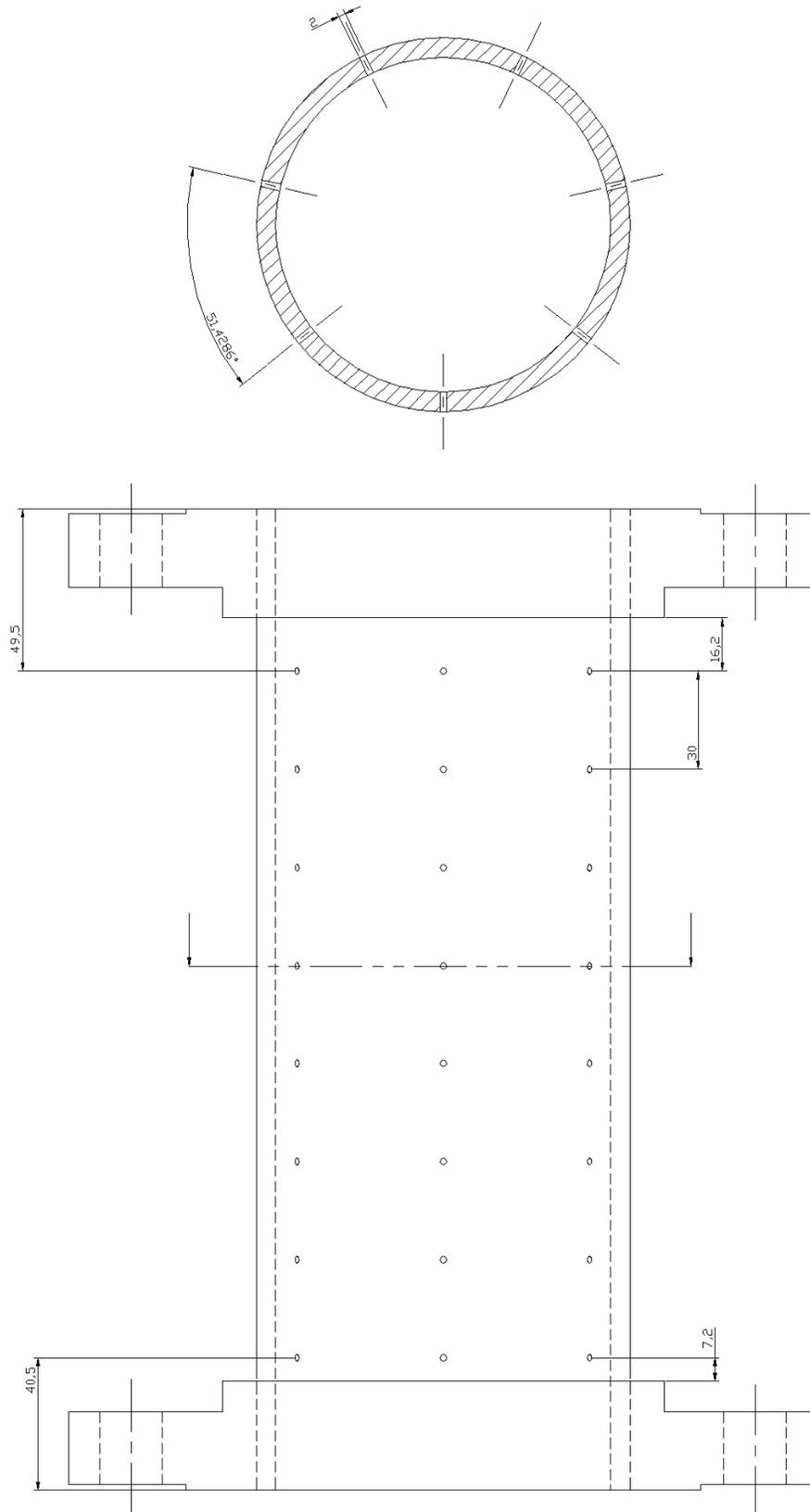


Figura 3.4: Plano 3

3.4 Montaje y Puesta en Marcha

Los datos de diseño finales para el reactor se resumen a continuación:

- Material: Acero inoxidable AISI 304
- Partes independientes:
 - 1 Carcasa (encamisada y con flanges soldados)
 - 9 Platos
 - 1 Eje central
 - 2 Tapas planas

Datos de diseño del reactor:

- La superficie de los platos será malla de acero inoxidable de 1 mm de abertura (Malla ASTM 18).
- La carcasa será de cañería comercial de acero inoxidable AISI 304 DN 4 pulgadas (diámetro externo 114,3 mm) Sch. 40 (6,02 mm espesor).
- Los flanges irán soldados a la carcasa. Se emplearán flanges slip-on de acero inoxidable AISI 304 DN 4 pulgadas (8 orificios de 0,75 pulgadas de diámetro) de 150 [lb].
- El eje central será una barra de acero inoxidable AISI 304 de 3/8 pulgadas de diámetro.
- La chaqueta será confeccionada a partir de plancha de acero al carbono de 4 mm de espesor, con un diámetro interno de 126 mm y un diámetro externo de 134 mm, e irá soldada a los flanges.

- La carcasa poseerá orificios de 2 mm de diámetro para el ingreso del vapor desde la camisa.
- Las tapas planas tendrán 1 cm de espesor para evitar el efecto de pandeo producto de las elevadas temperaturas de trabajo.

Datos del Piping:

- Como conectores de las cañerías a la tapa superiores y a la camisa se emplearán nipples con hilo macho NPT de ½ pulgada.
- Para las conexiones entre cañerías se emplearán uniones americanas de hilo NPT de ½ pulgada.

La orden de construcción y compra fue enviada a Bettoli S.A. ubicada en Los Carrera #0895, Quilpué, en marzo de 2010, estando ya construido el equipo a principios de abril. No obstante, a causa de error en la información, la soldadura interna de la malla de los platos se efectuó con soldadura de bajo punto de fusión, no pudiendo este material soportar las altas temperaturas de trabajo que la activación térmica del carbón requiere.

A causa de lo anterior, en una visita a las instalaciones de Bettoli S.A. para efectuar pruebas de control de presión al equipo, se dieron instrucciones de reemplazo del sistema de soldadura de la malla por uno de remachado, eliminando los restos de soldadura para evitar contaminación del producto al momento de iniciar la operación normal del reactor.

Ya a fines del mes de abril el reactor fue terminado por Bettoli S.A., pudiendo ir a recogerlo de manera particular a sus talleres ubicados en Quilpué.

El reactor recibido consistía en el equipo con sus respectivas estructuras interiores, por lo que la siguiente etapa era realizar todas las conexiones oleohidráulicas y calefactoras, lo cual se dio inicio en el Laboratorio 8 de la Escuela de Ingeniería Química de la PUCV.

3.4.1 Montaje del sistema calefactor

Para la calefacción del reactor de activación, a diferencia de otros reactores similares diseñados, no se empleará combustión, sino que se empleará el calor generado por el paso de la corriente eléctrica a través de resistencias calefactoras.

Las resistencias comerciales más comúnmente encontradas corresponden a un alambre embobinado de una aleación níquel-cromo, conocido como “nicrón” (por los metales que lo constituyen). La proporción usada es de 80% de Ni y 20% de Cr. ⁴

Esta aleación presenta buena resistencia a la oxidación superficial, lo cual le permite trabajar a altas temperaturas, llegando a 1068°C, razón por la cual es empleada como sistema calefactor de estufas eléctricas, hornos, cocinillas, etc. ⁵

Las resistencias compradas presentan las siguientes especificaciones:

Potencia nominal: 1000 W

Resistencia: 43 Ω

El sistema de aislamiento térmico consiste en ladrillos refractarios, similar al interior de las muflas, para lo cual se compraron en SODIMAC Constructor de Valparaíso un total de 3 paquetes de 6 ladrillos refractarios cada uno, ya que para conseguir rodear el diámetro de la camisa del reactor se necesitan 2 ladrillos dispuestos horizontalmente, y para cubrir el alto son necesarios 7 ladrillos apilados verticalmente, dando un total de 14 ladrillos necesarios.

Una vez adquiridos los ladrillos se efectuó el orificio central en donde se ubicaría el reactor, siendo necesario recortar media circunferencia en cada uno de los ladrillos dispuestos horizontalmente, para que al unirlos dieran como resultado la circunferencia que sería ocupada por la camisa del reactor.

Debido a la dureza de los refractarios no fue posible realizar los cortes con sierra, ni siquiera con caladora para metales, por lo que el método adoptado finalmente consistió en hacer perforaciones con broca para concreto de punta de diamante, debilitando el perímetro de la semicircunferencia a retirar, y luego extrayéndola con un golpe de martillo.

Una vez repetida la operación para los 14 refractarios, los mismos fueron pulidos con un esmeril para taladro dejando así el espacio para el reactor con una superficie limpia.

El paso siguiente fue pegar los ladrillos refractarios. Para este objetivo no se recomienda utilizar cemento tradicional, sino cemento refractario, también conocido como cemento llama o mortero refractario, el cual resiste mayores temperaturas de operación.

Para la aplicación del mortero se recomienda limpiar completamente la superficie de aplicación con agua, de manera de asegurar la ausencia de polvo, incluso empleando ácido muriático en caso de existir residuos grasos, el cual no fue el caso. Luego de limpiar las superficies de la totalidad de los refractarios y pegarlos con el mortero, el fragüe mínimo recomendado es de dos días, pero a causa de las bajas temperaturas y humedad ambiental, el tiempo total de secado final resultó ser de una semana.

Los refractarios se pegaron en pilas de 7 ladrillos verticales, de manera de confeccionar 2 mitades de aislante y así poder montar o desmontar el sistema para posibles mantenimientos futuros.

Una vez pegadas y secas las 2 mitades se retiraron los excedentes y rebabas del mortero refractario para realizar los surcos o canales en la cara interior de los refractarios en donde se montarían las resistencias calefactoras. Con este objetivo se utilizó un esmeril para taladro, desgastando el ladrillo generando así los surcos.

A continuación, se estiró el alambre embobinado que conforma las resistencias para dar el largo apropiado a los surcos de los ladrillos y que quedara un excedente fuera de los mismos lo suficientemente largo como para realizar las conexiones eléctricas en el exterior, adhiriendo

las resistencias a los surcos con una mezcla más diluida de mortero refractario, el cual se limpió de la cara visible de las resistencias una vez pasada otra semana, tiempo necesario para que la mezcla estuviera libre de humedad. Lo anterior se muestra en las figuras 3.5 y 3.6.



Figura 3.5: Cuerpos calefactores situados a ambos lados del reactor.



Figura 3.6: Cuerpos calefactores montados.

Una vez instalado y dispuesto el sistema calefactor se procedió a realizar la instalación eléctrica del controlador de temperatura. El sistema controlador cuenta de 3 partes: PLC, base para controlador (de 11 pines) y relé.

La instalación del controlador de temperatura sería normalmente encargada a un eléctrico. No obstante, en el Laboratorio 4 de la Escuela de Ingeniería Química se encuentra presente un reactor de síntesis de amoníaco, el cual cuenta con un sistema controlador de temperatura idéntico al que se buscaba instalar en el reactor de activación de carbón, por lo que se confeccionó un plano eléctrico de la instalación para luego repetirse en el reactor propio.

La instalación consta básicamente de 4 partes: conexiones eléctricas de la termocupla a la base para controlador, conexiones eléctricas a la toma de corriente de 220 V desde el relé y la base para controlador, conexiones eléctricas a las resistencias calefactoras desde la base para controlador y el relé y finalmente y como es obvio, conexiones eléctricas entre los 3 componentes que conforman el sistema controlador de temperatura.

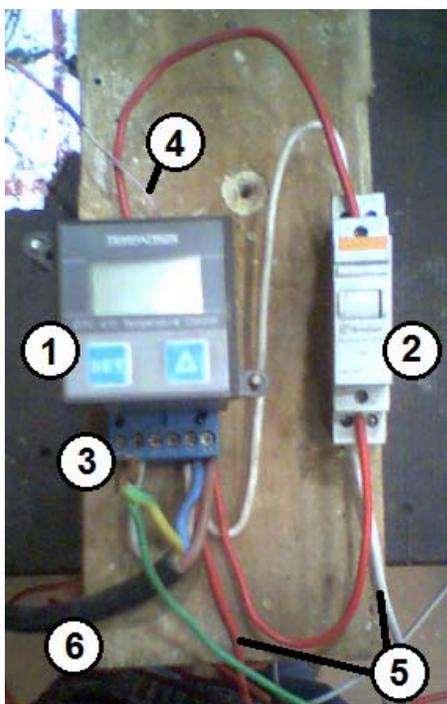


Figura 3.7: Sistema controlador de temperatura.

1. PLC.
2. Relé.
3. Base para controlador
4. Cables de la termocupla.
5. Cables a los nicrones.
6. Cable alimentador de corriente.

3.4.2 Montaje del piping

Para el piping que conectaría el generador de vapor con el reactor se decidió emplear cañería de cobre, ya que es una buena opción para transportar vapor saturado a presión atmosférica.

La salida del generador de vapor ya contaba con una cañería dotada de hilo macho NPT de ½ pulgada, por lo que se empleó una unión americana para conectar la cañería de cobre de ½ pulgada nominal.

Tal como se señala en el diseño del reactor, la camisa cuenta con un orificio para la alimentación del vapor con hilo hembra NPT de ½ pulgada, por lo que se insertó un niple de dicha medida, al cual se unió la cañería mediante otra unión americana de ½ pulgada.

Debido a la diferencia de alturas entre la salida del generador de vapor y la alimentación de vapor del reactor fue necesario ensamblar las cañerías usando 2 codos para conseguir la altura necesaria. No obstante, para prevenir pequeños cambios de nivel y evitar la rigidez de las cañerías soldadas con estaño, entre la salida del generador de vapor y la línea de cañería se añadió un flexible para agua, que es posible que sea necesario reemplazarlo después de algunos usos ya que la goma interior se irá quemando a causa de la temperatura del vapor, pero no será tan a menudo debido a que el rango de temperatura de trabajo recomendado no está tan alejado de la temperatura del vapor saturado.

El sistema de cañerías montado se observa en la figura 3.8.



Figura 3.8: Sistema de cañería de cobre montado.

Finalmente, al momento ya de montar completamente el reactor, se debió considerar el uso de empaquetaduras en las tapas para evitar fugas de vapor de agua en la etapa de activación térmica u otros gases propios de la combustión o el ingreso de aire en la etapa de pirólisis, evitando de esta forma la formación de óxidos superficiales.

La alternativa elegida para este propósito se cotizó y adquirió en VENTEC S.A., y corresponden a empaquetaduras del catálogo de productos TEADIC® estandarizadas para uso en flanges tipo slip-on construidas en acero AISI 304, identificadas por cinta metálica amarilla.

3.4.3 Puesta en Marcha del Reactor

El lugar de trabajo asignado en un principio fue el Laboratorio 8. Fue aquí donde se efectuó todo el montaje señalado anteriormente.

No obstante, al conectar el sistema calefactor a la toma de corriente y ponerla en funcionamiento, apenas pasado un momento saltaba el automático.

Investigando las razones se determinó que el automático instalado en dicho laboratorio es de 10 Amperes, no pudiendo tolerar el elevado consumo eléctrico del sistema calefactor de 15,36 Amperes, cuyos cálculos se presentan en el Apéndice A, sección A.3.

La primera solución planteada fue reemplazar dicho automático por uno de mayor capacidad. No obstante, este automático se alimenta de una línea que otorga corriente eléctrica a otras instalaciones aledañas, el cual también pasa por un automático de 10 Amperes, por lo que reemplazar el automático correspondiente al Laboratorio 8 no solucionaría el problema, sino que simplemente lo trasladaría a este nuevo punto, siendo ya más complicado reemplazar esta otra instalación eléctrica.

Una solución alternativa planteada, que fue la que finalmente se llevó a cabo, fue trasladar todos los equipos al Laboratorio de Operaciones Unitarias y trabajar definitivamente allí, ya que debido al alto consumo eléctrico de los aparatos dispuestos allí, los automáticos instalados soportan una intensidad de corriente de 20 Amperes, no debiendo existir problemas eléctricos.

Una vez montados los equipos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, se conectaron de manera simultánea el generador de vapor y el sistema calefactor a la toma de corriente, no exhibiéndose ningún problema y quedando de esta forma el sistema dispuesto para iniciar su funcionamiento.

3.4.4 Puesta en Marcha del Evaporador

El trabajo también contempló la puesta en marcha del generador de vapor anteriormente ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química.

En primer lugar, el equipo se retiró de su emplazamiento en el tercer nivel de la estructura metálica posterior del Laboratorio, el cual era incómodo y de difícil acceso para su estudio y desarme, y se trasladó al Laboratorio 4 para realizarle las pruebas necesarias.

Una vez allí, la primera acción fue instalarle un enchufe, puesto que originalmente estaba conectado directamente a la línea eléctrica, lo cual permitiría desconectarlo en caso de fallas eléctricas.

Como al intentar encenderlo no pareció funcionar, se le encargó a un eléctrico su diagnóstico y reparaciones de ser necesarias, tras lo cual volvió a intentar encenderse.

Esta vez si se obtuvieron resultados, es decir, el agua se calentó hasta su punto de ebullición, sin embargo, no parecía existir ningún tipo de control del nivel de líquido en el contenedor ni manera de volver a llenarlo evitando rebalses, por lo que se consultó nuevamente al eléctrico, suponiendo que existía alguna bomba con este propósito que pudiera no estar funcionando.

Tras una nueva revisión se determinó que las conexiones de agua estaban mal ubicadas, y luego de ser corregidas el evaporador operó de manera satisfactoria. Esta vez se conectaron de manera correcta el despiche al desagüe y la alimentación fresca de agua a una válvula de solenoide ubicada en el panel posterior del evaporador, la cual es la encargada de mantener el nivel de líquido constante durante la operación del generador de vapor.

Lo anterior se logró luego de la reparación de los componentes eléctricos y conexiones eléctricas en mal estado, pero principalmente debido a la reconexión del suministro de agua, el cual, a causa de la ausencia de un manual de instalación, había sido conectada al despiche.

Luego de identificar este problema, se adaptó un componente metálico para conectar la manguera de alimentación de agua a la válvula de solenoide de entrada, la cual afortunadamente se encontraba en buenas condiciones, luego de lo cual el evaporador consiguió mantener un nivel de líquido constante durante su funcionamiento, entregando un flujo uniforme de vapor.

Posteriormente, la cañería de salida de vapor saturado se conectó mediante unión americana de hilo NPT de ½ pulgada a la cañería de cobre que alimentaría de vapor al reactor durante la fase de activación térmica, poniéndolo en funcionamiento para asegurar la ausencia de cualquier tipo de obstrucciones, quedando de esta manera listo y dispuesto para la normal operación del reactor.

3.5 Conclusiones

El contenido citado en el presente capítulo corresponde al resultado de más de un año de trabajo, tanto teórico como experimental, que inició con el diseño de un reactor ficticio en el ramo de Investigación y Proyecto II y culmina con la fabricación y puesta en marcha de un reactor batch con el cual se realizaron pruebas controladas de laboratorio en el actual Proyecto de Título.

Para llegar al diseño que finalmente se mandó a construir fue necesario evaluar variadas alternativas y descartar aquellas que no se adaptaban a los objetivos y al perfil del proyecto, ya sea por los elevados costos o por dificultades de diseño, dando paso al reactor batch de activación térmica construido en acero inoxidable ubicado actualmente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química.

Una ventaja adicional del proyecto consistió en la reactivación de un equipo de propiedad de la Escuela de Ingeniería Química, vale decir, el generador de vapor eléctrico *Sussman*, que no sólo no se encontraba en operación, sino que estaba en mal estado y sus conexiones a la línea de agua no eran correctas, dejándolo ahora en correcto estado y operando.

Gracias a todos los cálculos y consideraciones de diseño, la puesta en marcha no presentó mayores inconvenientes, a excepción de los problemas eléctricos descritos en este capítulo, considerados como imprevistos, ya que escapan al diseño propio del equipo, pero afortunadamente los mismos fueron subsanados cambiando el lugar de trabajo a uno en donde el consumo eléctrico permitido fuera mayor.

Con todo lo anterior, el montaje y la puesta en marcha de los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de activación térmica de carbón de cáscaras de nueces fue todo un éxito.

3.6 Bibliografía

1. GOODMAN CONVEYOR. Screw Conveyors Bucket Elevators Multi-Flo Conveyors. Catalog 200. Goodman Conveyor Co. P.O. Box 866/Route 178 South/Belton, South Carolina 29627, USA.
2. GIMENEZ, Hugo. Dilatación. [en línea] Fisicanet. [citado Octubre 20, 2009]. Disponible en World Wide Web: http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termoestatica/ap05_dilatacion.php
3. LEÓN, Marcelo. 2008. Producción de Carbón Activo a Partir de Cáscaras de Nueces: Vía Activación Química y Física. Informe Investigación y Proyecto III. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. 61 p.
4. YANCHENG HONGTAI ALLOY ELECTRIC APPARATUS CO., LTD. Cr20Ni80 (Nickel-Chrome Wire) [en línea] Yancheng Hongtai Alloy Electric Apparatus Co., Ltd., Yancheng City, Jiangsu Province, China. [citado Septiembre 6, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://www.ychthj.com/en_product_show.asp?id=153

Capítulo 4. Trabajo experimental

4.1 Introducción

En el presente capítulo se describirán las pruebas efectuadas al reactor y generador de vapor hasta conseguir las condiciones de trabajo para las cuales fue diseñado y producir carbón activado a partir de cáscaras de nueces realizando las dos etapas del proceso en el mismo equipo: pirólisis y activación térmica.

Además, se presentará un manual de operación para el equipo diseñado, el cual se confeccionó empíricamente, por ensayo y error, durante las pruebas efectuadas en laboratorio, de manera de facilitar su operación para futuros trabajos e investigaciones en el mismo.

La intención del actual Proyecto de Título no sólo es producir carbón, sino demostrar que efectivamente se ha conseguido su activación, y que el producto final es de calidad comparable a la calidad comercial, por lo que se determinaron su número de azul de metileno e índice de yodo, cuyas pruebas y resultados experimentales se presentarán a continuación de los resultados de la producción de carbón.

Finalmente, y considerando que la idea original del presente trabajo es destinar el carbón activado a aplicaciones en la minería de oro, se realizaron pruebas de adsorción en columna para soluciones de oro y cobre, de manera de comprobar la selectividad sobre uno de los iones.

4.2 Modificaciones a las instalaciones de producción de carbón activado.

Al iniciar las operaciones con los equipos instalados surgieron detalles que no se habían considerado o que se habían pasado por alto durante la puesta en marcha. La corrección de los mismos se expone a continuación.

4.2.1 Modificaciones eléctricas en el sistema calefactor y LOU

Al iniciar la producción de carbón activado se observaron ciertos inconvenientes, siendo el más alarmante la elevada temperatura que alcanzaban los cables eléctricos del sistema calefactor.

Con motivo de lo anterior se consultó bibliografía para determinar la seguridad de la instalación eléctrica del sistema, encontrándose la tabla 4.1 suministrada por la empresa DARTEL:

Tabla N° 8.7
Intensidad de Corriente Admisible para Conductores Aislados
Fabricados según Normas Europeas. Secciones Milimétricas.
Temperatura de Servicio: 70° C; Temperatura Ambiente: 30° C.

Sección nominal [mm ²]	Corriente admisible Amperes [A]		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
0,75	-	12	15
1	11	15	19
1,5	15	19	23
2,5	20	25	32
4	25	34	42
6	33	44	54
10	45	61	73
16	61	82	98
25	83	108	129
35	103	134	158
50	132	167	197
70	164	207	244
95	197	249	291
120	235	291	343
150	-	327	382
185	-	374	436
240	-	442	516
300	-	510	595
400	-	-	708
500	-	-	809

Grupo 1: Conductores monopolares en tuberías.

Grupo 2: Conductores multipolares con cubierta común; cables planos, cables móviles, portátiles y similares.

Grupo 3: Conductores monopolares tendidos libremente al aire con un espacio mínimo entre ellos igual al diámetro del conductor.

Tabla 4.1: Intensidad de corriente admisible para conductores. ¹

El cable empleado para todas las conexiones entre el relé, el PLC y las resistencias calefactoras pertenece al grupo 1, mientras que el cable de conexión a la toma de 220V es cordón, correspondiente al grupo 2, ambos con una sección de 1 milímetro.

Consultando la tabla 4.1 se comprueba que dicha sección es muy baja para un consumo eléctrico tan elevado, por lo que se cambió la instalación en su totalidad (tanto cables de conexión del grupo 1 como cordón de alimentación del grupo 2) a cables de 2,5 milímetros de sección, para tener de esta manera un margen de seguridad considerable.

Conjunto al cambio de cables, se cambió el enchufe macho de alimentación del sistema calefactor para que soportara un consumo de 16 Amperes, el cual es más ancho que el enchufe tradicional de 10 Amperes, para lo cual era necesario cambiar también el enchufe hembra del Laboratorio de Operaciones Unitarias, el cual tenía tamaño sólo para enchufes de 10 Amperes.

Al realizar el cambio en el Laboratorio se descubrió una instalación muy insegura, ya que pese a que el automático corta la corriente con un sobreconsumo a 20 Amperes, el cable caleco entre el panel del automático y los enchufes hembra poseía una sección de 1 milímetro, con lo cual, pese a que el automático permite el paso de 20 Amperes, el caleco, perteneciente al grupo 2, soporta una intensidad de 15 Amperes, por lo que de superarse dicho consumo y ubicándose en un intervalo entre 15 a 20 Amperes, el automático no cortaría la corriente, pero el caleco se estaría sobrecalentando por sobre los 70°C de temperatura de operación normal, lo cual podría haber provocado un accidente eléctrico, razón por la cual dicho caleco se reemplazó por uno de 2,5 milímetros de sección.

4.2.2 Modificaciones a la conexión de vapor

El sistema de cañerías de cobre presentó dos grandes inconvenientes al poner en marcha el proceso. En primer lugar, las conexiones con tuerca sujetas a las puntas de cobre expandido que emulaban uniones americanas presentaban demasiadas fugas debido a la nula hermeticidad del cierre, y en segundo lugar, debido a las altas temperaturas de operación del reactor y a la elevada conductividad térmica del cobre, la cañería completa se calentó en exceso, derritiendo la soldadura de estaño de los codos.

Además de lo anterior, la cañería empleada no permitía ubicar una válvula, con lo cual, los gases calientes provenientes de la pirólisis se devolvían por la cañería, sobrecalentando y derritiendo la goma del flexible para agua usado.

Por todo lo anterior se decidió reemplazar las cañerías de cobre soldadas por cañerías galvanizadas provistas de hilo, más resistentes a la temperatura y de más fácil conexión a los fitting, además de reemplazar el flexible para agua por un flexible para gas, confeccionado en

teflón, que soporta 200°C de temperatura. Se presenta una fotografía del nuevo sistema de cañerías en la figura 4.1, y la explicación detallada de cada componente a continuación:



Figura 4.1: Cañerías de conexión de vapor.

En primer lugar, la cañería de salida del evaporador, provista de HE (hilo exterior) se conecta con un codo galvanizado con HI (hilo interior) al flexible de teflón HE-HE.

A continuación se conecta el flexible a través de una unión americana galvanizada HI con asiento cónico de bronce para evitar fugas de vapor, a una extensión de cañería de 10 centímetros HE-HE, la cual se conecta mediante otro codo a una extensión de cañería de 30 centímetros, conectada a una Té provista de HI.

La citada Té se conecta hacia abajo mediante un niple con tuerca central a una válvula de globo, la cual funcionará como despiche para eliminar el primer condensado que se forma en el normal funcionamiento del evaporador, y hacia el costado mediante otro niple con tuerca central a una válvula de corte lento, con asiento cónico de bronce para regular el paso de vapor hacia el evaporador en la etapa de activación y para evitar el retorno de los gases calientes en la etapa de pirólisis.

Finalmente, la válvula de corte lento se conecta a través de otro niple con tuerca central a una unión americana, para permitir el desmontaje del sistema, la cual se conecta a una última extensión de cañería de 10 centímetros, a la cual se añadió una contratuerca en el otro extremo, para evitar que ingrese completamente en la chaqueta del reactor y obstaculice el ingreso del vapor, pero que permita un buen apriete que evite fugas en la unión.

4.2.3 Nuevas mantenciones y modificaciones al evaporador.

Pese a que al estar abierto a la atmósfera el evaporador producía vapor, al conectarlo a la cañería y al reactor el flujo de vapor disminuía, llegando a ser casi nulo, debido a que el vapor entregado no tenía ninguna presión, asemejándose el funcionamiento del equipo más a un hervidor que a una caldera eléctrica.

Debido a lo anterior se contactó con el encargado de llevar la mantención de las calderas de la Escuela de Ingeniería Bioquímica, entre las que se encuentra una caldera eléctrica de similares características a la empleada en el presente trabajo, el ingeniero Manuel Camacho, a quien se le encargó el diagnóstico y reparación del equipo.

El ingeniero realizó una visita a las dependencias de la Escuela, donde examinó la caldera eléctrica, determinando que el problema consistía en que los presostatos se encontraban pegados, probablemente debido a los años de desuso del equipo, y tras solucionarlo, los dejó regulados a una operación de 40 psi, con lo cual el evaporador corta la corriente una vez alcanzados los 40 psi de presión y la vuelve a encender cuando la misma ha descendido a 35 psi.

A su vez, determinó una serie de inconvenientes y problemas de seguridad, que solicitó se solucionaran a la brevedad, los cuales se mencionan a continuación:

1. La alimentación de agua se efectuaba a través de una manguera sujeta por abrazaderas. Se solicitó el reemplazo de la misma por cañería de cobre y terminales con hilo.

2. En la alimentación de agua no existía válvula check que impidiera el retorno de agua producto de la presión interna. Se solicitó la incorporación de una.

3. La válvula de paso del vapor entre la caldera eléctrica y el reactor era originalmente una válvula de globo on/off. Se solicitó reemplazo por válvula de corte lento ya descrita.

4. La cañería de alimentación de vapor al reactor estaba descubierta. Se solicitó su aislamiento térmico.

5. La válvula de alivio de la caldera liberaba el vapor directamente hacia el frente de la misma. Se solicitó instalar una cañería a través de la cual el vapor se liberara a una altura alejada del operador.

6. El enchufe macho alimentador de corriente instalado soportaba un consumo de 10 Amperes, y el cable empleado era cordón (grupo 2) de 0,75 milímetros de diámetro. Se solicitó el reemplazo del cordón a uno de diámetro mayor, de manera de soportar el consumo de 15 Amperes de la caldera, así como reemplazar el enchufe macho a uno de 16 Amperes.

Atendiendo a las solicitudes efectuadas, se reemplazó la manguera de alimentación de agua por cañería de cobre recocido, ya que es maleable y permite suplir diferencias de altura, y se añadieron férrulas en los extremos para emplear tuercas tanto en la cañería de agua como en la entrada de agua de la caldera.

Por otra parte, se añadió una válvula check vertical luego del filtro de agua, se reemplazó la válvula de globo de paso del vapor por la válvula de corte lento, se aisló la cañería de vapor con lana mineral, y se conectó un codo y 2 metros de cañería de 1 pulgada de diámetro galvanizados a la válvula de alivio de la caldera, cumpliendo de esta manera con las solicitudes encargadas.

Finalmente, respecto al elevado consumo eléctrico del equipo, se reemplazó el enchufe y el cable alimentador por uno más grueso, pero además se presentaba el problema de la baja

capacidad del automático de pared, el cual debiera saltar a los 20 Amperes de consumo (lo cual sorprendió, ya que el consumo de las resistencias calefactoras superan los 15 Amperes, lo que sumado al consumo del evaporador debiera acercarse a los 30 Amperes, sin embargo la corriente nunca se interrumpió, lo cual hace sospechar que el automático está defectuoso o que la instalación eléctrica del panel está en malas condiciones), por lo que se barajó la posibilidad de llamar al eléctrico para que reemplazara el panel eléctrico, instalando 2 automáticos independientes, pero esta alternativa llevaría tiempo y representaría un costo extra, por lo que fue descartada.

La alternativa que se llevó a cabo fue la fabricación de un alargador de corriente con cordón (grupo 2) de 2,5 milímetros de diámetro, suficiente para soportar 25 Amperes de consumo, con 2 enchufes en el extremo hembra (suponiendo que se conecte un segundo aparato aparte de la caldera) y tomar corriente del panel eléctrico ubicado detrás de la columna de destilación, para lo cual fue necesario reemplazar el enchufe hembra que estaba instalado allí por uno que soportara 16 Amperes de consumo. De esta manera, ambos aparatos eléctricos recibirían suministro de instalaciones diferentes.

Ya estando en condiciones de operación, se trabajó con la caldera durante algunos días, luego de los cuales dejó de operar correctamente, presumiblemente siendo la válvula de solenoide el problema, ya que el flujo de agua de alimentación no se cortaba, sobrepasándose el nivel normal, obligando a cortar el agua manualmente desde la cañería, lo cual eliminaba la presión de entrada, lo que provocaba que el agua no se calentaba, por lo que fue necesario llamar nuevamente al ingeniero.

Luego de una nueva revisión, se determinó que efectivamente el problema estaba en la válvula de solenoide, aunque afortunadamente en la parte mecánica y no en la electrónica, la cual no cerraba debido a suciedad y a la falta de uso en tantos años, y pese a que se consiguió que volviera a operar, se recomendó su reemplazo, ya que en las condiciones en que se encontraba volvería a fallar.

Además de lo anterior, en esta nueva revisión se recomendó reemplazar el transformador de corriente 220V-110V ubicado al interior del panel eléctrico de la caldera por uno que soporte una mayor potencia, ya que el que se encontraba instalado soportaba sólo 50W, lo cual es muy bajo para las prestaciones que debe entregar.

Finalmente, se recomendó reemplazar la alimentación de agua potable por agua blanda, ya que en primer lugar, es posible que por la cañería de agua potable vuelva a ingresar alguna partícula sólida, lo cual volvería a trabar la válvula de solenoide, y en segundo lugar, debido al alto contenido de durezas del agua potable, se irá acumulando sarro al interior de la caldera, recubriendo las resistencias eléctricas y disminuyendo la transferencia de calor al agua.

Con motivo de atender las nuevas recomendaciones, se recubrió la actual rejilla de 1 milímetro de abertura del filtro de agua por malla ASTM 400 de 37 micrómetros de abertura, para así proteger la válvula de solenoide de partículas sólidas en suspensión, y se encargó el reemplazo de la válvula de solenoide y del transformador de corriente.

El reemplazo del agua de alimentación no se pudo llevar a cabo, ya que conllevaría la implementación de una bomba que entregara la presión necesaria a la línea de agua blanda, por lo que queda propuesto para futuros trabajos con este equipo.

4.3 Producción de carbón activado

El carbón activado producido, tal como se ha señalado, utiliza cáscaras de nueces como precursor, provenientes de nogal chileno *Juglans regia*, las cuales presentan un contenido de cenizas (determinado de manera experimental) del 1%.

Se describirán sólo las experiencias más significativas realizadas, ya sea por la información aportada o por el éxito conseguido.

4.3.1 Molienda y tamizado

En primer lugar y para todas las pruebas, las cáscaras de nueces limpias se molieron para conseguir los tamaños de partícula de los carbones activados comerciales, es decir, en polvo y granular, para lo cual se emplearon los molinos ubicados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Para disminuir un poco el tamaño de las cáscaras de nueces enteras, éstas se hicieron pasar 2 veces por el molino de mandíbulas, el cual las muele hasta un tamaño aproximado de 1 a 2 centímetros.

A continuación, las cáscaras ya de menor tamaño se hacen pasar 2 veces por el molino de cuchillas, sin emplear malla de clasificación, el cual las muele hasta un tamaño aproximado de entre 0,5 a 1 centímetros.

Finalmente, las cáscaras se hacen pasar nuevamente por el molino de cuchillas, pero esta vez se emplea la malla de clasificación de bronce, la cual entrega un tamaño de partícula inferior a los 2 milímetros de diámetro, apropiado para carbón granular, por lo que el molino debe cargarse lentamente para evitar que las cáscaras inunden el área de molienda, lo cual aumentaría la fricción interna, quemándolas y destruyéndolas para los motivos del estudio.

Debido a que el árbol de platos del reactor se confeccionó empleando malla ASTM 18, la cual posee una abertura de 1 milímetro, no es posible realizar carbón activado en polvo sin recubrir los platos, lo cual evitaría que el vapor se distribuyera tanto desde la parte inferior de los mismos, por lo que se prefirió únicamente activar carbón granular, para lo cual se tamizaron las cáscaras de nueces ya molidas empleando el Ro-Tap del laboratorio 3 durante 20 minutos, seleccionando únicamente las cáscaras ASTM +20, es decir, cáscaras con un tamaño de partícula superior a 0,841 milímetros, las cuales ya no caerán una vez que las de diámetro superior a 1 milímetro tapen los orificios de la malla de los platos.

4.3.2 Experiencia 1. Sólo pirólisis

En esta prueba sólo se realizó la etapa de pirólisis, manteniendo la temperatura a 300°C durante 30 minutos sin agregar vapor de agua.

Se emplearon 3 nicrones de 0,61 milímetros de diámetro. Las temperaturas registradas y la curva de calentamiento del reactor se presentan en el gráfico 4.1:

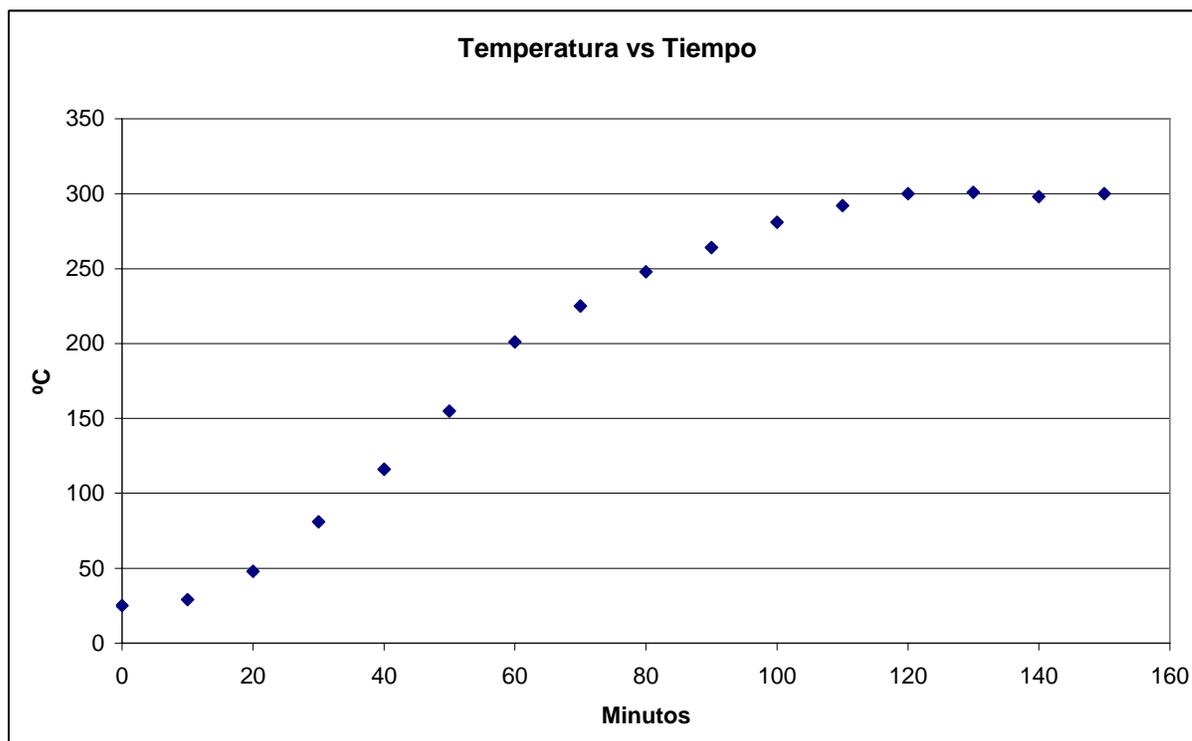


Gráfico 4.1: Temperaturas registradas.

Para esta prueba se pesaron 186,5 gramos de cáscaras de nueces, y tras la pirólisis se obtuvo una masa de 68,5 gramos de carbón, lo cual entrega una eficiencia de:

$$Eficiencia = \frac{68,5}{186,5} \cdot 100 = 36,73\%$$

El análisis de la curva demuestra que en un principio, por estar la totalidad de la masa del reactor frío, el calentamiento es lento, mientras que ya pasados unos 20 minutos, la temperatura empieza a subir más rápidamente.

Luego de pasados unos 50 minutos aproximadamente, la temperatura alcanza los 150°C, con lo cual empiezan las primeras etapas de la combustión de las cáscaras, la cual es una reacción muy exotérmica, lo que provoca que la temperatura suba bruscamente durante los siguientes 10 minutos, alcanzando los 200°C.

Desde este momento continúa la combustión de manera pareja, lo cual conlleva un aumento constante de la temperatura gracias al calor liberado por las cáscaras así como al entregado por las resistencias eléctricas, hasta alcanzar los 300°C a las 2 horas de operación, momento en el cual se corta la energía eléctrica para mantener la temperatura constante durante 30 minutos.

La eficiencia obtenida de 36,73% es elevada, lo cual demuestra que aun quedaban sustancias volátiles que no alcanzaron a desprenderse de las cáscaras de nueces, razón por la cual se decidió aumentar el tiempo de pirólisis en las demás experiencias.

4.3.3 Experiencia 2: Intento de activación a partir de carbón sin emplear convección.

Para esta prueba se cargó el reactor con carbón de cáscaras que se había sometido a la etapa de pirólisis con anterioridad, obligando a que la temperatura subiera únicamente por el calor entregado por las resistencias calefactoras, sin recibir ayuda del calor liberado en la combustión.

Las temperaturas registradas así como la curva de calentamiento del reactor se entregan en el gráfico 4.2:

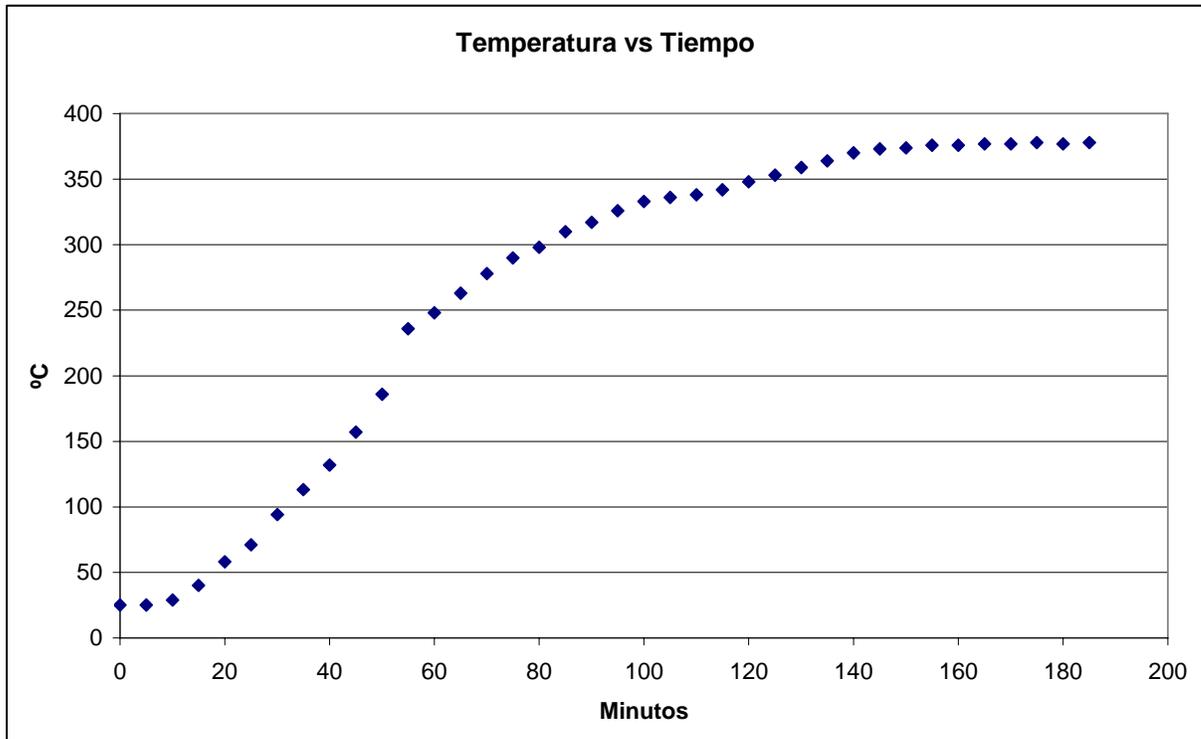


Gráfico 4.2: Temperaturas registradas.

Pese a que el reactor se cargó de carbón, ya se demostró que aun quedaban algunas sustancias volátiles por quemar, por lo que se observa una gran subida de temperatura alrededor de los 55 minutos de operación, que elevó rápidamente la temperatura desde los 180 hasta los 230°C aproximadamente. Esta subida se dio a una temperatura mayor a la observada al cargar cáscaras, lo cual apoya la teoría que se debió a las sustancias volátiles remanentes del carbón, las cuales se queman a temperaturas más elevadas.

Para esta experiencia, el calentamiento se efectuó exclusivamente por radiación, desde las resistencias calefactoras hacia las paredes, y desde las paredes hacia el interior, por lo que el proceso fue en extremo lento, y peor aun, al llegar alrededor de los 375°C de temperatura, la misma se estancó, sin mostrar cambios considerables en 40 minutos de calentamiento, entre los minutos 140 al 180, momento en el cual se decidió poner término a la experiencia.

Al apagar las resistencias calefactoras, las cuales irradian luz anaranjada, iluminando las paredes externas del reactor, por entre los ladrillos refractarios se observó que el metal estaba

incandescente. Buscando en bibliografía se encontraron los siguientes datos de colores para el acero, resumidos en la tabla 4.2:

Color	Temperatura °C
Rojo pálido	480
Rojo sangre	565
Cereza oscuro	635
Cereza intermedio	675
Cereza o rojo pleno	745
Rojo brillante	840
Salmón	895
Naranja	940
Limón	995
Amarillo claro	1075
Blanco	1200

Tabla 4.2: Color del acero a diferentes temperaturas. ²

El color que exhibía la pared del reactor al apagar las resistencias se asemejaba al “Rojo sangre” mencionado en la tabla, por lo que se presume que la temperatura se encontraba alrededor de los 565°C en la pared.

Para esta experiencia, los nicrones se encontraban adheridos a los surcos de los ladrillos refractarios mediante mortero refractario, y sólo daban 2 vueltas al interior del ladrillo, por lo que las espiras no se encontraban lo suficientemente separadas ni podían disipar calor por la parte posterior a causa del mortero con el cual se encontraban pegadas, razón por la cual alcanzaron una temperatura muy elevada, aumentando desmesuradamente su oxidación, lo cual conllevó a que se cortaran al momento de apagarlas.

Para solucionar este problema, se removió completamente el mortero refractario de los surcos, y al reemplazar los nicrones quemados, se fijaron con grapas, permitiendo una mejor disipación del calor generado, además de agregar 3 surcos extra a los ladrillos, lo cual permitía a cada nicrón dar 3 vueltas, separando más las espiras de esta manera.

4.3.4 Experiencia 3: Activación a 400°C a partir de cáscaras de nueces, empleando convección, sin aislamiento térmico completo.

Para esta experiencia se corrigieron todos los problemas de las pruebas efectuadas anteriormente, resultando al fin el proceso de activación en su totalidad.

Se pesaron 225 gramos de cáscaras de nueces, con las cuales se cargó el reactor, y al término de la experiencia se obtuvo un total de 73,5 gramos de carbón activado, lo cual entrega una eficiencia global del proceso de:

$$\text{Eficiencia} = \frac{225}{73,5} \cdot 100 = 32,67\%$$

La caldera se encendió al mismo tiempo que el reactor, de manera que generara vapor mientras se completaba la pirólisis, y estuviera en servicio cuando se requiriera el vapor.

Las temperaturas registradas y la curva de calentamiento se presentan en el gráfico 4.3:

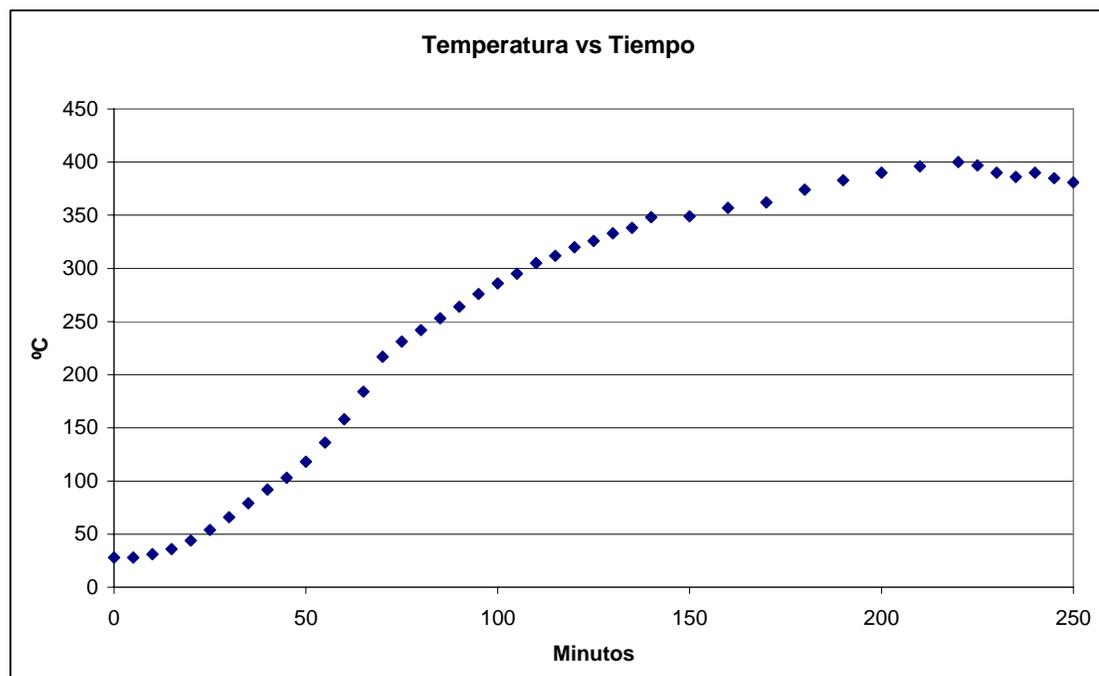


Gráfico 4.3: Temperaturas registradas.

En esta experiencia se observa, al igual que en todas las efectuadas, que la temperatura sube lentamente al principio debido a la inercia térmica.

Transcurridos unos 30 minutos la temperatura comenzó a subir de manera progresiva, y pasada una hora aproximada desde el inicio de la experiencia se alcanzaron los 150°C, momento en el cual se elevó rápidamente producto del calor liberado por la reacción de combustión que comenzaba a tener lugar.

Alcanzados los 230°C la reacción de combustión empieza a ser más lenta, por lo que la velocidad de aumento de temperatura disminuye, aunque aun conserva una pendiente considerable.

Pasadas casi 2 horas de operación se alcanzan los 300°C, temperatura de pirólisis, pero esta vez se decidió no apagar las resistencias calefactoras, de modo de eliminar completamente las sustancias volátiles de las cáscaras, contando los 30 minutos de pirólisis con un aumento de temperatura constante, en ausencia de oxígeno manteniendo las válvulas cerradas, luego de lo cual se da inicio al mecanismo de convección para ayudar a distribuir el calor al interior del reactor, desde las paredes calientes hacia el seno del mismo, para lo cual se abrió el paso del vapor de forma intermitente cada 10 minutos, de manera de permitir que las paredes se calentaran lo suficiente como para que el vapor distribuyera el calor hacia el interior, sin que el mismo comenzara a enfriar el reactor. Este paso tuvo lugar entre los minutos 150 a 220.

Ya en el minuto 220 se alcanzaron los 400°C de temperatura, la cual se había fijado para llevar a cabo esta experiencia de activación térmica, por lo que esta vez se abrió el paso del vapor de manera constante durante 30 minutos, tiempo en el cual tiene lugar la reacción, lo cual provocó un leve descenso de la temperatura debido al calor retirado por el mismo vapor.

El escalón de temperatura que se observa en el minuto 240 se debe a que la caldera se había despresurizado en el minuto 230, por lo que se cerró el paso de vapor durante 10 minutos para recuperar algo de presión, por lo que el minuto 240 mencionado realmente corresponde al

minuto 250 de operación, y durante esos 10 minutos el reactor consiguió recalentarse los 4°C apreciados en el escalón.

En esta experiencia se cubrió la tapa superior e inferior del reactor con lana mineral para poder alcanzar la temperatura de activación, y además hacerlo en un tiempo razonable, pero no se aislaron los recovecos entre los ladrillos refractarios, ya que se tenía el temor de sobrecalentar los nicrones y que se cortaran, por lo cual gran parte del calor se disipó por allí, razón por la cual la temperatura alcanzada fue de sólo 400°C.

4.3.5 Experiencia 4: Activación a 550°C a partir de cáscaras de nueces, empleando convección, con aislamiento térmico completo.

Esta experiencia es muy similar a la experiencia 3, con la diferencia de que se aisló el sistema en su totalidad con lana mineral, tanto la cubierta de la tapa superior, la tapa inferior, los espacios entre los flanges y los ladrillos refractarios, los espacios entre los tornillos de las tapas y los espacios entre los 2 cuerpos calefactores, tal como se aprecia en la figura 4.2:



Figura 4.2: Reactor aislado completamente.

En esta oportunidad se pesaron 248 gramos de cáscaras de nueces molidas, y al término de la experiencia se obtuvieron 55 gramos de carbón activado, lo cual corresponde a una eficiencia de:

$$Eficiencia = \frac{248}{55} \cdot 100 = 22,18\%$$

Esta eficiencia tan baja se debe probablemente al gran tiempo necesario para llegar a la temperatura de activación, lo cual provoca que parte del carbón, una vez terminada completamente la etapa de pirólisis, producto de la elevada temperatura se desprenda como CO y CO₂. El aspecto positivo de este hecho es que se asegura que el carbón obtenido, pese a ser poco, tendrá un contenido de volátiles casi nulo.

Las temperaturas registradas se entregan en el gráfico 4.4:

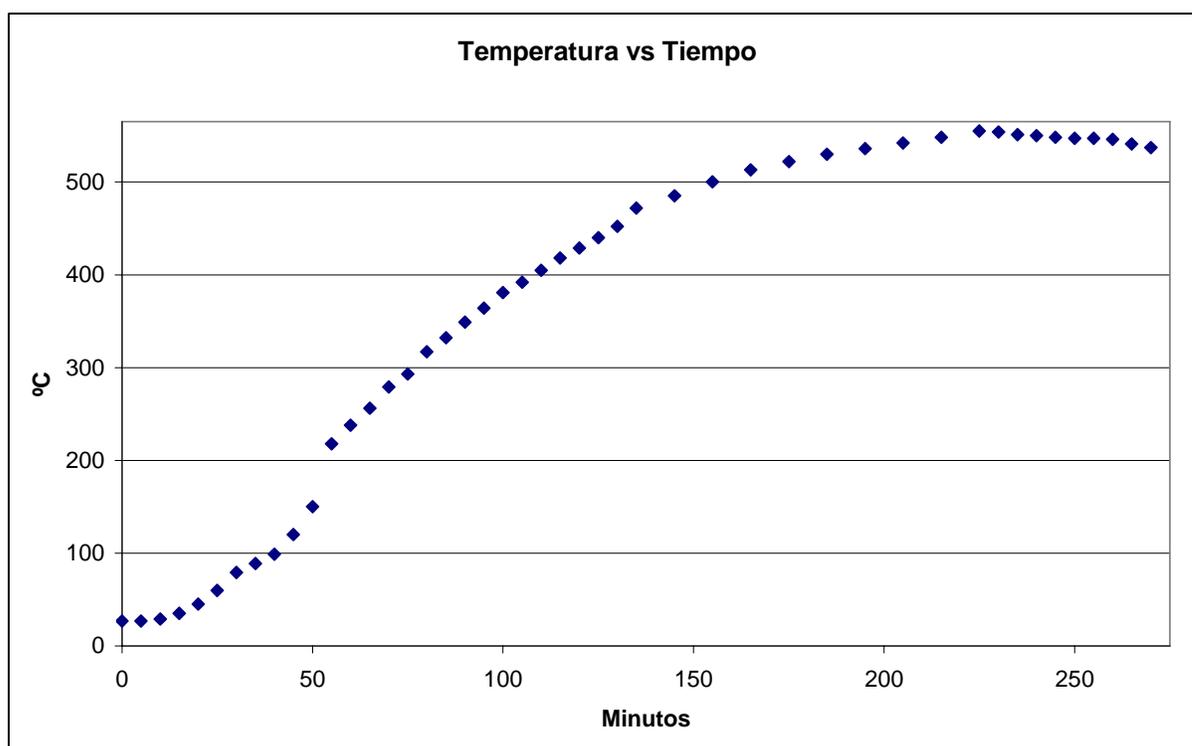


Gráfico 4.4: Temperaturas registradas.

Como en todas las experiencias, se aprecia al principio el lento aumento de temperatura debido a la inercia térmica, y entre los minutos 50 a 55 aproximadamente, el brusco aumento debido al proceso de pirólisis.

La pirólisis se completa alrededor de los minutos 80 a 110 de la experiencia (contando los 30 minutos establecidos), y el aumento de temperatura se mantiene más o menos constante hasta el minuto 135, momento en el cual se inició el proceso de convección forzada, ayudando a la transferencia de calor inyectando vapor de manera intermitente cada 10 minutos hasta el minuto 225.

A las 3 horas y 45 minutos desde que se inició la experiencia se registraron 555°C de temperatura, momento desde el que se mantuvo el flujo de vapor constante para llevar a cabo el proceso de activación, manteniendo la reacción durante 45 minutos, reflejada en la gráfica 4.4 como un leve descenso en la temperatura, lo cual se explica por el calor retirado por el vapor.

El problema de la baja eficiencia se solucionaría disminuyendo el tiempo de calentamiento, lo que se conseguiría implementando uno o varios de los siguientes cambios:

- Empleando nicrones de mayor potencia.
- Aumentando el número de nicrones.
- Reemplazando las resistencias de nicrón por resistencias de Kanthal, las cuales alcanzan mayor temperatura.
- Usando ladrillos refractarios más gruesos, de manera de irradiar menos calor hacia el exterior.
- Mejorando el aislamiento térmico.
- Implementando un sistema de convección en el espacio entre las resistencias y la pared externa del reactor, con aire precalentado.

Con los cambios planteados no sólo se disminuiría el tiempo de calentamiento, sino que además se podría alcanzar temperaturas más elevadas. No obstante, para el sistema de calefacción construido artesanalmente, la temperatura alcanzada es satisfactoria, acercándose al valor teórico calculado, por lo que la experiencia se considera exitosa.

4.4 Manual empírico de operación de la caldera eléctrica y del reactor

Tras muchas pruebas de ensayo y error, y luego de recopilar toda la información necesaria, tanto bibliográfica como empírica del manejo de los equipos involucrados en el proceso de activación térmica de carbón descrito en el presente trabajo, se confeccionó el siguiente manual empírico de operación.

4.4.1 Operación de la caldera eléctrica

Especificaciones técnicas

Marca: Sussman Electric Boilers

Consumo eléctrico: 15 Amperes

Presión de trabajo: 40 psi

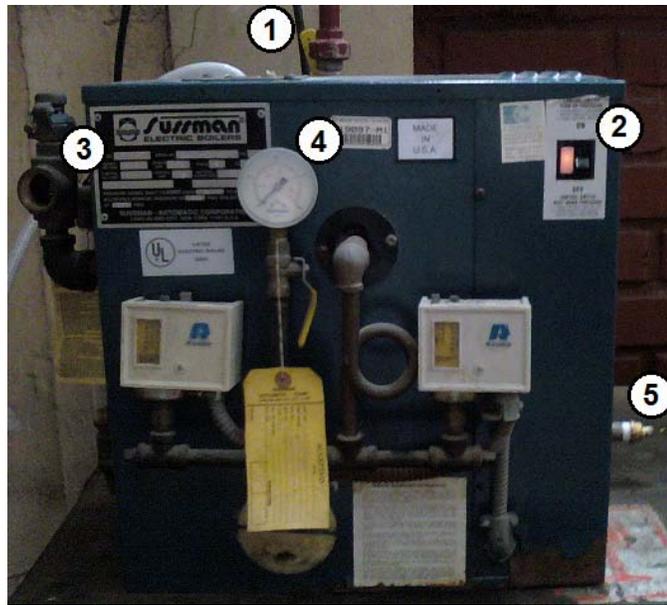


Figura 4.3: Caldera eléctrica.

1. Válvula de salida de vapor.
2. Interruptor de encendido-apagado.
3. Válvula de escape.
4. Manómetro.
5. Despiche.

1. Conectar el enchufe de la caldera a una toma de corriente habilitada para enchufe de 16 Amperes gobernada por un automático de 20 Amperes como mínimo y moverlo a la posición ON.

2. Abrir la válvula de alimentación de agua a la caldera.

3. Abrir la válvula de salida del vapor ubicada en la parte posterior de la caldera. Esta válvula debe estar abierta durante todo el calentamiento del agua y la producción del primer vapor para permitir que el aire contenido en el estanque lo abandone y no ocasione lecturas erróneas de la presión de vapor.

4. Mover el interruptor de corriente de la caldera a la posición ON. Se encenderá una luz anaranjada junto a él.

5. Esperar la producción del primer vapor. Este proceso tarda aproximadamente 50 minutos, luego de los cuales se escucharán los borbotones de agua hirviendo y saldrán las gotas del primer condensado.
6. Una vez que se esté liberando una buena cantidad de vapor, cerrar la válvula de salida del vapor para presurizar el estanque.
7. Esperar hasta obtener la presión de trabajo deseada. La presión sube a razón de 1 psi por minuto. La corriente eléctrica se cortará de manera automática al alcanzar los 40 psi, y volverá a encenderse también de manera automática cuando haya descendido a 35 psi.
8. Para liberar el vapor, el estanque debe despresurizarse de manera lenta, de lo contrario puede producirse una implosión si la despresurización es muy violenta. Para evitar esto, la válvula de salida del vapor debe abrirse lentamente. Al abrir la válvula, al principio se obtendrán gotas de condensado. Eliminar dichas gotas y a continuación alimentar vapor puro al proceso deseado.
9. Cuando la presión haya descendido por debajo de la presión de trabajo requerida, volver a cerrar la válvula de salida del vapor para conseguir la presurización del estanque. La velocidad seguirá siendo de 1 psi por minuto.
10. Repetir los pasos 8 y 9 hasta completar el trabajo deseado, y una vez terminada la operación, realizar los pasos 11 al 13.
11. Mover el interruptor de corriente de la caldera a la posición OFF, cortar la corriente desde el automático de pared y desconectar el enchufe de la toma de corriente.
12. Cerrar la válvula de alimentación de agua a la caldera.
13. Abrir completamente la válvula de salida del vapor para evitar que el contenedor quede presurizado.

4.4.2 Operación del Reactor

Especificaciones del sistema calefactor

Consumo eléctrico: 15,36 Amperes

1. Retirar las 8 tuercas, golillas y tornillos de la tapa superior del reactor y remover la tapa y la empaquetadura grafitizada.

2. Extraer el árbol de platos empleando un alicate ejerciendo una fuerza completamente vertical hacia arriba sobre el eje. Si la fuerza ejercida es diagonal hacia arriba, los platos ejercerán palanca en contra de las paredes internas del reactor, lo cual impedirá que el árbol salga.

En caso que pese a la fuerza vertical hacia arriba el árbol de platos no salga, es probable que se hayan adherido con el licor de las cáscaras a las paredes del reactor. De ser el caso, no forzar su salida con una fuerza excesiva, ya que la fuerza aplicada solo será sentida por el eje central, el cual romperá la malla de los platos, la cual está pegada a los mismos. En su lugar afirmar el eje con alguna herramienta como alicate, caimán o llave Stillson y girarlo, de manera de romper el licor seco que pega los platos, hasta conseguir que giren con soltura, y luego retirar de manera normal.

3. Cargar el árbol de platos con cáscaras de nueces molidas, para lo cual afirmar la parte inferior del eje en la prensa (tornillo) del Laboratorio de Operaciones Unitarias manteniendo el árbol en posición vertical. Recortar y ubicar un círculo de papel de aluminio (papel Alusa) en el último plato para evitar que las cáscaras muy finas caigan al fondo del reactor a través de la malla. La masa de cáscaras a cargar es de alrededor de 220 gramos. Se entrega una fotografía del árbol de platos cargado en la imagen 4.4.



Figura 4.4: Árbol de platos cargado de cáscaras.

4. Posicionar el árbol de platos al interior del reactor, ingresándolo en posición totalmente vertical, de lo contrario no ingresará. La tapa inferior posee un orificio al centro que sirve de guía para el eje. Comprobar que el eje haya entrado en el orificio. Se observa una fotografía del reactor cargado en la figura 4.5.



Figura 4.5: Reactor cargado de cáscaras de nueces (vista superior).

5. Ubicar nuevamente la empaquetadura grafitizada y posicionar la tapa superior del reactor. Dicha tapa también presenta un orificio que sirve de guía para el eje del árbol de platos. Comprobar que el eje esté ubicado al interior del orificio y cerrar la tapa con los 8 tornillos y tuercas, no olvidando ubicar las golillas.

6. Ubicar los ladrillos refractarios a ambos costados del reactor, colocándolos sobre el flange inferior del mismo y usando como guía el orificio de alimentación de vapor a la chaqueta, el cual debe coincidir con el orificio de los ladrillos refractarios. Los ladrillos deben quedar a una distancia tal que evite cualquier contacto entre los nicrones y la pared metálica del reactor, e incluso a una distancia suficiente que no permita la formación de un arco eléctrico entre la pared y las resistencias.

7. Atornillar el tramo de cañería de 10 centímetros al orificio de alimentación de vapor de la chaqueta del reactor, teniendo como tope la contratuerca de bronce.

8. Ubicar la cañería de alimentación de vapor, atornillando la unión americana superior al flexible de teflón para gas, y la unión americana inferior al tramo de cañería de 10 centímetros recién instalada.

9. Conectar las 6 pinzas metálicas del control de temperatura a los 3 nicrones, comprobando que cada nicrón se conecte por un extremo mediante una pinza unida a un cable blanco y por el otro mediante una pinza unida a un cable rojo, de manera de cerrar el circuito eléctrico.

10. Cubrir la tapa superior del reactor con lana mineral, así como la mayor parte de posibles escapes de calor. Una vez hecho lo anterior, introducir la termocupla por el orificio dispuesto para ello en la tapa superior.

11. Cerrar la válvula de globo de la tapa del reactor, así como la válvula de corte lento de la cañería de alimentación de vapor y abrir la válvula de despiche (válvula de globo conectada a la té) de la misma cañería.

12. Conectar el enchufe alimentador de corriente del sistema calefactor a una toma de corriente habilitada para enchufe de 16 Amperes gobernada por un automático de 20 Amperes como mínimo y moverlo a la posición ON.

Al momento de mover el automático de pared a la posición ON, en primer lugar se encenderá el PLC, mostrando en la pantalla la temperatura registrada por la termocupla, a continuación saltará el relé y luego se encenderán los nicrones, tornándose incandescentes segundos después. Si lo anterior no sucede, mover rápidamente el automático de pared a la posición OFF y comprobar que todas las conexiones eléctricas son correctas y que no existe ningún contacto entre los nicrones y la pared metálica del reactor.

13. Programar el PLC a la temperatura de activación deseada, preferentemente a una temperatura superior (de unos 50°C aproximados), para evitar que el reactor se enfríe demasiado cuando la corriente se interrumpa y tarde mucho tiempo en volver a alcanzar la temperatura de activación producto de la inercia térmica.

14. Conectar el enchufe de la caldera a una toma de corriente habilitada para enchufe de 16 Amperes gobernada por un automático de 20 Amperes como mínimo, y moverlo a la posición ON, cuidando que la toma de corriente no sea la misma a aquella en donde se conectó el sistema calefactor, ya que en conjunto, el consumo eléctrico de la caldera más el consumo eléctrico del sistema calefactor superan los 30 Amperes, lo cual puede provocar un accidente eléctrico.

15. Realizar los pasos 2 al 6 del manual de operación de la caldera eléctrica, descrito anteriormente.

16. Una vez que la termocupla registre 150°C (alrededor de los 50 minutos de operación) abrir levemente la válvula de la tapa del reactor, para permitir la salida del humo y demás volátiles generados en la pirólisis, e ir aumentando ligeramente la abertura a medida que el flujo de humo sea mayor y haya fugas por el orificio de la termocupla.

17. Una vez que la termocupla registre aproximadamente 250°C, el flujo de humo irá disminuyendo. En ese momento empezar a cerrar la válvula de la tapa del reactor, hasta cerrarla completamente cuando el flujo de humo se asemeje al de un cigarrillo encendido. Esto sucederá alrededor de los 320°C.

18. Alcanzados los 300°C (alrededor de las 2 horas de operación) contar 30 minutos, para completar la pirólisis y asegurar la eliminación de volátiles de las cáscaras de nueces.

19. Completado el paso 18, rápidamente abrir completamente la válvula de escape de gases de la tapa del reactor y la válvula de corte lento de la cañería de vapor, y abrir lentamente la válvula de salida de vapor de la caldera (la cual ya debería haber alcanzado los 40 psi de presión para este momento) esperando que se eliminen las gotas de condensado por la válvula de despiche de la cañería de vapor. Las válvulas citadas se observan en la figura 4.6.

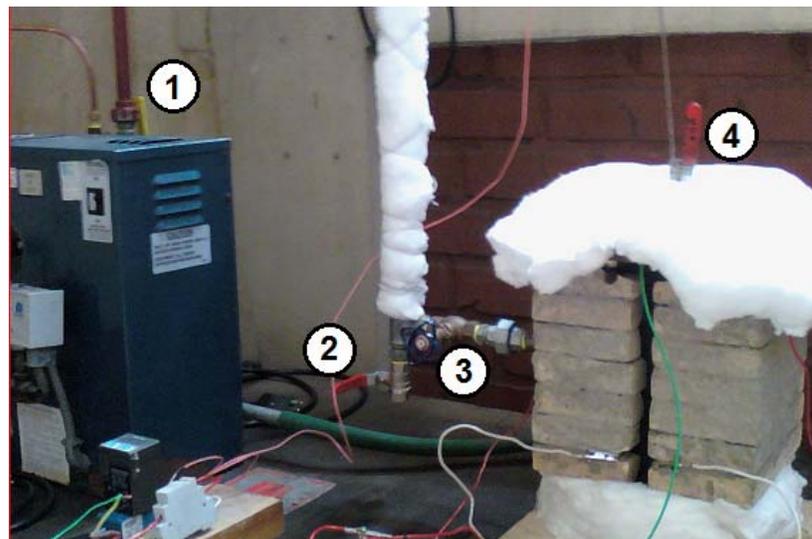


Figura 4.6: Válvulas a operar en proceso de convección forzada.

1. Válvula de salida de vapor de la caldera eléctrica.
2. Válvula de despiche de la cañería de vapor.
3. Válvula de corte lento de la cañería de vapor.
4. Válvula de escape de gases de la tapa superior del reactor.

Una vez que salga vapor puro, cerrar levemente la válvula de salida de vapor de la caldera y cerrar completamente la válvula de despiche de la cañería, de modo que ingrese un pequeño

flujo de vapor al reactor, consiguiendo que el mecanismo de convección distribuya el calor desde las paredes exteriores calientes hacia el interior del reactor.

El flujo de vapor debe ser muy leve, de lo contrario arrastrará partículas de carbón al exterior, regulándose de tal manera que apenas se escuche un soplido muy leve en la válvula de la tapa del reactor, y debe mantenerse sólo mientras se observe aumento en la temperatura registrada por la termocupla, lo cual sucede con una inyección de vapor de unos 30 segundos, luego de lo cual deben cerrarse rápidamente la válvula de salida de vapor de la caldera, la válvula de la tapa del reactor, la válvula de corte lento de la cañería de vapor, y abrirse nuevamente la válvula de despiche de la misma cañería.

El paso 19 en su totalidad debe tardar alrededor de 1 a 2 minutos, y debe repetirse cada 10 minutos hasta alcanzar la temperatura de activación deseada. Al cerrar todas las válvulas, por no haber convección, la termocupla registrará un descenso de temperatura. Esto es normal, ya que sólo lee la temperatura en la parte superior del reactor, pero las paredes se seguirán calentando, razón por la cual este paso debe repetirse de manera intermitente distribuyendo de esta forma el calor, pero no puede efectuarse de manera continua, ya que llegado un momento el vapor retira calor más rápido de lo que los nicrones lo entregan, con lo cual el reactor empieza a enfriarse.

20. Una vez alcanzada la temperatura de activación, ejecutar el paso 19, pero esta vez permitir el paso continuo de vapor durante 30 minutos, comprobando constantemente que el flujo sea muy leve, advirtiéndose por un apenas audible soplido en la válvula de la tapa del reactor. Si el flujo de vapor es alto, éste arrastrará partículas de carbón hacia el exterior. Con este bajo flujo, la velocidad de despresurización de la caldera es de alrededor de 1 psi por minuto, por lo que no debiera despresurizarse antes de unos 30 minutos de activación, en caso contrario, ejecutar el paso 9 del manual de operación de la caldera eléctrica ya descrito.

21. Una vez completado el proceso, cortar la corriente del sistema calefactor desde el automático de pared, desconectar su enchufe y ejecutar los pasos 11 al 13 del manual de operación de la caldera eléctrica ya descrito.

22. Esperar que el reactor enfríe hasta temperatura ambiente con sus válvulas cerradas y retirar el carbón activado producido extrayendo el árbol de platos repitiendo los pasos 1 y 2 de este procedimiento.

4.5 Pruebas de Índice de Azul de Metileno

4.5.1 Descripción de la prueba ³

La determinación del número de azul de metileno permite conocer la capacidad de un carbón activado para adsorber colorantes aromáticos de una solución estándar de azul de metileno, e indica la macroporosidad del carbón activado obtenido.

WRC reconoce dos ensayos diferentes de número de azul de metileno. El primero, TM-11, involucra la adición a una cierta dosis de carbón activado, de una solución de azul de metileno.

El número de azul de metileno se determina por la reducción en el color. Este método es similar al número de yodo pero muestra la capacidad de adsorción del carbón activado respecto a una molécula grande.

El otro método es el test CEFIC, el que involucra la adición de una solución de azul de metileno estándar en una muestra de carbón activado mientras no ocurra un cambio que se aleje del color. La capacidad de adsorción en ambos ensayos se indica en mg/l de azul de metileno adsorbido por gramo de carbón activado.

4.5.2 Materiales y reactivos necesarios

Materiales

- Balanza analítica
- Papel filtro Whatman N°44 o similar
- Espectrofotómetro
- Celdas espectrofotométricas
- Matraces de aforo de 50 ml y de 1 litro
- Pipetas de aforo de 50 y 15 ml
- Bomba de vacío
- Embudos Büchner
- Kitasatos

Reactivos

- Azul de metileno en polvo

4.5.3 Procedimiento

Preparación de soluciones

- *Solución estándar de azul de metileno (1 g/l):* Pesar y transferir 1,0 gramo de azul de metileno (previamente secado y enfriado en desecadora) a matraz de aforo de un litro. Aforar con agua destilada.
- *Solución estándar de azul de metileno (50 mg/l):* Pipetear 50 ml de solución de azul de metileno de concentración 1 g/l en matraz de aforo de 1 litro. Aforar con agua destilada

Metodología⁴

- Transferir 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30 y 50 ml de solución de azul de metileno de concentración 50 mg/l a matraces de 50 ml y aforar con agua destilada.
- Realizar un barrido en espectrofotómetro utilizando la solución de concentración 15 mg/l para determinar la longitud de onda a la cual se trabajará, la cual será el mayor valor registrado.
- Preparar la curva de calibración absorbancia vs. concentración a la longitud de onda determinada empleando las soluciones estándar de azul de metileno de concentraciones 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30 y 50 mg/l preparadas anteriormente. Las soluciones preparadas se muestran en la figura 4.7.



Figura 4.7: Soluciones empleadas en curva de calibración.

- Secar una muestra de carbón a 140°C durante una hora y dejar enfriar en desecadora.
- Agregar 5 gramos de carbón a un matraz Erlenmeyer de 250 ml, agregar 80 ml de la solución de azul de metileno de concentración 1 g/l y agitar durante 20 minutos.
- Filtrar a vacío, descartando los primeros 15 ml.

- Transferir el filtrado a una celda espectrofotométrica y medir su absorbancia. Con la absorbancia medida entrar a la curva de calibración y obtener la concentración del filtrado.

4.5.4 Resultados

En primer lugar se determinó la longitud de onda a la cual se trabajaría realizando un barrido entre 600 y 700 μm , con un paso de 5 μm . El máximo valor de absorbancia se alcanzó a los 650 μm . La curva de barrido se muestra en el gráfico 4.5:

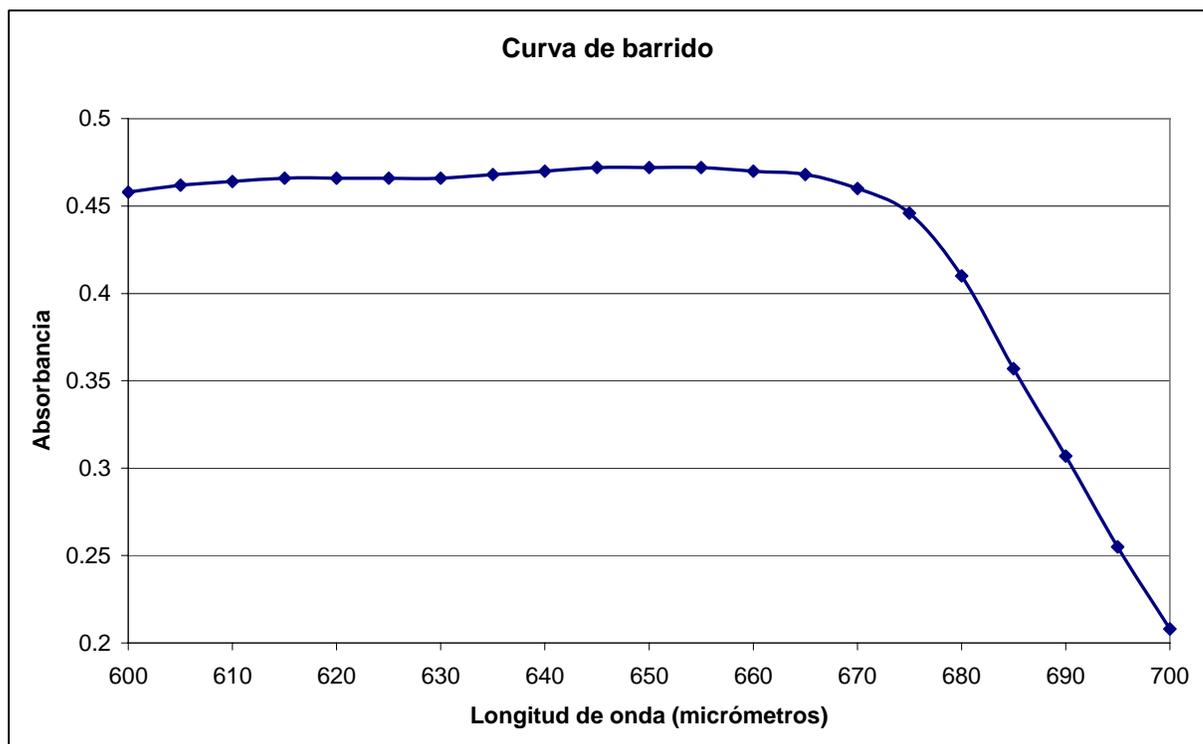


Gráfico 4.5: Curva de barrido para azul de metileno.

A continuación se confecciona la curva de calibración a la longitud de onda de 650 μm . Los valores obtenidos se muestran en la tabla 4.3 y gráfico 4.6.

Concentración (mg/l)	Absorbancia
2	0,353
4	0,406
6	0,443
10	0,458
15	0,472
20	0,476
30	0,480
50	0,484

Tabla 4.3: Valores registrados en la curva de calibración de azul de metileno.

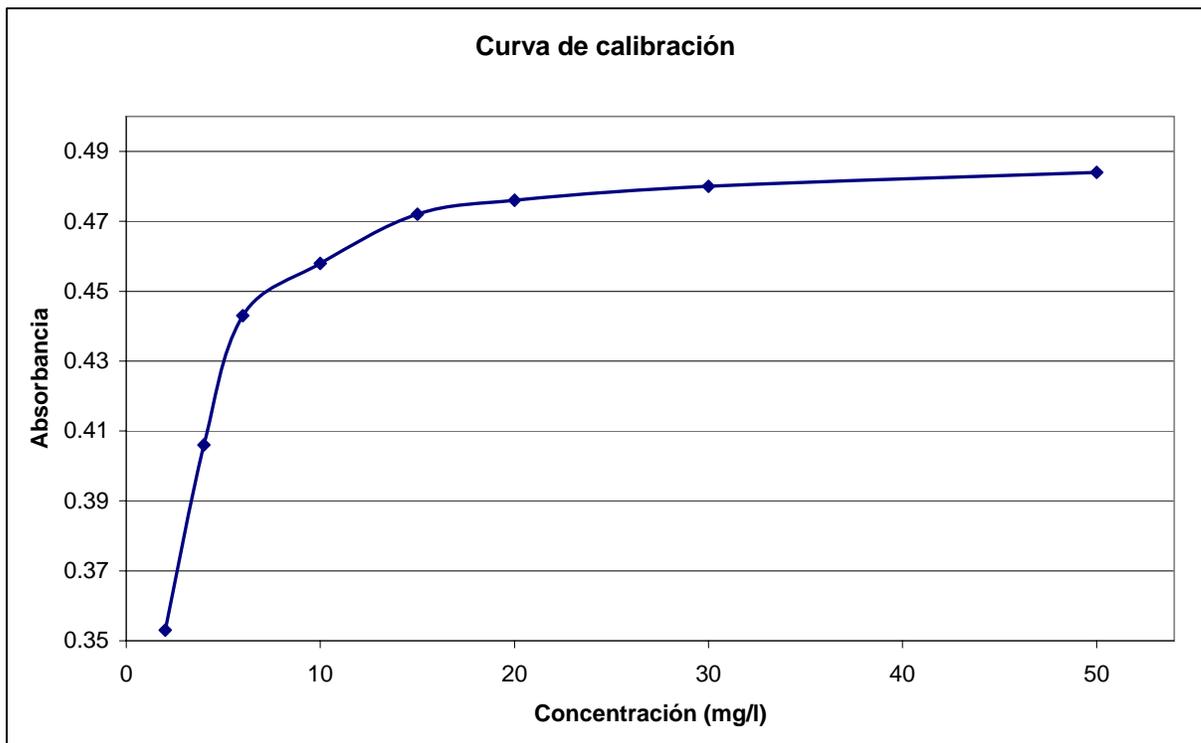


Gráfico 4.6: Curva de calibración de azul de metileno.

Para la modelación de estos datos se realizó un ajuste de curva empleando el método de mínimos cuadrados, buscando un modelo matemático que se ajustara por ensayo y error. El modelo propuesto fue el siguiente:

$$Abs. = A \cdot \sqrt[35]{Conc.} + B \cdot \sqrt[36]{Conc.} + C \cdot \sqrt[37]{Conc.}$$

Luego de realizar los cálculos y operaciones matriciales del método, las constantes calculadas fueron las siguientes:

$$Abs. = -25972,4639 \cdot \sqrt[35]{Conc.} + 53561,7271 \cdot \sqrt[36]{Conc.} - 27588,9773 \cdot \sqrt[37]{Conc.}$$

La sumatoria de las diferencias cuadradas entre los valores de absorbancia calculados mediante el ajuste de curva y los valores de absorbancia reales medidos es de 0,000124, por lo que el ajuste puede considerarse aceptable para el rango de trabajo. El gráfico 4.7 muestra el ajuste, en donde la curva azul (línea con rombos) corresponde a los datos reales, y la curva rosada (línea con cuadrados) corresponde al ajuste:

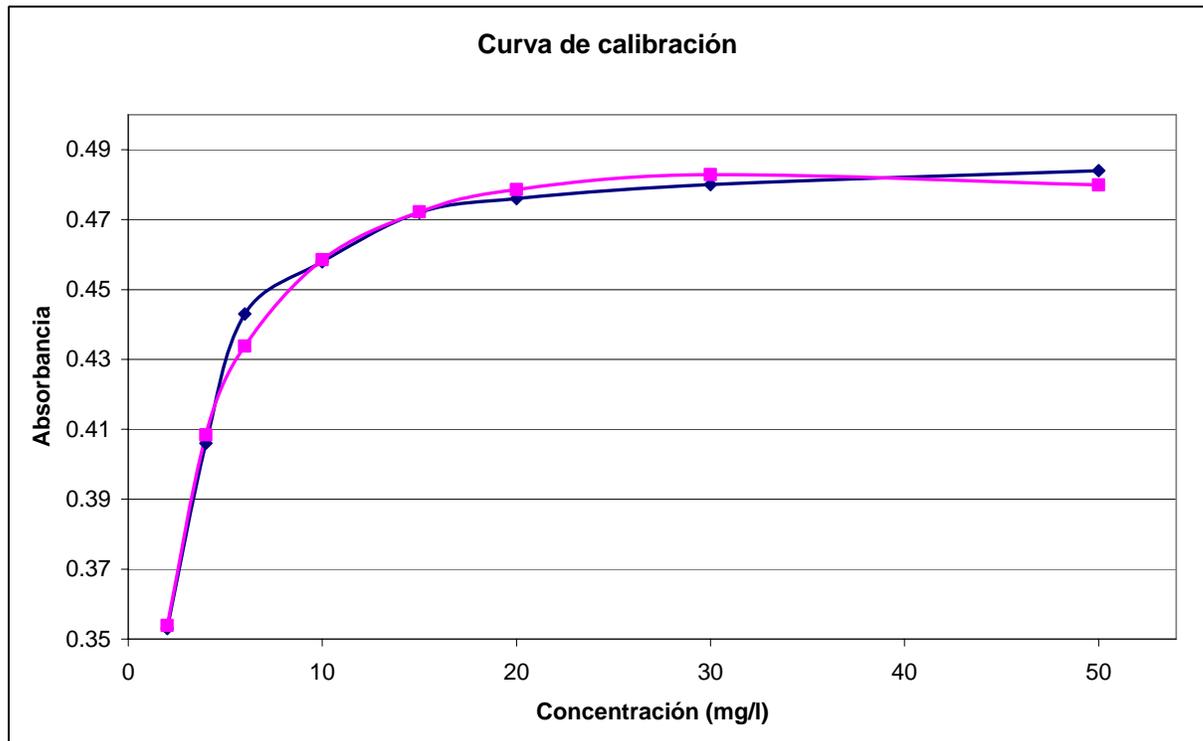


Gráfico 4.7: Curva de calibración y ajuste mediante mínimos cuadrados.

A pesar de que el ajuste es satisfactorio en el rango de trabajo, se aprecia que a valores mayores que los medidos, el comportamiento se alejará de los datos reales, por lo que considerando el comportamiento lineal en ambos extremos de la curva de calibración, se realizaron, adicionalmente, dos regresiones lineales que servirán para extrapolar valores fuera del rango de trabajo, pero en las cercanías del mismo. El gráfico 4.8 muestra ambas

regresiones, en donde los datos reales se presentan en azul (línea con rombos), mientras que las regresiones se presentan en rojo (línea punteada):

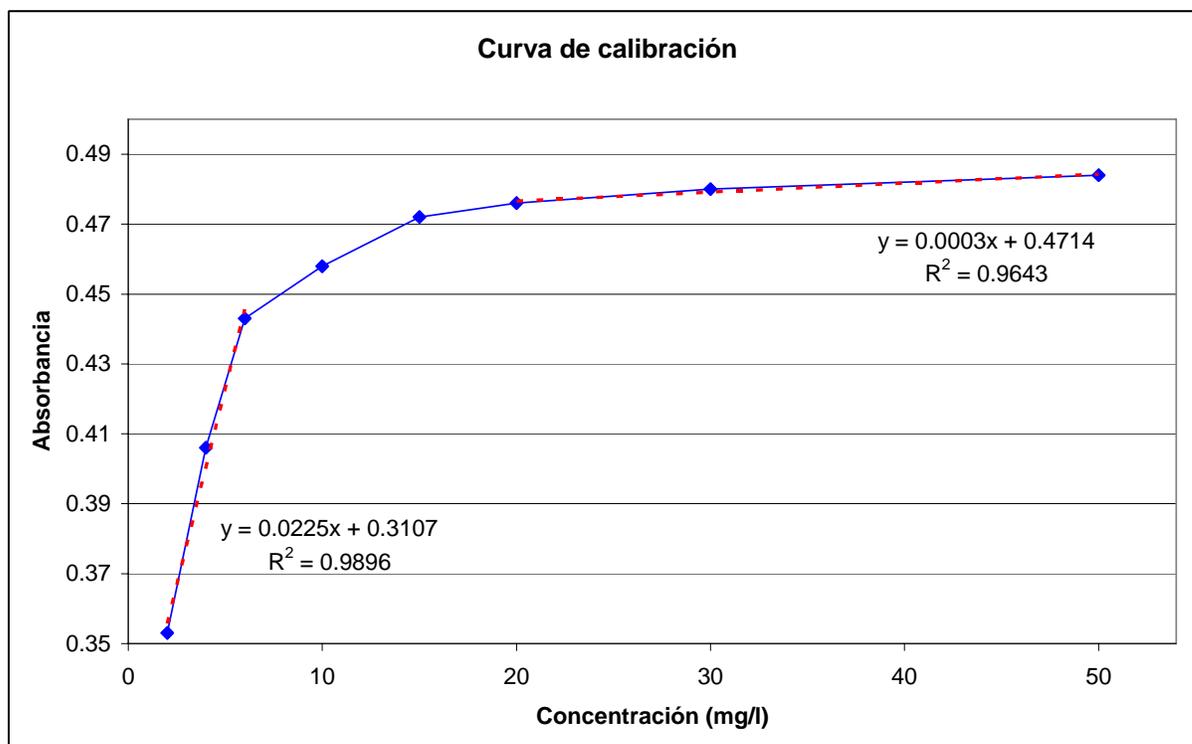


Gráfico 4.8: Regresiones lineales de los valores extremos de la curva de calibración.

No obstante, a valores menores y muy lejanos al rango medido, el comportamiento deja de ser modelado por la regresión lineal presentada, por lo que sólo puede estimarse por interpolación con el punto de concentración nula, en la cual es sabido que la absorbancia es 0, lo cual corresponde a agua destilada pura.

Se hicieron pruebas a muestras de carbón activado a 550°C, carbón activado a 400°C, carbón natural y cáscaras de nueces sin carbonizar. Debido a que para las muestras menos adsorbentes la concentración final de azul de metileno (AM) se ubicaba muy lejos del rango de calibración, se utilizó una concentración inicial tal que la concentración final quedara al interior del rango. Los resultados más representativos obtenidos se presentan en las tablas 4.4 y 4.5:

Nº de muestra	Tipo de muestra	Masa (g)	Volumen (ml)	Tiempo agitación (h)	Absorb.
1	CA 550	5,0005	80	0,5	0,486
2	CA 550	0,5002	50	0,5	0,008
3	CA 550	0,1065	50	3,0	0,476
4	CA 400	2,0010	50	0,5	0,480
5	CN	2,0017	50	0,5	0,484
6	Cáscaras	2,0009	50	0,5	0,408

Tabla 4.4: Valores registrados en ensayos de Azul de Metileno.

Nº de muestra	Conc. inicial (mg/l)	Conc. final (mg/l)	AM inicial (mg)	AM final (mg)	AM adsorbido (mg/g)	Número de AM (mg/l/g)
1	1000	48,67	80,000	3,893	15,22	190,25
2	95	0,05	4,750	0,002	9,49	189,83
3	95	20,00	4,750	1,000	35,21	704,23
4	50	30,00	2,500	1,500	0,50	10,00
5	50	50,00	2,500	2,500	0,00	0,00
6	50	4,32	2,500	0,216	1,14	22,83

Tabla 4.5: Resultados calculados en ensayos de Azul de Metileno.

Se aprecia que el carbón natural de cáscaras de nueces presenta una adsorción nula de la molécula de azul de metileno, ya que la absorbancia medida en la solución inicial como en el filtrado resultó ser la misma.

Por otra parte, la temperatura de 400°C resulta ser insuficiente para la activación térmica del carbón de cáscaras de nueces, ya que el número de azul de metileno calculado para dicha muestra es de apenas 10 mg/l de azul de metileno adsorbido por gramo de carbón.

Un caso particular fue el de las cáscaras de nueces sin carbonizar, las cuales presentaron un número de azul de metileno de 22,83 (mg/l)/g, mayor incluso que el del carbón activado a 400°C. Esto, sin embargo, no necesariamente refleja una mayor porosidad, sino que la mayor adsorción puede deberse a atracciones químicas entre la molécula de azul de metileno y la superficie de las cáscaras de nueces, ya sea, por ejemplo, por su pH, el cual se neutraliza en el proceso de pirólisis, eliminando de esta forma la atracción química y presentando un número de azul de metileno menor.

Cabe señalar que la atracción presentada por las cáscaras de nueces sólo afectará al azul de metileno, y al no tratarse de una adsorción producto de la porosidad, no puede generalizarse a otras moléculas de tamaños similares, aplicándose el resultado únicamente a este adsorbato.

Para el carbón activado a 550°C se realizaron pruebas empleando la solución de azul de metileno de concentración 1 g/l, exhibiendo una gran adsorción, reflejada en un número de azul de metileno de 190 (mg/l)/g.

Se decidió repetir las pruebas empleando una solución más diluida para obtener una concentración final dentro del rango de la curva de calibración, por lo que se empleó la concentración del extremo superior de la curva y una masa menor de carbón activado. El azul de metileno fue adsorbido casi completamente, resultando el filtrado casi transparente, y presentando nuevamente un número de azul de metileno de 190 (mg/l)/g.

En la figura 4.8 se presentan los colores de las soluciones luego de ser tratadas con los diferentes tipos de adsorbentes. De derecha a izquierda corresponden a: agua pura, solución tratada con cáscaras de nueces, solución tratada con carbón natural (color idéntico a la solución inicial de concentración 50 mg/l), solución tratada con carbón activado a 400°C, solución tratada con carbón activado a 550°C:

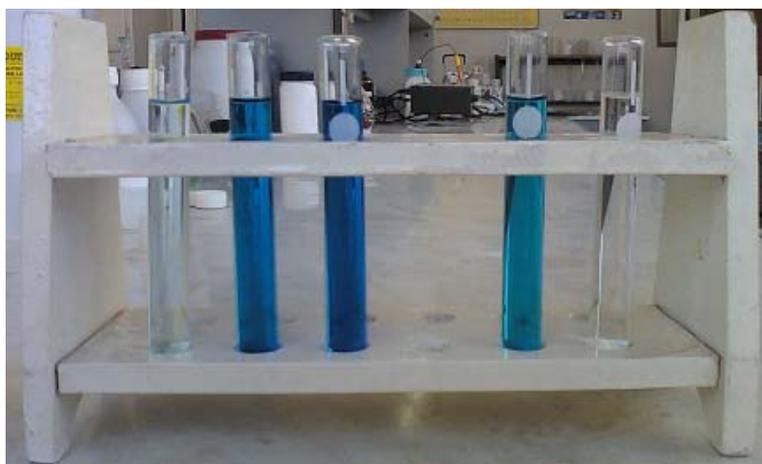


Figura 4.8: Soluciones finales luego de efectuar pruebas de azul de metileno.

Finalmente se decidió hacer una última prueba, con una masa de carbón mucho menor, y dándole un tiempo de agitación muy elevado, para asegurar que el carbón se encuentre completamente saturado y determinar la máxima capacidad de adsorción al equilibrio, lo cual se consiguió a las 3 horas de agitación, exhibiéndose un número de azul de metileno de 700 (mg/l)/g y una adsorción específica de 35,21 mg de azul de metileno por gramo de carbón.

Pese al elevado valor obtenido tras 3 horas de agitación, el número de azul de metileno considerado será de 190 (mg/l)/g, ya que se realizó en el tiempo establecido por el procedimiento, mientras que con 3 horas de contacto tienen lugar otros fenómenos, tales como atracciones moleculares producto de fuerzas superficiales, lo cual da lugar a la formación no sólo de la monocapa que desea medirse, sino también a la formación de una bicapa, por lo que considerar el valor de 700 (mg/l)/g traería consigo la suposición errada de una mayor macroporosidad que la realmente existente.

El número de azul de metileno del carbón activado producido resulta ser superior al de ciertos carbones activados comerciales, tal como los tipos Hbj1, Hbj2, Hbj3 y Hbj4, producidos por la empresa Zim-ex inc., cuyos números de azul de metileno son de 120, 180, 160 y 180 (mg/l)/g respectivamente ⁵, pero resulta ser inferior al de otros, tal como es el caso del carbón activado producido a partir de madera por Xiamen All Carbon Corporation, cuyo número de azul de metileno es de 250 (mg/l)/g. ⁽⁶⁾

Por otra parte, además de estar dentro del rango de valores del carbón activado comercial, los resultados obtenidos superan al de otros carbones activados producidos en estudios similares, como es el caso del carbón activado producido a partir de lodos sanitarios por Guzmán *et. al.*, quien expresó sus resultados como miligramos de azul de metileno adsorbidos por gramo de carbón, cuyos valores oscilaron entre 0,056 a 4,432 mg/g ⁽⁷⁾, mientras que la adsorción exhibida por el carbón de cáscaras de nueces producidas en el presente trabajo fue de 15,22 mg/g para las pruebas que emplearon la solución de mayor concentración.

El número de azul de metileno registrado demuestra que la macroporosidad del carbón activado de cáscaras de nueces producido se encuentra dentro del rango de comercialización

de este producto. Para aumentar la cantidad de macroporos del carbón (y de esta forma su número de azul de metileno) debería aumentarse el tiempo de residencia al interior del reactor, de modo de mantener la reacción de activación por más tiempo, mientras que para disminuir la macroporosidad, el tiempo de residencia debería ser menor a los 45 minutos empleados en las experiencias de activación.

4.6 Pruebas de Número de Yodo: Norma ASTM D4607

4.6.1 Descripción de la prueba ³

El número de yodo está definido como la cantidad en miligramos adsorbidos por 1 gramo de carbón activado dejando una concentración residual de yodo de 0,02N. El método usado pertenece a la ASTM e indica la mesoporosidad del carbón activado obtenido.

Este método requiere que la solución de yodo utilizada sea de una alta concentración, de manera que los resultados obtenidos sean muy superiores a los encontrados en otras prácticas.

Resulta útil, puesto que el yodo es una molécula pequeña. Incluye la determinación del nivel relativo de actividad de carbones sin uso o reactivados por adsorción de yodo en soluciones acuosas.

Está basado sobre tres puntos de adsorción isotérmicos. Una solución estándar de yodo es tratada con tres diferentes masas de carbón activado bajo condiciones específicas.

El carbón tratado con la solución de yodo es filtrado para separar el carbón de la solución de yodo (filtrado) y luego es analizado por titulación. La cantidad de yodo removida por gramo de carbón es determinada para cada muestra de carbón y el resultado es graficado en una isoterma de adsorción.

La concentración de yodo de la solución estándar afecta la capacidad de un carbón activado para adsorber yodo. Es por esto que la normalidad de la solución estándar de yodo debe mantenerse en un valor constante ($0,100 \pm 0,001 N$) para todas las mediciones de número de yodo.

4.6.2 Materiales y reactivos necesarios

Materiales

- Balanza analítica
- Bureta de 50 ml
- Matraces Erlenmeyer de 250 ml
- Vasos de precipitados
- Botellas de color ámbar
- Embudos de 100 mm de diámetro interno
- Papel filtro Whatman N° 2V o equivalente
- Pipetas de 5, 10, 25, 50 y 100 ml
- Matraces de aforo de 1 litro
- Probeta de 100 ml

Reactivos

- Ácido clorhídrico concentrado
- Tiosulfato de sodio pentahidratado ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Yodo (cristales)
- Yoduro de potasio (KI)
- Almidón
- Carbonato de sodio
- Dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)

4.6.3 Procedimiento

Preparación de soluciones⁸

Solución de Ácido Clorhídrico (5% en peso): Añadir 70 ml de HCl concentrado a 550 ml de agua y mezclar bien.

Solución de Ácido Clorhídrico (1 N): Añadir 8,8 ml de HCl concentrado a 80 ml de agua y mezclar bien. Traspasar a matraz de 100 ml y aforar con agua destilada.

Solución de Almidón: Mezclar 1,0 g \pm 0,5 g de almidón con 5 a 10 ml de agua fría para formar una pasta. Continuar mezclando mientras se añade 25 ml \pm 5 ml de agua a la pasta. Transferir la mezcla a 1 litro de agua hirviendo y hervir durante 4 a 5 minutos. Preparar esta solución fresca diariamente.

Solución de Tiosulfato de Sodio (0,1000 N): Disolver 24,820 gramos de tiosulfato de sodio en aproximadamente 75 ml \pm 25 ml de agua recién hervida y añadir 0,10 g \pm 0,01 g de carbonato de sodio. Transferir la mezcla a matraz de 1 litro y aforar con agua. Mantener la solución en reposo por un mínimo de 4 días antes de estandarizarla. Almacenar la solución en botella ámbar.

Para estandarizar esta solución, realizar los siguientes datos en triplicado³: pesar 0,2 a 0,23 g de $K_2Cr_2O_7$. Pesar 2 g de KI, disolverlos en 80 ml de agua y agregar esta mezcla al $K_2Cr_2O_7$. Finalmente agregar 20 ml de HCl 1 N y dejar reposar por 10 minutos en oscuridad. Titular rápidamente esta solución con la *solución de tiosulfato de sodio* hasta un color amarillo pálido. Agregar unas gotas de *solución de almidón* como indicador y continuar la valoración hasta que una gota produzca la decoloración de la solución. Determinar la normalidad de la *solución de tiosulfato de sodio* usando la siguiente fórmula:

$$N_1 = \frac{gr K_2Cr_2O_7 \cdot 1000}{ml Na_2S_2O_3 \cdot 49,032}$$

Promediar los 3 resultados. Repetir la prueba si el rango de valores excede 0,003 N.

Solución Estándar de Yodo ($0,100 \pm 0,001$ N): Transferir a un vaso y mezclar 12,700 g de yodo y 19,100 g de yoduro de potasio (KI) cuidadosamente pesados. Añadir 2 a 5 ml de agua y mezclar bien. Continuar añadiendo agua en incrementos de 5 ml mientras se continúa mezclando hasta un volumen aproximado de 50 a 60 ml. Dejar reposar la solución un mínimo de 4 horas para asegurar la disolución de los cristales, mezclando ocasionalmente. Transferir la solución a un matraz de 1 litro y aforar con agua. La razón de peso yoduro-yodo debe ser de 1,5:1. Almacenar la solución en botella ámbar.

Nota: Estandarizar esta solución antes de usar.

Para estandarizar esta solución realizar los siguientes pasos en triplicado: pipetear 25 ml en un matraz Erlenmeyer de 250 ml de boca ancha. Valorar con la *solución estandarizada de tiosulfato de sodio* hasta un color amarillo pálido. Añadir algunas gotas de *solución de almidón* y continuar valorando hasta que una gota produzca la decoloración de la solución. Determinar la normalidad de la *solución de yodo* usando la siguiente fórmula:

$$N_2 = \frac{(S \cdot N_1)}{I}$$

Donde S es el volumen en ml de la *solución estandarizada de tiosulfato de sodio*, N_1 es la normalidad de la *solución estandarizada de tiosulfato de sodio* e I es el volumen en ml de la *solución de yodo*. Promediar los 3 resultados. Repetir la prueba si el rango de valores excede 0,003 N. La concentración de la *solución estandarizada de yodo* debe ser $0,100 \pm 0,001$ N. Si no lo es, repetir todo el procedimiento desde “Transferir a un vaso y mezclar 12,700 g de yodo...”

Metodología⁸

Este procedimiento se aplica tanto para muestras en polvo como granulares. Una muestra representativa puede necesitar molienda adicional hasta que 60% (o más) pase por malla 325 y 95% (o más) pase por malla 100. Secar la muestra molida y enfriar hasta temperatura ambiente en desecador.

Se requieren 3 muestras diferentes para determinar el número de yodo. Pesar las 3 muestras (M) de carbón seco considerando los miligramos. Transferir cada muestra a un matraz Erlenmeyer limpio y seco equipado con tapa de vidrio.

Pipetear 10 ml de *solución de ácido clorhídrico al 5%* en cada matraz, taparlo y agitar suavemente hasta que el carbón esté completamente mojado. Destapar los matraces y ubicarlos en plancha caliente bajo campana de gases hasta que el contenido hierva. Hervir suavemente por 30 ± 2 segundos para remover los sulfuros (que pueden interferir con los resultados). Retirar los matraces de la plancha caliente y enfriar hasta temperatura ambiente.

Estandarizar y pipetear 100 ml de *solución de yodo* en cada matraz.

Nota: Alternar la adición de solución estandarizada de yodo a los 3 matraces para no encontrar retrasos en la manipulación.

Inmediatamente tapar los matraces y agitar vigorosamente el contenido por 30 ± 1 segundos. Rápidamente filtrar cada mezcla por gravedad a través de una hoja de papel filtro plegada (Whatman N° 2V o equivalente) en tres vasos.

Nota: Preparar el equipo de filtrado con anterioridad para evitar retrasos al filtrar las muestras. Por cada filtrado, usar los primeros 20 a 30 ml para enjuagar la pipeta y luego descartarlos. Usar vasos limpios para recolectar el filtrado remanente, Mezclar cada filtrado moviendo el vaso y pipetear 50 ml dentro de 3 matraces Erlenmeyer. Valorar cada filtrado con la *solución estandarizada de tiosulfato de sodio* hasta un color amarillo pálido. Añadir 2 ml de *solución*

de almidón y continuar valorando hasta que una gota produzca la decoloración de la solución. Registrar el volumen (S) de *solución estandarizada de tiosulfato de sodio* usado.

Cálculos ⁸

La capacidad de un carbón para cada adsorbato depende de la concentración del adsorbato. La concentración de la *solución estándar de yodo* y del filtrado deben ser conocidas para determinar una masa de carbón apropiada para producir una concentración final acorde a la definición del número de yodo. La cantidad de muestra a usar en la determinación está gobernada por la actividad del carbón. Si la normalidad del filtrado (C) no está dentro del rango 0,008 a 0,040 N, repetir el procedimiento usando masas de carbón diferentes.

Una vez que la normalidad del filtrado se encuentra dentro del rango mencionado, realizar los siguientes cálculos para cada muestra de carbón:

$$A = (N_2)(12693.0)$$

Donde N_2 es la normalidad de la *solución estandarizada de yodo*.

$$B = (N_1)(126,93)$$

Donde N_1 es la normalidad de la *solución estandarizada de tiosulfato de sodio*.

Calcular el factor de dilución (DF) usando la ecuación

$$DF = \frac{(I + H)}{F}$$

Donde I es el volumen en ml de la *solución de yodo* usada en el procedimiento de estandarización, H es el volumen en ml de la *solución de ácido clorhídrico al 5%* usado y F es el volumen en ml de filtrado.

Calcular la masa en miligramos de yodo adsorbido por gramo de muestra (X/M) con la ecuación

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (DF)(B)(S)}{M}$$

Donde S es el volumen en ml de *solución estandarizada de tiosulfato de sodio* usada y M es el peso en gramos de la muestra.

Calcular la normalidad del filtrado residual (C) con la ecuación

$$C = \frac{N_1 \cdot S}{F}$$

Usando papel logarítmico, graficar X/M (como la ordenada) versus C (como la abscisa) para cada una de las 3 muestras de carbón. Calcular un ajuste de mínimos cuadrados para los 3 puntos y graficar. El número de yodo es el valor de X/M a una concentración residual de yodo (C) de 0,02 N. El coeficiente de regresión para el ajuste de mínimos cuadrados debe ser superior a 0,995.

Las masas de carbón pueden estimarse inicialmente usando 3 valores de C (usualmente 0,01, 0,02 y 0,03) con la ecuación

$$M = \frac{A - (DF)(C)(126,93)(50)}{E}$$

Donde M es la masa de carbón en gramos y E es el número de yodo nominal de la muestra. Si se han determinado nuevas masas de carbón, repetir el procedimiento y los cálculos.

4.6.4 Resultados

Las soluciones se prepararon de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM D4607. La estandarización de la solución de yodo también se efectuó siguiendo el procedimiento establecido por la norma ASTM D4507, mientras que la solución de tiosulfato de sodio se estandarizó mediante valoración de patrón primario dicromato de potasio. Los valores promediados para la normalidad de ambas soluciones fueron los siguientes:

Concentración solución de tiosulfato de sodio: $N_1 = 0,1001 \text{ N}$

Concentración solución estandarizada de yodo: $N_2 = 0,0996 \text{ N}$

La concentración de la solución estandarizada de yodo resultó ser $0,0004 \text{ N}$ menor al valor establecido, lo cual se ubica dentro del rango de tolerancia $\pm 0,001 \text{ N}$, por lo que es aceptada.

Debido a que la prueba de número de azul de metileno demostró que 400°C es una temperatura insuficiente para la activación de carbón de cáscaras de nueces y que la adsorción presentada por el carbón natural es muy baja, la prueba de índice de yodo se aplicó únicamente al carbón activado a 550°C .

La molienda de la muestra de carbón se realizó de manera manual en primer lugar disminuyendo el tamaño de partícula en mortero de cerámica, y pulverizándola a continuación en mortero metálico, luego de lo cual se secó en estufa a 140°C durante una noche y se dejó enfriar en desecadora.

Los resultados más representativos cuyo valor de concentración residual se ubicó dentro del rango establecido de $0,008$ a $0,040 \text{ N}$, a partir de los cuales se graficó la isoterma de adsorción de yodo se presentan en la tabla 4.6:

$$A = 1264,2228$$

$$B = 12,693$$

$$DF = 0,7$$

Masa de carbón (g)	Na ₂ S ₂ O ₃ gastado (ml)	X/M (mg/g)	C (N)
3,0030	3,80	409,7434	0,0076
2,0115	11,40	578,1420	0,0228
1,7980	14,83	629,8425	0,0297

Tabla 4.6: Valores obtenidos en ensayo de número de yodo.

A partir de los valores anteriores, se graficó la isoterma de adsorción de yodo (línea azul con rombos) y se confeccionó una regresión lineal a los datos (línea roja), la cual presentó un coeficiente de regresión de 0,9933, ligeramente inferior al valor establecido de 0,995. Sin embargo, los resultados serán aceptados. Lo anterior se observa en el gráfico 4.9, y una fotografía de las soluciones tratadas se entrega en la figura 4.9.

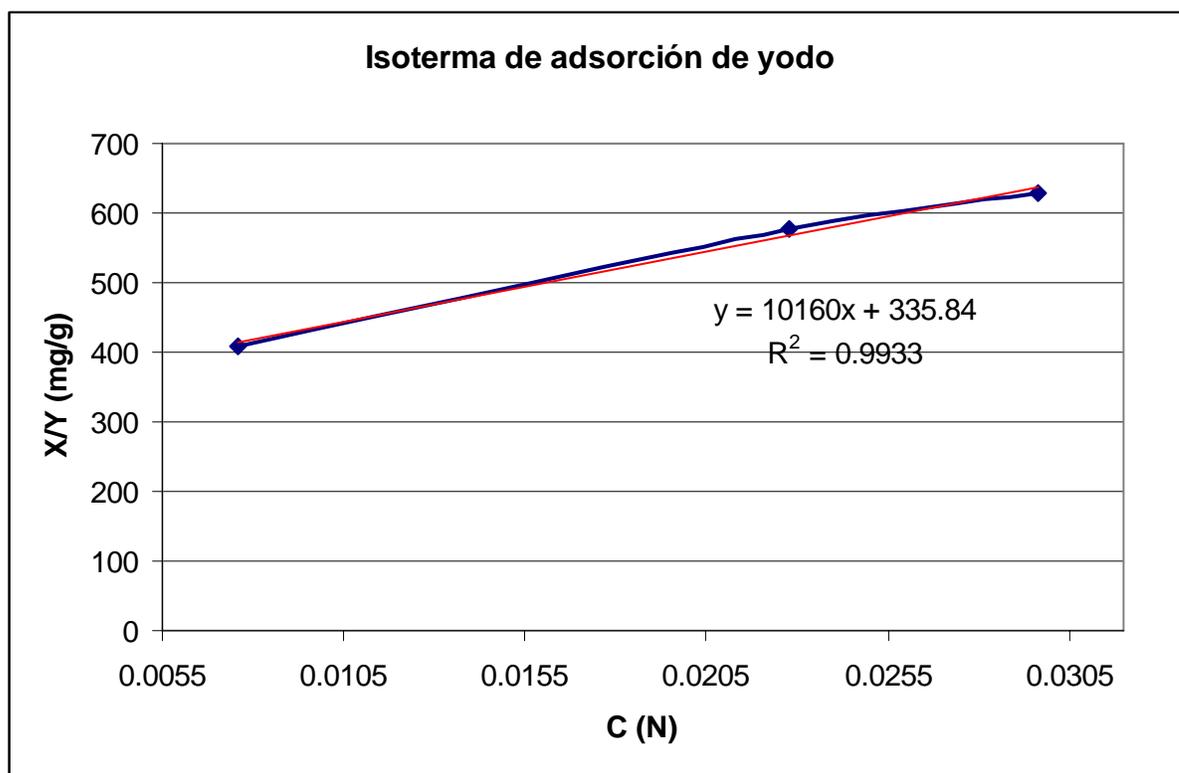


Gráfico 4.9: Isoterma de adsorción de yodo.

El índice de yodo se define como el valor de X/M para una concentración residual de 0,02 N, por lo que evaluando dicha concentración en la regresión lineal calculada se obtendrá el valor del índice de yodo para el carbón activado a 550°C:

$$X/M = 10160 \cdot 0,02 + 335,84$$

$$X/M = 539,04 \left(\frac{mg I}{g} \right)$$



Figura 4.9: Soluciones residuales de yodo luego de las pruebas.

El valor obtenido resultó ser inferior al índice de yodo que presentan ciertos carbones comerciales similares, el cual resulta ser de 700 (mg I/g) tanto para el carbón activado de cáscaras de coco producido por CARMEX⁹ como para el carbón activado de cáscaras de coco producido por APELSA.¹⁰

No obstante lo anterior, el índice de yodo obtenido fue superior al de otros ensayos de laboratorio similares realizados en estudios de producción de carbón activado, el cual resultó ser de 460 (mg I/g) para el carbón activado producido a partir de carbón subbituminoso por Zapata *et. al.*¹¹, de 264 (mg I/g) para el carbón activado producido a partir de lodos sanitarios por Guzmán *et. al.*⁷ y de 345 (mg I/g) para el carbón activado producido a partir de aserrín de eucalyptus por De la Cerda⁴.

El resultado obtenido refleja que la mesoporosidad del carbón activado de cáscaras de nueces producido se encuentra menos desarrollada que aquella del carbón activado comercial, pero se consiguió un mayor desarrollo que aquella lograda en las experiencias ya señaladas.

4.7 Pruebas de adsorción de oro y cobre

4.7.1 Descripción de la prueba

Esta prueba consiste en recircular por separado soluciones de cianuro de oro y cianuro de cobre a través de columnas de adsorción empacadas de carbón activado a 550°C, de manera de evaluar su capacidad de adsorción de estos metales relacionando la concentración inicial de la solución a tratar, su concentración residual luego de un determinado tiempo de filtrado y la masa del adsorbato retenido por masa de carbón empleada, tratando de modelar su isoterma de adsorción de ser posible.

Nota: Para una descripción más detallada de la prueba, consúltese el Capítulo 1, sección 1.5.1 Isotermas de Adsorción.

No se esperará a que la concentración de la solución residual llegue al equilibrio, ya que eso tomaría mucho tiempo y no sería representativo al tiempo que se esperaría de forma industrial. En su lugar se hará recircular la solución por una mini-columna de adsorción por un tiempo de 2 horas y se registrará la cantidad adsorbida para diferentes concentraciones iniciales, obteniendo así una curva representativa de la operación industrial.

Luego de graficados los puntos, las concentraciones residuales de las soluciones serán analizadas con objetivo de determinar qué ión fue adsorbido en mayor cantidad, para así tener una noción sobre la selectividad del carbón activado producido sobre el oro en soluciones combinadas.

4.7.2 Materiales y Reactivos necesarios

Materiales

- Columnas de vidrio
- Vasos de precipitados de 100 ml
- Tubos de ensayo
- Vidrios de reloj
- Matraces de aforo de 100 ml
- Pipetas de aforo de 10 ml
- Soportes universales
- Balanza analítica
- Peachímetro (o pH-metro)

Reactivos

- Cianuro de oro (AuCN) (solución a concentración inicial 2,0015 g/l de $Au(CN)_2^-$)
- Cianuro de cobre (CuCN)
- Cianuro de sodio (NaCN)
- Hidróxido de sodio (NaOH)

4.7.3 Procedimiento

Preparación de soluciones

Solución de hidróxido de sodio reguladora de pH (a pH 12,7): pesar 0,2004 gramos de NaOH en vaso de precipitados y disolver con alrededor de 50 ml de agua destilada. Traspasar la solución a matraz de aforo de 100 ml, enjuagando las paredes del vaso con agua destilada y aforar.

Soluciones de cianuro de oro (20, 30, 40, 70 y 100 ppm): pipetear 1; 1,5; 2; 3,5 y 5 ml de solución de cianuro de oro de concentración 2,0015 g/l en vasos de precipitados de 100 ml y mezclar con 85 ml de agua destilada. Rápidamente pipetear 1 ml de la solución reguladora de pH 12,7 en cada vaso, mezclar bien y medir su pH, agregando gotas de solución reguladora de NaOH hasta alcanzar un valor de pH de 10,7. Transferir las soluciones a matraces de aforo de 100 ml y aforar con agua destilada.

Soluciones de cianuro de cobre (20, 30, 40, 70 y 100 ppm): pesar por separado en balanza analítica y transferir a 5 vasos de precipitados de 100 ml las siguientes masas: 2,8 mg de CuCN más 15,3 mg de NaCN; 4,2 mg de CuCN más 23,0 mg de NaCN; 5,6 mg de CuCN más 30,6 mg de NaCN; 9,9 mg de CuCN más 54,2 mg de NaCN y finalmente 14,1 mg de CuCN más 77,2 mg de NaCN. Agregar 95 ml de agua destilada y mezclar hasta disolver los sólidos. Rápidamente pipetear 1 ml de la solución reguladora de pH 12,7 en cada vaso, mezclar bien y medir su pH, agregando gotas de solución reguladora de NaOH hasta alcanzar un valor de pH de 10,7. Transferir las soluciones a matraces de aforo de 100 ml y aforar con agua destilada.

Metodología

- Secar el carbón activado en estufa a 140°C durante una hora, enfriar en desecadora y pesar 10 muestras de 2 gramos en balanza analítica.
- Ubicar rejilla fina (se empleó malla ASTM 400) al interior de las columnas para evitar que el carbón caiga. Verter los 2 gramos de carbón en el interior de cada una y ubicar otra rejilla en la parte superior del packing para evitar que el carbón flote en caso de inundación.
- Montar las columnas en soportes universales y ubicar vasos de precipitados de 100 ml en su parte inferior para recibir el filtrado.

- Montar el sistema de goteo en el soporte universal, sobre las columnas de adsorción, e introducir la manguera en su parte superior manteniendo la pinza de estrangulamiento cerrada, tal como se observa en la figura 4.10.



Figura 4.10: Columna de adsorción y sistema de goteo montados.

- Tomar alícuotas de 10 ml de cada solución preparada para determinar posteriormente su concentración inicial en espectrofotómetro de llama, reservar en tubos de ensayo y verter los 90 ml restantes en el sistema de goteo.
- Regular la pinza de estrangulamiento hasta obtener el goteo deseado (se empleó un goteo que permitiera un flujo de 7,5 ml por minuto).
- Conectar una bomba peristáltica entre el vaso de precipitados y el sistema de goteo, de modo de recircular la solución, o bien, verter manualmente el filtrado en el sistema de goteo una vez que éste se haya vaciado.
- Permitir la recirculación por 2 horas, detener el proceso y tomar alícuotas de 10 ml de cada solución residual en tubos de ensayo para su posterior medición en espectrofotómetro de llama.

4.7.4 Resultados

Los iones metálicos se agregaron como cianuros, ya que de esta forma se les encuentra luego del proceso de lixiviación, y la intención de la prueba es conocer el comportamiento del carbón para aplicaciones en minería. El cianuro de oro se encuentra en solución en la forma de $Au(CN)_2^-$, por lo que la preparación de las muestras consiste simplemente en la dilución de la misma. El cianuro de cobre, por su parte, se encuentra en polvo, el cual es casi insoluble en agua, por lo que para preparar las soluciones es necesario aumentar la concentración de cianuro libre en la solución, ya que el CuCN puede ser disuelto en presencia de CN^- al formar los iones cianocuprosos $Cu(CN)_2^-$, $Cu(CN)_3^{2-}$ y $Cu(CN)_4^{3-}$ en soluciones acuosas.¹³

A valores de pH inferiores a 10, el cianuro se libera como gas en la forma de HCN, letalmente tóxico, por lo que debe mantenerse el pH sobre este valor. Como ya se mencionó, se pretende mantener condiciones de trabajo similares a las presentes en minería, por lo que el pH se regulará con adición de hidróxido de sodio. Navarro *et. al.* encontraron que a pH 10,5 tienen lugar los mejores resultados de adsorción de oro en carbón activado¹⁴, por lo que se trabajó a dicho valor, aunque previniendo leves descensos del pH durante las pruebas de adsorción, el mismo se reguló inicialmente a 10,7.

Para las muestras de cianuro de cobre se registraron los valores presentados en la tabla 4.7:

Nº de muestra	Masa de CuCN (mg)	Masa de NaCN (mg)	pH inicial	Masa de carbón (g)	Tpo. de recirc. (h)	Nº de reciclos
1	3,2	15,9	10,78	2,0001	2	7
2	4,6	23,2	10,73	2,0004	2	7
3	5,6	30,6	10,71	2,0004	2	7
4	9,7	54,0	10,71	2,0001	2	7
5	14,9	77,5	10,71	2,0005	2	7

Tabla 4.7: Valores registrados para las pruebas con cianuro de cobre.

Luego de medir en espectrofotómetro de llama la concentración de las alícuotas iniciales y finales de las soluciones tratadas, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4.8:

Nº de muestra	Conc. Inicial (ppm)	Conc. Final (ppm)	X/M [(mg/l)/g]
1	17,76	15,89	0,935
2	31,82	29,25	1,285
3	37,83	37,03	0,400
4	66,14	60,26	2,940
5	104,79	101,84	1,475

Tabla 4.8: Resultados obtenidos para las pruebas con cianuro de cobre.

Los cuales se observan en el gráfico 4.10:

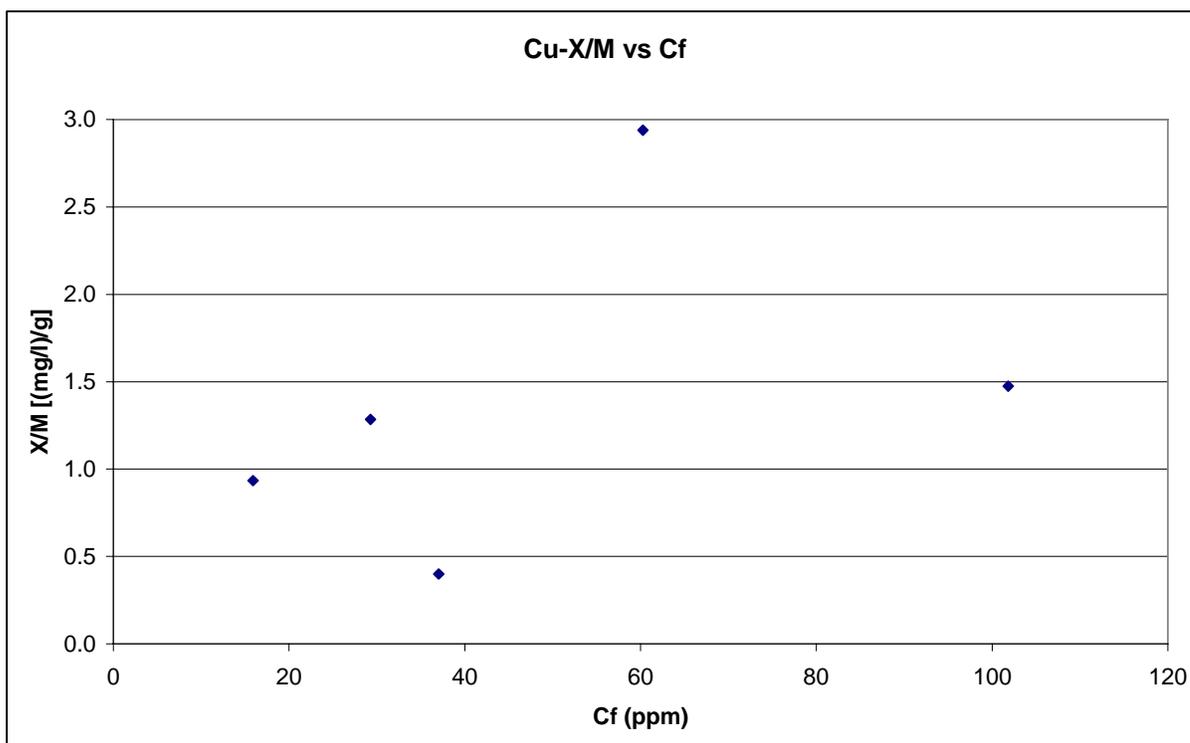


Gráfico 4.10: Adsorción de cobre respecto a concentraciones residuales.

Se observa una gran dispersión en los datos, por lo que temiendo errores experimentales, la prueba fue repetida en su totalidad, para lo cual fue necesario preparar más carbón.

Repitiendo el procedimiento de pirólisis y activación, se activó carbón a 560°C esta vez, para asegurar que la calidad del producto no fuera inferior a la obtenida anteriormente.

Suponiendo que uno de los posibles parámetros que causó la dispersión de los datos fuera la poca homogeneidad del carbón granular utilizado originalmente, esta vez se pulverizó el carbón en mortero metálico hasta que el 100% pasara por malla ASTM 100, para así asegurar menor tamaño de partícula y un lecho más uniforme, luego de lo cual se empacó la columna de vidrio y se agregó la solución de cianuro de cobre.

Esta vez se presentó un problema nuevo, ya que debido a la excesiva compactación del carbón en polvo, el líquido no fue capaz de atravesar el lecho, descendiendo apenas 5 milímetros en el packing al cabo de una hora de espera.

La primera solución propuesta fue adaptar un sistema de vacío en la parte inferior de la columna, la cual resultó ser un fracaso, ya que el líquido no descendió, sino que al ir aumentando el vacío de manera gradual, la bomba succionó el packing de carbón completo, incluidas las rejillas de soporte, por lo que la solución fue descartada.

La segunda solución propuesta fue mezclar el carbón con un material de relleno, de manera de evitar su compactación, y que fuera inerte respecto al proceso, para lo cual se emplearon bolitas de poliestireno expandido (plumavit). El material de relleno aumentó el volumen del lecho de carbón más de 4 veces, lo cual permitió que el líquido lo atravesara (aunque a una velocidad en extremo baja), por lo que finalmente se utilizó este método.

No obstante, aconteció otro problema, el cual consiste en que parte del carbón pulverizado era arrastrado por el líquido y atravesaba la malla ASTM 400 utilizada como soporte, por lo que la solución propuesta fue tamizar el carbón a emplear, de modo de retirar todas las partículas inferiores a $37\ \mu\text{m}$, para lo cual se utilizó una malla ASTM 400 y se dejó el carbón en el Ro-Tap del Laboratorio 3 durante 30 minutos a una amplitud de 40. De esta forma, el carbón finalmente empleado presentará un tamaño de partícula de entre $37\ \mu\text{m}$ a $149\ \mu\text{m}$.

Luego de todas las correcciones, la experiencia arrojó los valores que se presentan en la tabla 4.9:

Nº de muestra	Masa de CuCN (mg)	Masa de NaCN (mg)	pH inicial	Masa de carbón (g)	Tpo. de recirc. (h)	Nº de reciclos
1	3,0	15,9	10,71	2,0009	12	2
2	4,3	23,8	10,70	2,0003	12	2
3	6,2	30,8	10,70	2,0002	12	2
4	9,9	54,1	10,70	2,0006	12	2
5	14,9	77,6	10,75	2,0002	12	2

Tabla 4.9: Valores registrados para las pruebas con cianuro de cobre.

Luego de medir en espectrofotómetro de llama la concentración de las alícuotas iniciales y finales de las soluciones tratadas, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4.10:

Nº de muestra	Conc. Inicial (ppm)	Conc. Final (ppm)	X/M [(mg/l)/g]
1	17,3	18,1	-0,400
2	31,0	32,0	-0,500
3	42,4	41,7	0,350
4	70,4	81,1	-5,348
5	111,2	107,9	1,650

Tabla 4.10: Resultados obtenidos para las pruebas con cianuro de cobre.

Se aprecia a simple vista que estos resultados son absurdos, ya que la concentración final no puede ser mayor que la inicial, ni siquiera en el caso en que no se haya adsorbido nada de cobre, en cuyo caso ambas concentraciones serían idénticas.

Consultando sobre posibles causas de estos errores en los resultados, salió el dato de que no es la primera vez que sucede este tipo de lecturas en la máquina, por lo que atribuyéndole la culpa, se prefirió no repetir las pruebas por temor a recibir lecturas erróneas nuevamente. En su lugar se buscó un método alternativo de medición de concentración de cobre cianurado en solución acuosa, pero al no encontrar uno que entregara valores exactos para soluciones tan diluidas como las utilizadas, no hubo más alternativa que aceptar los datos dispersos obtenidos en un principio, eliminando los puntos que se escapan, es decir, el tercero y el cuarto.

El gráfico 4.11 muestra la modelación matemática para los datos empleando la isoterma de Freundlich, la cual describe bien el comportamiento en líquidos.

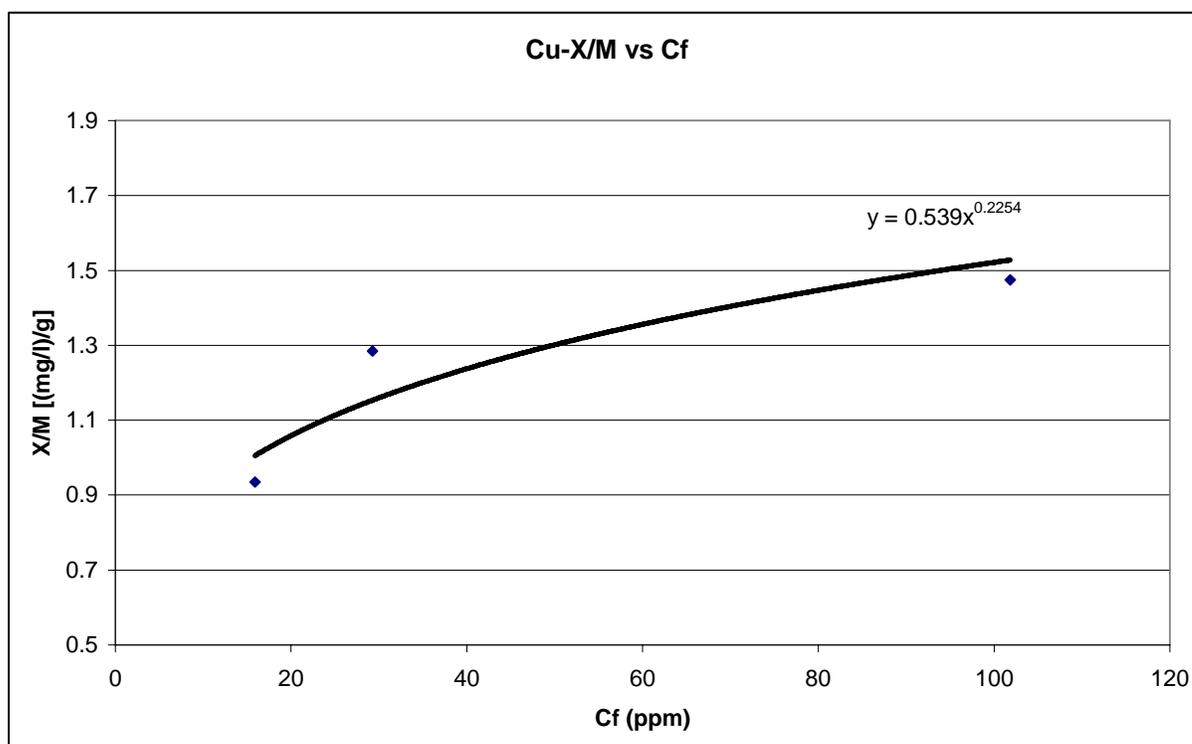


Gráfico 4.11: Isoterma de Freundlich para adsorción de cianuro de cobre.

Por otra parte, para las muestras de cianuro de oro se registraron los valores presentados en la tabla 4.11:

Nº de muestra	Vol. De AuCN (ml)	pH inicial	Masa de carbón (g)	Tpo. de recirc. (h)	Nº de reciclos
1	1,0	10,69	2,0001	2	7
2	1,5	10,71	2,0003	2	7
3	2,0	10,70	2,0002	2	7
4	3,5	10,69	2,0000	2	7
5	5,0	10,71	2,0002	2	7
6	15,0	10,68	2,0013	2	7

Tabla 4.11: Valores registrados para las pruebas con cianuro de oro.

Al igual que en las muestras de CuCN, luego de medir en espectrofotómetro de llama la concentración de las alícuotas iniciales y finales de las soluciones tratadas, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4.12:

Nº de muestra	Conc. Inicial (ppm)	Conc. Final (ppm)	X/M [(mg/l)/g]
1	21,48	0	10,739
2	32,15	0	16,073
3	40,53	0	20,263
4	73,54	0	36,770
5	103,25	0	51,620
6	353,40	0	176,585

Tabla 4.12: Resultados obtenidos para las pruebas con cianuro de oro.

Se observa que el ión cianuro de oro fue adsorbido completamente (o casi completamente, ya que el equipo de absorción atómica tiene una sensibilidad de 0,002 ppm) por el carbón activado en las distintas concentraciones preparadas.

A partir de estos datos no es posible graficar la isoterma de adsorción para el oro, debido a que no se alcanzó el equilibrio, sino que el adsorbato fue adsorbido completamente. Podría realizarse otra serie de pruebas con soluciones más concentradas de modo de lograr el equilibrio, pero dichas concentraciones no serían representativas a las encontradas en minería, y considerando que el objetivo en estas pruebas era determinar la selectividad del carbón producido sobre el oro en lixiviados mineros que contengan oro y cobre, el mismo se considera alcanzado, sin necesidad siquiera de comparar las constantes de adsorptividad de ambas isotermas, por lo que más soluciones son innecesarias.

4.8 Conclusiones

Al operar los equipos se descubrieron algunos detalles que quedaron luego de la instalación y puesta en marcha, tanto de los aparatos mismos como de las instalaciones del laboratorio, los cuales fue necesario solucionar antes de proseguir con las pruebas, no sólo para evitar malos funcionamientos, sino por conceptos de seguridad.

El reactor operó tal como se esperaba de acuerdo a los cálculos de diseño, alcanzando incluso una temperatura 2°C mayor a la teórica. Luego de un calentamiento de alrededor de 4 horas se consiguieron 555°C de temperatura en la parte interior superior del reactor, lo cual hace suponer sin gran margen de dudas que la temperatura era algunos grados mayor en el seno mismo.

El generador de vapor eléctrico fue reparado de manera que entregara una mayor presión de vapor que la atmosférica, la cual era insuficiente para difundir el vapor a través de los orificios de la chaqueta del reactor y a través del lecho de carbón en cada plato, luego de lo cual operó sin problemas, regulándosele la presión con la válvula de salida del vapor de manera que el flujo no fuera muy alto y arrastrara partículas de carbón hacia el exterior.

El carbón activado producido fue sometido a pruebas de laboratorio de manera de determinar parámetros tales como su número de azul de metileno, el cual resultó ser de 190 mg/l de azul de metileno adsorbidos por gramo de carbón, valor superior al de otros estudios similares realizados, y dentro del rango de comercialización del producto, por lo que se verifica que la macroporosidad del carbón activado producido puede competir con la de otros productos comerciales similares.

Asimismo, se determinó su índice de yodo de acuerdo a la norma ASTM D4607, el cual resultó ser de 539 mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón, valor también superior al de otros estudios similares, aunque inferior al de carbón activado de cáscaras de coco comercial, lo cual demuestra que su mesoporosidad es más baja que productos comerciales similares.

Finalmente se realizaron las pruebas de adsorción de oro y cobre en columnas de adsorción empacadas, comprobándose que el carbón activado producido adsorbe de manera selectiva el oro por sobre el cobre, encontrándose que adsorbe cantidades superiores a 175 ppm de cianuro de oro en 100 ml de solución por gramo de carbón activado utilizado, contrastado con una adsorción inferior a los 3 ppm de cianuro de cobre en 100 ml de solución por gramo de carbón, lo cual lo convierte en un producto atractivo para aplicaciones en minería de oro.

Como ya se demostró, el carbón activado producido presenta un número de yodo inferior al rango comercial. No obstante, el mismo sigue siendo de 539 mg de yodo (una molécula pequeña) adsorbidos por gramo de carbón, y aunque el número de azul de metileno se encuentra dentro del rango de comercialización, éste resulta ser de 15,22 mg de azul de metileno (una molécula grande) adsorbidos por gramo de carbón, lo cual demuestra que el carbón activado producido posee una mayor cantidad de macroporos que de mesoporos.

Tal como se mencionó, para lograr solubilizarse, el cianuro de cobre se combina con dos a cuatro iones cianuro extra, formando los iones cianocuprosos $Cu(CN)_2^-$, $Cu(CN)_3^{2-}$ y $Cu(CN)_4^{3-}$ (13), mientras que por su parte, el oro forma el ión $Au(CN)_2^-$ en el proceso de lixiviación (15), el cual permanece en solución sin necesidad de combinarse con otros iones cianuro. De esta forma, el complejo de cobre tiene un tamaño mayor al cianuro de oro, lo cual explica la selectividad del carbón activado producido, con mayor proporción de mesoporos que de macroporos, por la molécula de menor tamaño.

Por lo todo lo anterior se concluye que el diseño del reactor planteado fue acertado, que el reactor opera de la manera esperada y que el carbón activado producido presenta características que lo harían atractivo desde el punto de vista comercial, las cuales se podrían modificar para cada aplicación en particular variando algunos parámetros de activación, tal como es aumentar el tiempo de residencia, de manera de permitir un mayor desarrollo o una distribución diferente de la estructura porosa que la ya evaluada en este trabajo, lo cual lo acondicionaría para la adsorción de moléculas de diferentes tamaños.

4.9 Bibliografía

1. DARTEL. Capacidad de corriente. [en línea] Dartel Electricidad, Santiago, Chile. [citado Septiembre 6, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://www.dartel.cl/DetalleTablasTecnicas.asp?Id_TablasTecnicas=11
2. YBARRA, Raúl. Tratamientos térmicos de los metales. [en línea] Biblioteca de Joyería Ybarra, México. [citado Septiembre 13, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://www.raulybarra.com/notijoya/archivosnotijoya9/9recocido_temple_metales.htm
3. LEÓN, Marcelo. 2008. Producción de Carbón Activo a Partir de Cáscaras de Nueces: Vía Activación Química y Física. Informe Investigación y Proyecto III. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. 61 p.
4. DE LA CERDA, Marcela. 2009. “Factibilidad técnica-económica de planta de carbón activo”. Aplicación: Decoloración y clasificación. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso, Chile. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.
5. ZIM-EX INC. Coal based activated carbon specifications (granulated). [en línea] Zim-ex inc., Québec, Canada. [citado Octubre 4, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://zim-ex.en.ec21.com/Coal_based_activated_carbon_specifications--79990_79991.html
6. JUNWEN, Cao. Activated Carbon. Anthracite and other filter media... [en línea] Xiamen All Carbon Corporation (Activated Carbon Division), Xiamen, China. [citado Octubre 4, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.allcarbon.com.cn/upload/20095311143273499.pdf>

7. GUZMÁN, Fernando; LARRONDO, Jorge. Transformación de biosólidos en carbón activado: una nueva opción. [en línea] Revista Ecoamérica. Laboratorio de Biotecnología Ambiental. Departamento de Prevención de Riesgos y Medio Ambiente. Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile, 2009. [citado Septiembre 2, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.ecoamerica.cl/sitio/index.php?area=112>
8. ASTM Standard D4607-94. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon. ASTM International, 2006. West Conshohocken, PA, United States.
9. CARMEX. Carbón Activado Coco. [en línea] Carmex Servicio Técnico y Ventas, Tonalá, Jalisco, México. [citado Abril 15, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://carbonactivado.es.tl/CARBON-COCO.htm>
10. APELSA. CCA-700. [en línea] Apelsa Guadalajara, S.A. de C.V, Tonalá, Jalisco, México. [citado Abril 15, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.carbonapelsa.com.mx/pages/spanish/cca700s.html>
11. ZAPATA, Zulamita; ROJAS, Diego; ARENAS, Erika; CHEJNE, Farid; LONDOÑO, Carlos; PÉREZ, Juan. Producción de carbón activado a partir de carbón subbituminoso en reactores de lecho fluidizado por proceso autotérmico. Dyna, noviembre 2005, año/vol. 72, no. 147, p. 47-56. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
12. PONCE, Efraín. 2005. “Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada”. Capítulo 4. Tesis para optar al Título de Licenciatura en Ingeniería Civil. Cholula, Puebla, México. Universidad de las Américas Puebla.
13. HIGUERA, Oscar; TRISTANCHO, José; FLOREZ, Luis. Comportamiento electroquímico del cobre en soluciones cianuradas. Scientia Et Technica, septiembre 2007, año/vol. XIII, número 036, p. 239-244. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

14. NAVARRO, P.; VARGAS, C.; ALGUACIL, F. Adsorción de oro en carbón activado en medio tiosulfato-amoniaco. Resumen. [en línea] Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España, 2004. [citado Junio 7, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.unap.cl/cim3/PDF/34.pdf>
15. KUBACH, Charles. Gold Cyanide Solution (Leaching Gold With Cyanide) [en línea] Mine-Engineer.com, Long Beach, CA, USA. [citado Marzo 15, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://www.mine-engineer.com/mining/minproc/cyanide_leach.htm

Capítulo 5. Evaluación Económica

5.1 Introducción

Como ejercicio de utilidad para el presente proyecto de título se procedió a postular en la primera convocatoria de proyectos realizada por la Incubadora de Proyectos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, *Chrysalis*, presentando el actual proyecto con objetivo de conocer sus fortalezas y debilidades desde el punto de vista económico.

Para llevar a cabo lo anteriormente señalado fue necesario convertir el proyecto original de diseño de un reactor de laboratorio a uno de pequeña empresa, escalando los equipos necesarios, estimando costos de inversión, puesta en marcha y operación, además de calcularse un flujo de caja para los primeros cinco años de vida útil del proyecto.

Una vez hechos los cálculos económicos respectivos, determinando la inversión total necesaria además de la bondad económica del proyecto, se rellenó un formulario explicativo y se despacharon al proceso de selección.

Son aquellos cálculos económicos los que se presentan en el Capítulo que inicia a continuación, “Evaluación Económica”.

5.2 Inversión Total

5.2.1 Capital Fijo

El capital fijo está constituido por todas las inversiones y gastos necesarios para que la planta quede instalada. Incluye todas las inversiones y gastos involucrados en la compra de terrenos, adquisición de equipos, cañerías, instrumentos, aislamiento, fundaciones, estructuras, edificios, además de los costos de preparación de terreno, montaje, ingeniería y gastos de administración hasta que la planta esté lista para operar.

- Capital Fijo
- Capital Fijo Directo**
 - Equipos de procesos
 - Instalación de los equipos
 - Instrumentación y control
 - Cañerías de procesos
 - Instalaciones eléctricas
 - Edificios de planta
 - Servicios de planta
 - Terrenos
 - Preparación del terreno
 - Capital Fijo Indirecto**
 - Ingeniería y supervisión
 - Gastos de construcción
 - Honorarios contratista
 - Gastos legales
 - Contingencias

Capital Fijo Directo

Los valores de los equipos se resumen en la tabla 5.1:

Equipo	Valor (en pesos \$)
Reactor	700.000
Reactor escalado	4.935.000
Generador de vapor	1.000.000

Tabla 5.1: Costo de los equipos.

Nota: El valor exacto del reactor fue de \$ 698.860 y fue construido en Bettoli S.A. Se adjunta una copia de la cotización en el Anexo C.

Los valores de instrumentación se resumen en la tabla 5.2:

Instrumento	Valor (en pesos \$)
Controlador de temperatura	150.000
Termocupla	40.000
Nicrones	84.000

Tabla 5.2: Costo de la instrumentación del reactor.

Comúnmente en las plantas químicas el costo de las instalaciones eléctricas es del 10 al 15% del costo de los equipos de planta. Sin embargo, este rango puede crecer hasta el 40% para algunas plantas de procesos. Para efectos del actual proyecto, el costo de las instalaciones eléctricas se estimó en un 10% del costo de los equipos.

El costo de las cañerías instaladas se determinó considerando el costo para el reactor de laboratorio original y extrapolando de manera no lineal hasta el equipo de mayor tamaño presentado.

El costo de servicios de planta incluye la inversión en capital para las instalaciones que suministran vapor, agua, combustible, aire y otros servicios.

El costo de servicios de planta en las plantas químicas está en el rango de 30 a 80% del costo de compra de los equipos, con un 55% de promedio para plantas de procesamiento fluido-sólido.

Para plantas de proceso continuas pequeñas de un solo producto se deberá tomar el límite inferior del rango. Para plantas con múltiples procesos, grandes y nuevas, en una localización nueva se debe tomar un valor cercano al límite superior. Para el actual proyecto se tomó el límite inferior, es decir, 30%.

Debido a que la Incubadora de Proyectos proporcionaría lugar físico, suministro eléctrico, así como algunos otros servicios de apoyo al proyecto, sólo se consideraron los ítems anteriormente citados en el cálculo del capital fijo directo.

Los ítems finalmente considerados se resumen en la tabla 5.3:

Ítem	Valor (en pesos \$)
Cañerías instaladas	296.750
Instalaciones eléctricas	593.500
Servicios de planta	1.780.500

Tabla 5.3: Costos de inversión en capital fijo directo.

Capital Fijo Directo: \$ 8.879.750

Capital Fijo Indirecto

Al igual que en el capital fijo directo sólo se consideraron aquellos ítems que escapaban del financiamiento de la Incubadora de Proyectos.

En primer lugar se consideró el costo de ingeniería y supervisión, el cual incluye:

- Licencia de Software.
- Viajes.
- Comunicaciones.
- Gastos de oficina.
- Consultores.
- Gastos administración central.

Este costo para plantas químicas es 10 a 20% del costo de compra de los equipos. No obstante, la Incubadora de Proyectos proporciona parte del financiamiento para estos ítems, por lo que se consideró un porcentaje inferior al rango sugerido, el cual contempla financiamiento propio (o préstamo en su defecto). En este caso se tomó sólo un 5% como financiamiento propio.

Los gastos legales incluyen una serie de otros gastos de organización de la empresa que hay que efectuar para instalar una planta química, que comprende gastos de tipo legal, como son los gastos notariales, gastos de constitución de la sociedad, pago de derechos y permisos, y otros de menor cuantía. Este costo puede estimarse del orden del 1 a 3% de la inversión en capital fijo. Se estimó en un 1%.

Las contingencias son incluidas en la estimación del capital fijo para compensar los eventos impredecibles como tormentas, inundaciones, huelgas, cambios de precio, pequeños cambios en el diseño, errores de estimación y otros gastos inesperados. Su valor generalmente se estima entre un 5 a 15% de los costos directos e indirectos de la planta. Para este proyecto se estimó en un 5%.

Los ítems considerados y sus costos estimados se resumen en la tabla 5.4:

Ítem	Valor (en pesos \$)
Ingeniería y supervisión	443.988
Costos legales	99.189
Contingencias	495.943

Tabla 5.4: Costos considerados para el capital fijo indirecto.

Capital Fijo Indirecto: \$ 1.039.120

Por lo tanto:

Capital Fijo: \$ 9.918.870

5.2.2 Capital de Trabajo

El capital de trabajo lo componen todos los gastos necesarios para que una vez instalada la planta, esta quede en condiciones de operar. Incluye los gastos relacionados con la adquisición de materias primas e insumos, pagos de sueldos y todo gasto operacional que se necesite para

un periodo de tiempo determinado. Para plantas químicas normales su valor es del 10 al 20% del capital total de inversión. En este caso se consideró un 10%.

Capital Total de Trabajo: \$ 1.212.306

5.2.3 Costos de Puesta en Marcha

Después que la construcción de la planta ha sido terminada, frecuentemente es necesario realizar cambios para que la planta pueda operar a su máxima capacidad de diseño. Estos cambios envuelven gastos en materiales y equipos, teniendo como resultado pérdidas de ganancias mientras la planta esté parada o funcionando con sólo parte de su capacidad. Estos gastos pueden alcanzar del 8 al 10% de la inversión en capital fijo.

Los gastos de la puesta en marcha pueden ir como parte de la inversión requerida o como un gasto del primer año de operación de la planta dependiendo de las políticas de la empresa. Para el actual proyecto se consideró el 10% del capital fijo como parte de la inversión inicial.

Costos de Puesta en Marcha: \$ 991.887

5.2.4 Inversión Total

El capital total de inversión está constituido por todas las inversiones necesarias para dejar una planta industrial lista para operar. Corresponde a la suma entre capital fijo, capital de trabajo y costos de puesta en marcha.

Inversión Total: \$ 12.123.063

5.3 Beneficio Actual

5.3.1 Costo Total del Producto

El costo total del producto corresponde a todos los gastos y desembolsos necesarios desde el punto de partida de la fabricación del producto en la planta hasta su colocación en el mercado. Este costo se subdivide en:

Costo Total del Producto { Costo de Producción
Gastos Generales de Empresa

Costo de Producción

El costo de producción o costo de operación comprende todos los gastos relacionados con la operación y producción de la planta. Se pueden subdividir en tres categorías principales:

Costo de Producción { Costos Directos de Producción o Costos Variables
Costos Indirectos de Producción o Costos Fijos
Costos Generales de Planta

Costos Directos de Producción

Los costos directos de producción o costos variables incluyen todos los gastos directamente asociados con la operación de la planta:

Costos Directos de Producción { Materias Primas
Personal de Planta
Supervisión
Servicios Generales
Mantenimiento y Reparación
Suministros de Operación
Gastos de Laboratorio
Patentes y Royalties

Materias Primas

Debido a la baja producción de carbón activado que se produciría al presentar el proyecto a la Incubadora *Chrysalis* se optó por utilizar un valor promedio de venta minorista de cáscaras de nueces, el cual corresponde a \$150 por kilogramo, para así obtener resultados más cercanos a la realidad.

Ya que la producción propuesta de carbón activado es de 1 kilogramo por hora, y sabiendo que la eficiencia del proceso es de 33,22% tal como se menciona en los cálculos de diseño del reactor, las cáscaras necesarias serán 82,25 kg por hora, por lo que considerando 3 turnos de trabajo y 350 días laborales anuales, se requerirán 25,29 toneladas anuales.

Personal de Planta

Para el proyecto presentado, el personal de planta requerido es de un ingeniero químico y dos operadores, cubriendo de esta forma tres turnos de trabajo y realizando una producción continua. Para minimizar gastos y aumentar los beneficios, los salarios elegidos fueron relativamente bajos, estimados en \$800.000 mensuales para el ingeniero y \$200.000 mensuales para cada operador.

Servicios Generales

Son los costos de los suministros de planta, tales como el vapor, electricidad, agua de enfriamiento, de procesos y potable, aire de compresión, refrigeración, gas natural y petróleo. Los costos de cada uno de estos suministros generalmente son fáciles de determinar ya que su abastecimiento es local.

Para una estimación rápida en el proyecto presentado se consideró un 10% del costo total del producto.

Mantenimiento y Reparación

Estos gastos incluyen los costos del personal, materiales y supervisión. El costo de este ítem se determina generalmente como un porcentaje del costo físico de la planta. Para industrias en las cuales no hay equipos delicados ni materiales de alto costo, el costo de este ítem será del 3 al

4% del costo físico de la planta (equipos instalados incluyendo las instalaciones anexas). Para plantas que cuentan con equipos de alto costo y que son delicadas, tales como equipos construidos en acero inoxidable o de vidrio u otros elementos frágiles, el costo puede subir hasta un 15% del costo físico de la planta. Se consideró un 3% del capital fijo por no tener equipos frágiles ni con partes móviles.

Suministros de Operación

En cualquier operación de producción son muchos y variados los suministros necesarios para la operación de la planta, tales como lubricantes, solventes, sets de análisis químicos, y otros que no pueden ser considerados como materias primas o materiales de reparación o mantenimiento. El costo anual de los suministros es cerca del 15% del costo total de mantenimiento y reparación.

Tal como en el cálculo de la inversión total, debido a que *Chrysalis* proporcionará algunos beneficios y financiamiento, no fue necesario considerar la totalidad de los ítems mencionados en un principio. El resumen de los ítems anuales considerados para el cálculo del costo directo de producción se presenta en la tabla 5.5:

Ítem	Valor (en pesos \$)
Materias Primas	3.792.896
Personal de Planta	14.400.000
Servicios Generales	3.533.458
Mantenimiento y Reparación	297.566
Suministros de Operación	44.635

Tabla 5.5: Ítems considerados en el costo directo de producción.

Costos Directos de Producción: \$ 22.068.555

Costos Indirectos de Producción

Los costos indirectos de producción o costos fijos los constituyen gastos que están siempre presentes aunque la planta esté parada, y que no dependen de la cantidad producida. Los costos fijos más importantes son:

Costos Indirectos de Producción	{	- Depreciación
		- Contribuciones e Impuestos
		- Interés por financiamiento
		- Seguros
		- Arriendos

Depreciación

Se consideró una depreciación lineal de los equipos, asignándoles una vida útil de 10 años y un valor de salvamento del 10% de su costo inicial.

Seguros

Para equipos y maquinarias en condiciones normales de operación las primas a pagar anualmente son del orden del 0,5 al 1% sobre el valor del bien asegurado, subiendo hasta el doble para industrias que manipulan productos inflamables y explosivos. Para los edificios estas primas pueden oscilar entre 0,3 y 0,8% del valor asegurado. Debido a que los equipos empleados en este proyecto trabajarán en condiciones normales, se consideró un 0,5% del costo de los mismos.

No se consideraron gastos por arriendo, ya que las instalaciones serían proporcionadas por *Chrysalis*, así como tampoco intereses por financiamiento. Los gastos por impuestos se calcularán más adelante, en la sección correspondiente al flujo de caja.

El resumen de los ítems considerados para el cálculo de los costos indirectos de producción anuales se presenta en la tabla 5.6:

Ítem	Valor (en pesos \$)
Depreciación	534.150
Seguros	29.675

Tabla 5.6: Ítems considerados en los costos indirectos de producción.

Costos Indirectos de Producción: \$ 563.825

Costos Generales de Planta

Los costos generales de planta incluyen todos los gastos no incluidos en los costos anteriores (costos directos e indirectos) y que tienen una relación directa con la operación de la planta.

No deben confundirse con los gastos generales de una empresa. Estos costos se estiman entre un 50% y 70% de los costos que suman el personal de operación y de mantención, incluyendo los supervisores respectivos. Para este cálculo se consideró un 50%.

Costos Generales de Planta: \$ 7.348.783

Gastos Generales de Empresa

Los gastos generales de empresa son todos aquellos gastos, fuera de los de operación, necesarios para llevar el producto al mercado. Se incluyen aquí los gastos generales de administración, gastos de distribución y ventas e investigación y desarrollo.

- Gastos Generales de Empresa {
- Gastos de Administración
 - Gastos de Distribución y Ventas
 - Investigación y Desarrollo

Gastos de Administración

Aquí se incluyen los gastos de la oficina central:

- Sueldos de ejecutivos.
- Sueldos de personal administrativo.
- Servicios de ingeniería.
- Servicios legales.
- Gastos de oficina.
- Comunicaciones.
- Viajes y transportes.
- Otros.

Para una estimación preliminar se puede considerar del 20 al 30% del costo del personal de planta. Se consideró el 20%.

Gastos de Distribución y Ventas

En estos gastos se incluyen todos los desembolsos relacionados con el almacenamiento central, despacho, fletes, marketing, comisiones por ventas, y asistencia post ventas. Para una estimación preliminar estos alcanzan del 2 a 20% del costo total del producto. Se empleó un 5%.

Imprevistos

Fuera de todos los costos anteriores deben considerarse los eventos impredecibles que pueden acontecer, tales como variaciones de precio por efecto de catástrofes climáticas, etc. Se utiliza entre 1 al 5% del costo total del producto. Para efectos de cálculo se consideró el 2%.

Los costos de investigación y desarrollo, por ser aportados por la Incubadora de Proyectos fueron omitidos.

El resumen de los ítems considerados en los gastos generales de empresa se presenta en la tabla 5.7:

Ítem	Valor (en pesos \$)
Gastos de Administración	2.880.000
Gastos de Distribución y Ventas	1.766.729
Imprevistos	706.692

Tabla 5.7: Ítems considerados en los gastos generales de empresa.

Gastos Generales de Empresa: \$ 5.353.421

Por lo tanto:

Costo Total del Producto: \$ 35.334.584

5.3.2 Ganancias Totales por Venta

Luego de realizar los cálculos para determinar el costo total del producto (o costo de producción) se procedió a calcular las ganancias totales por venta, utilidad operacional, o como se identificaba en el formulario requerido por *Chrysalis*, la “Bondad Económica” del proyecto.

La utilidad operacional se obtiene al restar el costo total del producto a los ingresos por venta.

Para determinar los ingresos por venta es necesario determinar el valor de venta del carbón activado que se producirá, así como la cantidad producida.

El reactor diseñado originalmente produce 71,28 gramos de carbón activado por hora de trabajo. Sin embargo, con motivo de participar en la convocatoria de *Chrysalys*, dicho reactor se escaló para obtener una producción de 1 kilogramo de carbón activado por hora, es decir, una producción de 14 veces la original.

Teniendo la cantidad producida sólo falta el valor de venta del producto. Existía la posibilidad de considerar el valor de importación/exportación proporcionado por Aduana. Sin embargo, este valor no sería representativo del valor de venta que realmente cobraría una pequeña empresa, que vende su producto al detalle con un propósito definido y con un comprador o mercado bien delimitado, razón por la cual se buscaron precios minoristas de carbón activado dentro del mercado chileno, para luego obtener un precio cercano a los mismos, el cual finalmente se estimó en \$ 5.000 por kilogramo, un cuarto del precio de venta de carbones activados comerciales para peceras ya conocidos en el mercado.

Tal como se mencionó en los cálculos del costo total del producto, se cubrirán los tres turnos de trabajo, por lo que los ingresos por venta anuales se determinaron considerando una operación continua. Finalmente, los ingresos por venta anuales obtenidos son los siguientes:

Ingresos por Venta: \$ 42.000.000

Por lo tanto:

Utilidad Operacional Anual: \$ 6.665.416

5.4 Flujo de Caja

Los ítems considerados en el cálculo del flujo de caja fueron mencionados en las secciones anteriores de éste capítulo.

La Incubadora de Proyectos solicitaba el cálculo del flujo de caja considerando una vida de cinco años para el proyecto, y pese a que las proyecciones no son finalizar su vida en dicho tiempo, con motivos de cálculo y presentación de formularios se decidió recuperar el capital de trabajo así como el valor de libro de los equipos en dicho año, tal como si se tratara del último año de vida del proyecto.

Por su parte, debido a la ausencia de intereses por financiamiento y al no existir venta de activos, los ingresos gravables son directamente la resta entre la utilidad operacional y las pérdidas del ejercicio anterior (que no se presentaron en ningún año), y de acuerdo al Artículo N° 20 de la Ley de Impuesto a la Renta, el impuesto aplicado a partir del año 2004 equivale al 17% del ingreso gravable.

El valor de libro recuperado al quinto año corresponde al costo inicial faltante por depreciar en ese momento, y su cálculo se detalla en el Apéndice B.

Luego de ordenar todos los costos en una planilla de cálculo, el flujo de caja neto así como el flujo de caja acumulado resultantes se presentan en la tabla 5.8:

Año	0	1	2	3	4	5
Producción (kg)		8.400	8.400	8.400	8.400	8.400
Precio por kg.		5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Ingresos por venta		42.000.000	42.000.000	42.000.000	42.000.000	42.000.000
Costo Total del Producto		35.334.584	35.334.584	35.334.584	35.334.584	35.334.584
Utilidad Operacional		6.665.416	6.665.416	6.665.416	6.665.416	6.665.416
Pérdidas del Ejercicio Anterior						
Ingreso Gravable		6.665.416	6.665.416	6.665.416	6.665.416	6.665.416
Impuesto		1.133.120	1.133.120	1.133.120	1.133.120	1.133.120
Depreciación		534.150	534.150	534.150	534.150	534.150
Pérdidas del Ejercicio Anterior						
Valor de Libro						3.264.250
Capital de Trabajo						1.212.306
Inversión Total	12.123.063					
Flujo de Caja Neto	-12.123.063	6.066.445	6.066.445	6.066.445	6.066.445	10.543.001
Flujo de Caja Acumulado	-12.123.063	-6.056.618	9.827	6.076.272	12.142.717	22.685.719

Tabla 5.8: Flujo de caja para una vida de 5 años.

De aquí se observa que la inversión inicial ya se recupera el segundo año de vida del proyecto, y que desde ese momento el flujo de caja acumulado ya empieza a exhibir ganancias.

5.4.1 Cálculo del VAN

Para el cálculo del valor actualizado neto, o VAN, es necesario en primer lugar definir la tasa mínima atractiva de retorno, o TMAR.

El valor de la TMAR debe superar la rentabilidad ofrecida en el mercado de capitales y además debe considerar un premio al riesgo, que será mayor mientras más arriesgada sea la inversión.

En términos sencillos, la TMAR se puede calcular como la suma entre la tasa de inflación y el premio al riesgo. Este último puede superar el 12%, sin límite superior definido, dependiendo del riesgo del negocio en el cual se desea invertir.

Pese a que el carbón activado no es un producto nuevo, el mercado del mismo en Chile es escaso, por lo que puede considerarse riesgoso, por lo que finalmente, prefiriendo emplear un valor conservador para la TMAR, se considera un 35%.

Aplicando la función *VNA* a la planilla de cálculo de Excel en donde se realizó el flujo de caja, tomando como TMAR un 35%, considerando los flujos desde el año 1 en adelante y sumando finalmente el flujo negativo del año 0, el valor del VAN obtenido es el siguiente:

VAN: \$ 2.342.544

El criterio de selección a partir del VAN es el siguiente:

VAN > 0: El proyecto aporta ganancias, por lo que conviene realizarlo.

VAN = 0: Sólo se recupera la inversión a la tasa de retorno considerada, por lo que realizar el proyecto es indiferente.

VAN < 0: No es conveniente realizar el proyecto.

Por lo tanto, siendo el VAN calculado mayor a 0, el proyecto es rentable y conviene realizarlo.

5.4.2 Cálculo del TIR

Se define la tasa interna de retorno, o TIR, como la tasa de interés que torna cero el valor presente del proyecto.

Para la aplicación del TIR como sistema de selección es necesario en primer lugar que el flujo de caja presente una forma convencional o simple, es decir, que sólo presente un cambio de signo, lo cual se comprueba cuando los ingresos son negativos los primeros años y luego comiencen a ser positivos, no volviendo a presentarse pérdidas.

Si el flujo de caja presenta una forma no convencional, es decir, presenta múltiples cambios de signo, el cálculo del TIR arrojará múltiples resultados, lo cual puede inducir a tomar una decisión equivocada.

Afortunadamente, el proyecto aquí presentado posee un flujo de caja convencional, por lo que la aplicación del TIR como método de selección no presenta riesgos.

Al aplicar la función *TIR* en la planilla de cálculo de Excel en donde se confeccionó el flujo de caja entre todos los valores desde el año 0 al año 5, el valor obtenido es el siguiente:

TIR: 44,77%

Para que un proyecto sea rentable económicamente, el valor del TIR calculado debe ser mayor al de la TMAR empleada, y tal como se explicó en la sección anterior, la TMAR considerada será del 35%, por lo que siendo el TIR calculado superior a este valor, se confirma la rentabilidad del proyecto ya determinada en el cálculo del VAN.

5.5 Análisis de Sensibilidad

En el análisis económico están involucradas estimaciones de cantidades futuras, las cuales muy probablemente contendrán algún grado de error (desviación). Estas desviaciones pueden tener efectos tan considerables que lleven a cambiar la decisión económica.

La identificación de aquellas variables o parámetros cuyas desviaciones tienen un considerable efecto en el resultado final permite realizar estudios más profundos de las mismas, para mejorar las estimaciones y reducir el grado del error.

El análisis de sensibilidad es un estudio para ver de qué manera se altera la decisión económica con la variación de las variables o parámetros considerados en el análisis económico.

Para el actual Proyecto de Título se consideraron tres importantes variables en el análisis de sensibilidad, a saber: variación del precio de compra de las cáscaras de nueces, variación del precio de venta del carbón activado y variación del volumen de producción de carbón activado.

5.5.1 Variación del Precio de compra de las cáscaras de nueces

El proyecto posee una única materia prima: las cáscaras de nueces, es por eso que la variación de su precio de compra podría llegar a afectar fuertemente su rentabilidad.

El análisis de sensibilidad se efectuó realizando un barrido entre el -90% al +200% del precio original considerado, es decir, de \$150 por kilogramo, con un incremento del 10%.

Cada variación modificó los costos directos de producción, ya que el costo de las materias primas está involucrado en su cálculo, y a su vez éste modificó el costo total del producto.

Los resultados para las variaciones luego de realizar los cálculos para cada nuevo valor se resumen en la tabla 5.9:

Precio cáscaras de nueces		
% variación	TIR	VAN
-90%	75,14%	9920618
-80%	71,83%	9078610
-70%	68,51%	8236601
-60%	65,17%	7394593
-50%	61,82%	6552585
-40%	58,45%	5710577
-30%	55,07%	4868568
-20%	51,66%	4026560
-10%	48,23%	3184552
0%	44,77%	2342544
10%	41,29%	1500535
20%	37,77%	658527
30%	34,22%	-183481
40%	30,64%	-1025489
50%	27,01%	-1867498
60%	23,33%	-2709506
70%	19,60%	-3551514
80%	15,80%	-4393522
90%	11,94%	-5235531
100%	8,00%	-6077539
110%	3,97%	-6919547
120%	-0,16%	-7761555
130%	-4,41%	-8603564
140%	-8,80%	-9445572
150%	-11,79%	-10079098
160%	-12,62%	-10417598
170%	-13,41%	-10756098
180%	-14,18%	-11094598
190%	-14,92%	-11433099
200%	-15,64%	-11771599

Tabla 5.9: Variación de los indicadores económicos TIR y VAN según precio de cáscaras de nueces.

La representación de los datos tabulados se presenta en los gráficos 5.1 y 5.2.

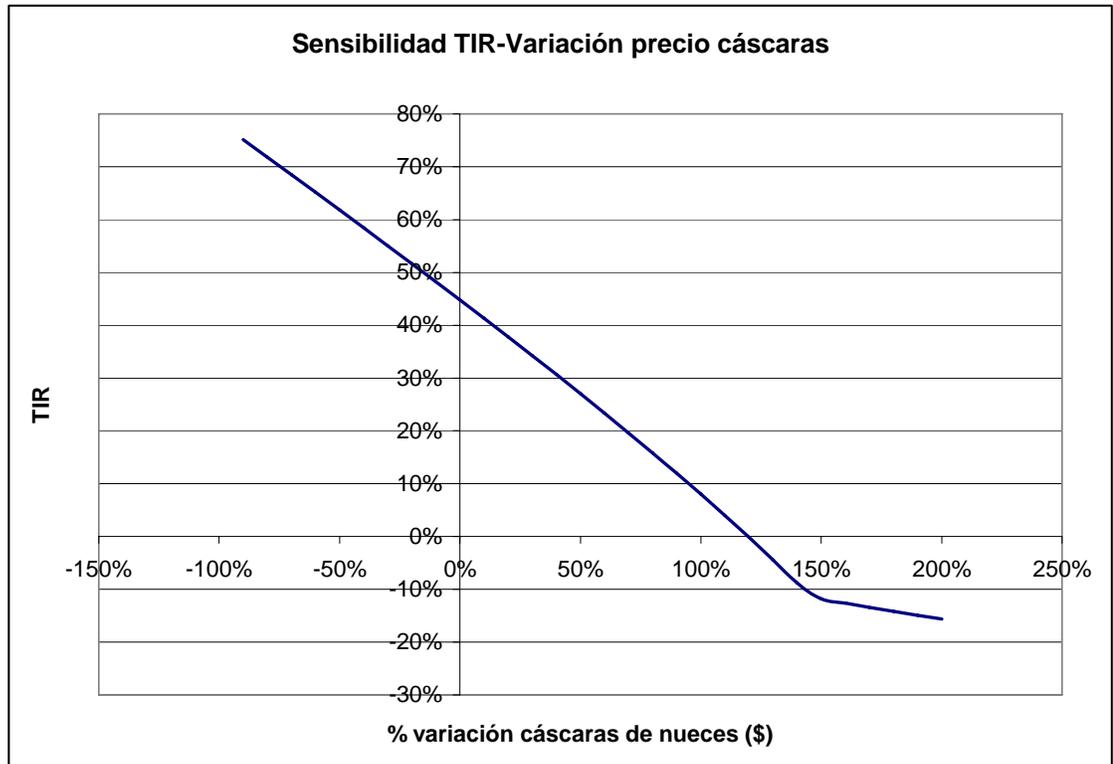


Gráfico 5.1: Variación del TIR respecto al precio de las cáscaras de nueces.

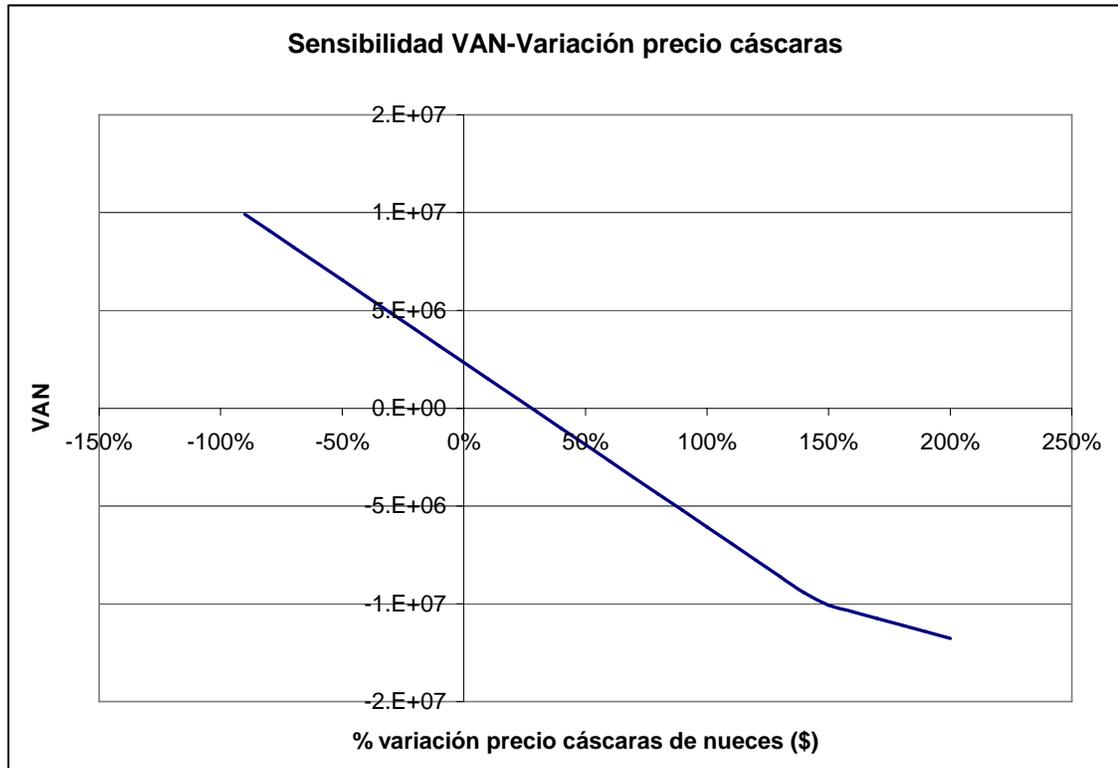


Gráfico 5.2: Variación del VAN respecto al precio de las cáscaras de nueces.

La manera de interpretar estos gráficos es determinar el punto en el cual el TIR cruza el valor de la TMAR, es decir, 35%, y el VAN cruza el eje X.

Como es de esperarse, ambos gráficos coinciden en dicho valor, el cual se encuentra alrededor del 30% de variación del precio de las cáscaras de nueces. En otras palabras, el proyecto no presenta una excesiva sensibilidad al precio de compra de las materias primas, permitiendo un aumento del 30% en el mismo antes de dejar de ser rentable.

Cabe señalar que el cambio de pendiente de la curva alrededor del 145% de variación del precio de las cáscaras se debe a la aparición de pérdidas del ejercicio anterior, por lo que al no pagarse intereses a partir de ese porcentaje de variación, la velocidad de disminución de los indicadores económicos disminuye.

5.5.2 Variación del Precio de venta del Carbón Activado

Como se puede suponer, el proyecto puede ser sensible a las variaciones del precio de venta del producto final, carbón activado, por lo que será de interés analizar su sensibilidad dentro del mismo rango de variación que se utilizó para el valor de las cáscaras de nueces, es decir, entre un -90% a un +200% del valor original de venta considerado de \$5.000 por kilogramo, con un incremento del 10%.

Se estima que la sensibilidad del proyecto a este factor será elevada, ya que de por sí se está considerando un valor alto de venta, ya que como se explicó, el producto se venderá al detalle a clientes específicos, por lo que pequeñas variaciones pueden modificar su rentabilidad drásticamente.

Los datos recopilados luego de realizar un nuevo flujo de caja para cada nuevo valor del precio de venta del producto se entregan en la tabla 5.10:

Precio carbón activado		
% variación	TIR	VAN
-90%	-	-33001593
-80%	-	-29890482
-70%	-	-26779371
-60%	-	-23668260
-50%	-	-20557149
-40%	-	-17446037
-30%	-20,40%	-14334926
-20%	-14,47%	-11223815
-10%	11,20%	-5396242
0%	44,77%	2342544
10%	75,77%	10081329
20%	105,69%	17820115
30%	135,10%	25558900
40%	164,25%	33297686
50%	193,25%	41036471
60%	222,17%	48775257
70%	251,03%	56514042
80%	279,86%	64252828
90%	308,67%	71991613
100%	337,46%	79730399
110%	366,24%	87469184
120%	395,02%	95207970
130%	423,79%	102946755
140%	452,56%	110685541
150%	481,32%	118424326
160%	510,08%	126163112
170%	538,85%	133901898
180%	567,61%	141640683
190%	596,36%	149379469
200%	625,12%	157118254

Tabla 5.10: Variación de los indicadores económicos TIR y VAN según precio de venta del carbón activado.

Observación: Los valores de TIR que no aparecen en la tabla corresponden a valores muy bajos (menores a -20%) y que la planilla de Excel entrega como error numérico.

Y las gráficas que representan los datos allí tabulados se presentan como gráficos 5.3 y 5.4:

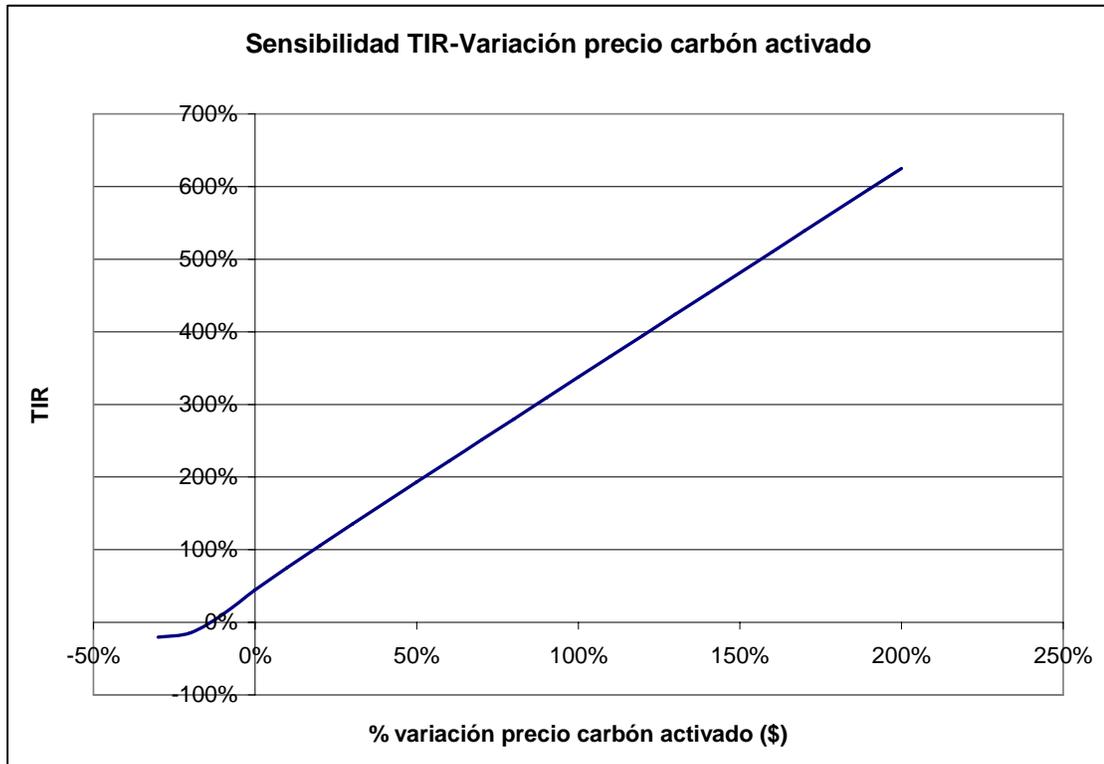


Gráfico 5.3: Variación del TIR respecto al precio de venta del carbón activo.

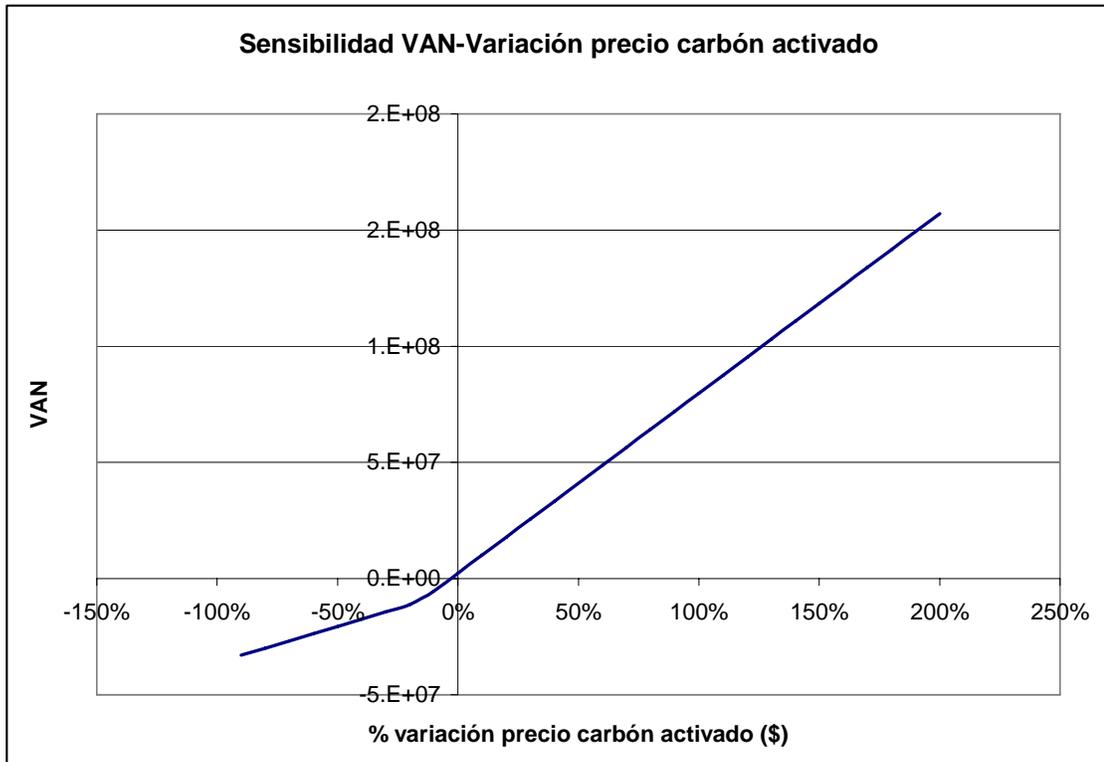


Gráfico 5.4: Variación del VAN respecto al precio de venta del carbón activo.

Al igual que anteriormente, la manera de interpretar estos gráficos es determinar el punto en el cual el TIR cruza el valor de la TMAR, es decir, 35%, y el VAN cruza el eje X.

Nuevamente ambos gráficos coinciden, y como era de esperarse, el margen permisible es sumamente bajo, alcanzándose con menos del -10% de variación. En otras palabras, el proyecto es extremadamente sensible a las variaciones del precio de venta del carbón activado, y para mantener su rentabilidad éste apenas puede bajar, al menos dentro de la corta vida de 5 años estimada.

Al igual que en la variación del precio de las cáscaras de nueces, el cambio de pendiente de la curva alrededor del -25% de variación se debe a la aparición de pérdidas del ejercicio anterior.

5.5.3 Variación del Volumen de Producción de carbón activado

A continuación se analizará la sensibilidad del proyecto frente a variaciones del volumen de producción de carbón activado.

Debe tenerse presente que el reactor diseñado, trabajando a capacidad completa, produce 1 kg de carbón activado por hora, por lo que si se desea producir una cantidad superior a este valor, pero inferior o igual a 2 kg, requerirá la compra de un segundo reactor, y así sucesivamente.

Debe considerarse además que la compra de uno o más reactores extra implicará la variación del costo de los equipos totales, lo cual a su vez variará el capital fijo directo, el que se relaciona con el capital total de inversión y el costo total del producto. En otras palabras, este análisis de sensibilidad implica la variación completa del análisis económico efectuado.

Los datos recopilados luego de realizar todos los nuevos cálculos señalados y un nuevo flujo de caja para cada nuevo valor del volumen de producción en un rango de variación del -90% al +300% de la producción inicial se entregan en la tabla 5.11 y gráficos 5.5 y 5.6:

Volumen de Producción		
% variación	TIR	VAN
-90%	-	-29955090
-80%	-	-27182480
-70%	-	-24409869
-60%	-	-21637258
-50%	-	-18864647
-40%	-	-16092036
-30%	-18,64%	-13319425
-20%	-12,92%	-10546815
-10%	15,07%	-4554234
0%	44,77%	2342544
10%	33,25%	-751644
20%	49,05%	6145133
30%	64,34%	13041910
40%	79,30%	19938687
50%	94,04%	26835465
60%	108,62%	33732242
70%	123,09%	40629019
80%	137,48%	47525796
90%	151,81%	54422574
100%	166,09%	61319351
110%	122,15%	58225163
120%	132,09%	65121940
130%	142,01%	72018717
140%	151,89%	78915495
150%	161,75%	85812272
160%	171,60%	92709049
170%	181,43%	99605827
180%	191,25%	106502604
190%	201,07%	113399381
200%	210,87%	120296158
210%	166,99%	117201970
220%	174,50%	124098748
230%	182,01%	130995525
240%	189,51%	137892302
250%	197,00%	144789079
260%	204,48%	151685857
270%	211,97%	158582634
280%	219,45%	165479411
290%	226,92%	172376189
300%	234,39%	179272966

Tabla 5.11. Variación de los indicadores TIR y VAN según volumen de producción de carbón activado.

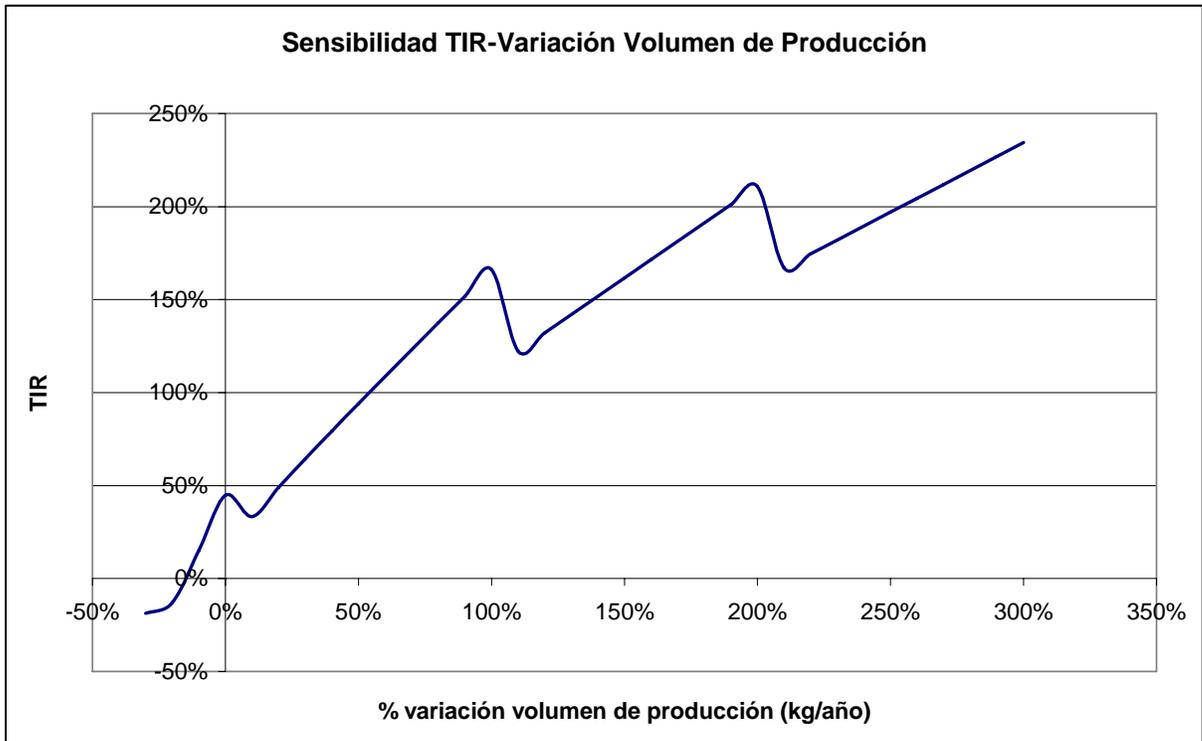


Gráfico 5.5. Variación del TIR respecto al volumen de producción de carbón activo.

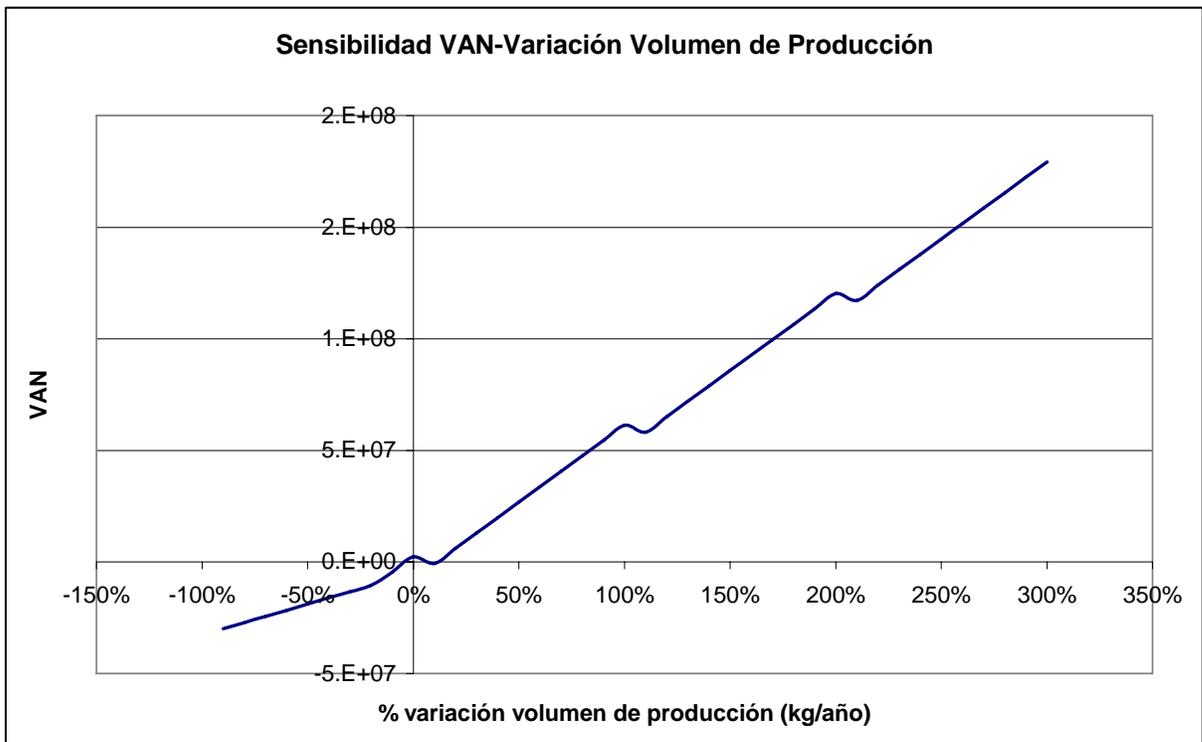


Gráfico 5.6. Variación del VAN respecto al volumen de producción de carbón activo.

Los escalones que se observan en las curvas se deben a la necesidad de comprar un nuevo reactor con su respectiva instrumentación en caso de aumentar el volumen de producción. Al principio, cuando la producción aumenta muy poco, la inversión que implica la compra de los nuevos equipos no se ve compensada con el aumento tan ligero de las ganancias, por lo que se produce un descenso en la rentabilidad del proyecto, pero a medida que la producción aumenta, aprovechando toda la capacidad del nuevo equipo adquirido, la rentabilidad se vuelve a incrementar.

Se aprecia que el proyecto deja de ser rentable si la producción de carbón activado disminuye en menos de un 10%, valor en el cual el VAN resulta negativo y el TIR resulta menor al 35% establecido como TMAR, pero además se aprecia que de incrementarse la producción, esta debe ser en un valor superior al 12% aproximadamente, ya que de ser inferior al mismo, (es decir, producir menos de 1,12 kg), la adquisición de un segundo reactor contrastada a las ganancias que dejarán esos 120 gramos extra de carbón activado hacen perder rentabilidad al proyecto.

5.6 Postulación a la Incubadora de Proyectos PUCV, *Chrysalis*

Tal como se señaló en la introducción a este capítulo, el proyecto fue presentado a la primera convocatoria de la Incubadora de Proyectos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, *Chrysalis*, efectuada en mayo de 2010, para determinar sus fortalezas desde el punto de vista económico y ver si al menos era considerado en la etapa de preselección.

5.6.1 Idea presentada

La idea presentada no difiere mayormente a la expuesta en este Proyecto de Título, siendo las diferencias más notables la capacidad del reactor y los fines comerciales del carbón activado producido.

La idea presentada, que puede apreciarse en el formulario entregado adjunto en el Anexo A, se expone a continuación:

El producto ofrecido, “carbón activado de cáscaras de nueces”, tiene como mercado objetivo empresas mineras de extracción de oro, debido a su capacidad de retener de manera selectiva el oro presente en las soluciones de lixiviación, a diferencia de otros carbones activos de origen vegetal o mineral.

Otro carbón activado de características similares es el de cáscaras de coco, pero debido a la mayor disponibilidad de nueces en Chile, la materia prima es mucho más económica.

La demanda de carbón activado en el país es muy elevada. Según cifras de Aduana, las importaciones del mismo superan desmesuradamente las exportaciones, por lo que aparte de añadir un elevado valor agregado a las cáscaras de nueces al transformarlas en carbón activado, las cuales actualmente se consideran desechos agroindustriales, el proyecto ofrecerá una nueva oferta del producto a la minería de oro de nuestro país.

5.6.2 Formulario entregado

Para participar en el concurso fue necesario rellenar un formulario con formato definido, campos establecidos y posteriormente subirlo a la plataforma web del sitio de *Chrysalis*. Una copia del mismo se entrega en el Anexo A del presente trabajo.

5.6.3 Resultados

Luego de revisados los proyectos enviados, de un universo de aproximadamente 90 proyectos presentados, la Incubadora preseleccionó un total de 18, entre los cuales se encontraba el presente Proyecto de Título.

La etapa siguiente fue un taller de capacitación y charla informativa para la actividad *Elevator Pitch*, la cual consistía en la presentación del proyecto ante un comité de inversionistas en un tiempo no superior a 5 minutos en las dependencias de CORFO, en Curauma.

Durante dicha charla, se explicaron puntos que luego de meditarlos llevaron a concluir que el proyecto no estaba en condiciones de seguir avanzando en el concurso, ya que a la fecha aun faltaban ciertas validaciones experimentales, por lo que se entregó una carta de excusa y luego fue retirado.

No obstante lo anterior, la experiencia fue muy valiosa para determinar que el proyecto fue atractivo a la vista del comité de la Incubadora, compuesta por un Ingeniero Comercial y un Ingeniero de Proyectos, entre otros, además de servir para recopilar importante información referente a las posibles proyecciones del trabajo.

La carta de excusa se presenta en el Anexo B.

5.7 Capital total de inversión real

Ya que en todos los cálculos efectuados se consideró el financiamiento que proporcionaría la Incubadora de proyectos, como ejercicio de utilidad se calculará la inversión total necesaria, sin considerar el apoyo de la Incubadora, con objeto de dimensionar el capital necesario para el presente proyecto.

En la sección 5.2, “Inversión total” se explica cada ítem requerido en éste cálculo, por lo que ahora sólo se expondrán los valores considerados.

Para este cálculo se utilizó un método estimativo en base a porcentajes. En la tabla 5.12 se entregan los valores obtenidos, siendo la columna de la derecha, “Estimación”, el porcentaje utilizado para cada cálculo, en donde las abreviaturas empleadas son las siguientes:

CE = Costo de los equipos

CF = Capital fijo

CD = Costos directos

CTI = Capital total de inversión

Capital Fijo		
Costos Directos		
<i>Item</i>	<i>Costo CIF (pesos)</i>	<i>Estimación</i>
Equipos de procesos	6.175.000	
<i>Reactor</i>	4.935.000	
<i>Caldera eléctrica</i>	1.000.000	
<i>Chancador</i>	240.000	
Instalación de los equipos	1.543.750	25% CE
Instrumentación y control	274.000	
<i>Termocupla</i>	40.000	
<i>PLC + relé</i>	150.000	
<i>Nicrones</i>	84.000	
Cañerías de procesos	988.000	16% CE
Instalaciones eléctricas	617.500	10% CE
Edificios de planta	2.902.250	47% CE
Servicios de planta	1.852.500	30% CE
Terrenos	2.470.000	4% CE
TOTAL	16.823.000	
Costos Indirectos		
Ingeniería y supervisión	617.500	10% CE
Gastos de construcción	1.682.300	10% CD
Honorarios contratistas	336.460	2% CD
Gastos legales	205.055	1% CF
Contingencias	841.150	5% CD
TOTAL	3.682.465	
Total Capital Fijo	20.505.465	
Capital de Trabajo	4.101.093	10% CTI
Gastos de puesta en marcha	16.404.372	8% CF
Costo Total de Inversión	41.010.929	

Tabla 5.12. Costo total de inversión del proyecto.

Por lo tanto, la inversión total necesaria para el proyecto, sin considerar ningún tipo de financiamiento ni apoyo externo, sería de 41 millones de pesos.

Este valor, que aproximadamente corresponde al triple de la inversión calculada originalmente deja en evidencia el gran apoyo que ofrecería la incubadora de proyectos, y además, como puede intuirse, haría perder rentabilidad al proyecto.

No obstante lo anterior, la rentabilidad puede recuperarse aumentando la producción, la cual se estimó como una cantidad muy baja, de apenas 1 kg, pues se tenía en mente presentar a la incubadora una microempresa, pero en el caso que no se contara con ese apoyo, podría escalarse el reactor hasta una producción mucho mayor, lo cual arroja una menor inversión en comparación a las ganancias percibidas por la mayor producción (debido al índice de escalamiento de 0,74 del reactor), y además podría recurrirse a financiamiento por préstamos bancarios, logrando de esta manera nuevamente un proyecto rentable.

5.8 Conclusiones

La presentación del Proyecto de Título a la Incubadora de Proyectos *Chrysalis* supuso un gran paso, ya que al ser preseleccionado de entre los 90 proyectos presentados, se obtuvo la certeza y confianza de que se encuentra bien estructurado, sus bases son sólidas y su atractivo económico evidente.

La etapa de preselección superada por el proyecto consistía en una explicación técnico-teórica del mismo, pero más fuertemente en una evaluación económica, para la cual fue necesario en primer lugar realizar un cálculo exhaustivo de la inversión total, ya que *Chrysalis* emplearía dichos datos para el financiamiento del mismo, además de un cálculo detallado de la bondad económica anual incluyendo un flujo de caja considerando una vida útil de 5 años.

Además de lo anterior, pese a no ser obligatorio para la convocatoria, se calcularon para el actual trabajo los indicadores económicos más comunes de rentabilidad del proyecto, vale decir, TIR y VAN, a través de los cuales se demuestra que el proyecto, con todos los valores estimados al momento del cálculo del flujo de caja para los primeros 5 años, es rentable.

Finalmente, pero no de menor importancia, se realizó un análisis de sensibilidad de la rentabilidad del proyecto reflejada en sus indicadores respecto a variaciones en el precio de compra de la materia prima, cáscaras de nueces, al precio de venta del producto, carbón activado, y al volumen de producción de carbón activado, descubriéndose que el proyecto no es excesivamente sensible respecto al precio de compra de su materia prima, pero si lo es en extremo respecto al precio de venta del producto y a la producción del mismo.

Pese a los logros conseguidos en la convocatoria de *Chrysalis*, en reuniones posteriores se informó que los proyectos preseleccionados ya deberían estar en condiciones de ser incubados, no existiendo fondos para ser semillados, lo cual en ese momento hubiera sido indispensable para la permanencia del presente proyecto en el proceso, por lo que atendiendo a este dato de último momento, la decisión tomada fue retirarlo.

5.9 Bibliografía

PETERS, Max; TIMMERHAUS, Klaus. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. Fourth Edition. 1991. McGrall-Hill Book Co. Singapore.

CHRYSalIS ® Incubadora de Negocios PUCV. [en línea] Chile. 2010 [citado Mayo 24, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.chrysalis.cl/sitio/>

Capítulo 6. Conclusiones

Se consiguió diseñar un reactor donde realizar pirólisis y activación térmica de carbón de cáscaras de nueces a partir de ideas extraídas de diseños anteriores, los cuales se recopilaron y posteriormente se seleccionó el que mejor se adaptara a las necesidades del trabajo aquí presentado, resultando un reactor batch, con un mecanismo de activación similar al empleado en reactores de lecho fluidizado, pero sin necesidad de inyección de vapor a velocidades de fluidización por la parte inferior.

El diseño se realizó en acero inoxidable para soportar las temperaturas de trabajo y la corrosión a la que será expuesto producto del vapor de agua, y consideró además los cálculos para la cantidad de vapor inyectado así como el diseño de un sistema calefactor eléctrico con el cual conseguir la temperatura necesaria para la reacción, además de su sistema y circuito controlador.

El reactor diseñado y sus controladores se montaron en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, al tiempo que se encargaron reparaciones a la caldera eléctrica que suministrará el vapor necesario para la reacción, luego de lo cual fueron conectados por una línea de vapor y puestos en marcha, de manera de corregir imprevistos y tener el sistema en funcionamiento para las pruebas de caracterización y producción de carbón.

El reactor operó según las expectativas de diseño, produciendo carbón activado a una temperatura promedio de 550°C, el cual fue sometido a pruebas de laboratorio para determinar su capacidad de adsorción.

En primer lugar se llevó a cabo la prueba de número de azul de metileno, la cual entrega una noción de la macroporosidad del carbón activado, cuyo resultado fue de 190 mg/l de azul de metileno adsorbidos por gramo de carbón, valor superior al de otros estudios realizados respecto a carbón activado y además dentro del rango de comercialización del producto.

En segundo lugar se efectuó la prueba de índice de yodo de acuerdo a la norma ASTM D4607, la cual refleja la mesoporosidad del carbón activado, cuyo resultado fue de 539 mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón, valor inferior al de carbones activados comerciales similares, pero superior al de otros estudios realizados sobre este producto.

La última prueba realizada, probablemente la más importante, fue la adsorción en columnas empacadas de soluciones cianuradas de oro y cobre, con objetivo de determinar la selectividad de adsorción por el oro del carbón activado producido.

Luego de tratar soluciones de diferentes concentraciones, similares a las encontradas en lixiviados en minería, el carbón activado producido demostró una evidente selectividad por el oro, adsorbiendo más de 175 ppm de cianuro de oro en 100 ml de solución por gramo, mientras que de cianuro de cobre adsorbió menos de 3 ppm en 100 ml de solución por gramo, lo cual demuestra que el producto podría emplearse en procesos de separación de cobre y oro en minería de oro.

Aparte de demostrar que el carbón activado presenta las características requeridas para el mercado en el cual piensa distribuirse, es necesario demostrar que la producción del mismo es rentable, para lo cual se realizó un estudio de mercado y un análisis de prefactibilidad económica, el cual participó en la primera convocatoria de la Incubadora de Proyectos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, *Chrysalis*.

Mediante el estudio de mercado se determinó que las importaciones de este producto son muy elevadas en Chile, lo cual demuestra que la producción nacional del mismo es baja, o bien insuficiente para suplir la demanda interna, y que se utiliza en gran cantidad, por lo que no debiera ser difícil comercializar el producto, y además se encontró que las exportaciones de nueces sin cáscaras han aumentado en los últimos años, por lo que no debería ser difícil encontrar proveedores de materia prima.

El análisis económico implicó un flujo de caja para una vida útil inicial de 5 años para el proyecto, calculándose los indicadores TIR y VAN, mediante los cuales se determinó que la

producción de carbón a partir del reactor diseñado (escalado para una producción de un kilogramo de carbón por hora de operación) es rentable para las condiciones y estimaciones realizadas con los datos de mercado manejados en la actualidad.

Como ejercicio de utilidad, anticipando que los datos de mercado variasen en un futuro, se realizaron tres análisis de sensibilidad, modificando el valor de venta del carbón activado producido, el valor de compra de las cáscaras de nueces y el volumen de producción de carbón activado, los cuales reflejaron que el proyecto es ligeramente sensible a la variación del costo de su materia prima, pudiendo permitirse un incremento del mismo de un 30%, muy sensible a la variación del precio de venta del producto, pudiendo permitirse un descenso menor al 10% antes de perder rentabilidad y muy sensible a disminuciones en el volumen de producción, pudiendo permitirse un descenso de menos del 10%.

El proyecto presentado fue preseleccionado por *Chrysalis* en la primera etapa del proceso, pero se optó por retirarlo del mismo para completar el proceso de validación experimental, el cual se encontraba incompleto al momento de la convocatoria.

Con todo lo anterior, habiendo montado, puesto en marcha y operado el reactor diseñado, además de logrado producir carbón activado a la temperatura de diseño y caracterizado el mismo mediante pruebas estandarizadas, aparte de demostrar su selectividad de adsorción de oro por sobre la de cobre, y habiendo finalmente determinado la prefactibilidad económica del proyecto, se puede concluir que los objetivos iniciales del trabajo aquí presentado fueron alcanzados exitosamente.

Apéndice A. Diseño del Reactor

A.1 Diseño del tornillo sinfín para un reactor continuo ¹

Se realizó el diseño del tornillo a partir del catálogo de la empresa GOODMAN para un flujo de carbón de 5 [kg/h], obteniéndose el tornillo necesario y sus especificaciones, así como la potencia del motor necesaria para su movimiento. El primer paso consiste en la selección del material a impulsar, cuyas propiedades se muestran en la tabla A.1, y el código de clasificación de materiales se entrega en la tabla A.2:

Identificación del material a impulsar: Cáscaras de nueces molidas

Material más parecido: Coconut shredded (cáscaras de coco molidas)

Densidad lb/pe ³	Código	% Trough loading	Mat'l factor Fm	Comp. series	Multi flo application	Multi flo max speed	Bucket elev series
20-22	21E45	30A	1.5	2B			

Tabla. A.1: Características de las cáscaras de coco molidas. ¹

Material Classification Code Chart

Major Class	Material Characteristics Included	Code Designation	
Density	Bulk Density, Loose	Actual Lbs/cu. ft.	
Size	Very Fine No. 200 Sieve (.0029") And Under No. 100 Sieve (.0059") And Under No. 40 Sieve (.016") And Under	A ₂₀₀ A ₁₀₀ A ₄₀	
	Fine No. 6 Sieve (.132") And Under	B ₆	
	Granular	½" And Under	C _½
		3" And Under	D ₃
		7" And Under	D ₇
	*Lumpy	16" And Under Over 16" To Be Specified X = Actual Maximum Size	D ₁₆ D _x
Irregular	Stringy, Fibrous, Cylindrical, Slabs, Etc.	E	
Flowability	Very Free Flowing — Flow Function > 10	1	
	Free Flowing — Flow Function > 4 But < 10	2	
	Average Flowability — Flow Function > 2 But < 4	3	
	Sluggish — Flow Function < 2	4	
Abrasiveness	Mildly Abrasive — Index 1-17	5	
	Moderately Abrasive — Index 18-67	6	
	Extremely Abrasive — Index 68-416	7	
Miscellaneous Properties Or Hazards	Builds Up and Hardens	F	
	Generates Static Electricity	G	
	Decomposes — Deteriorates in Storage	H	
	Flammability	J	
	Becomes Plastic or Tends to Soften	K	
	Very Dusty	L	
	Aerates and Becomes Fluid	M	
	Explosiveness	N	
	Stickiness-Adhesion	O	
	Contaminable, Affecting Use	P	
	Degradable, Affecting Use	Q	
	Gives Off Harmful or Toxic Gas or Fumes	R	
	Highly Corrosive	S	
	Mildly Corrosive	T	
	Hygroscopic	U	
	Interlocks, Mats or Agglomerates	V	
	Oils Present	W	
Packs Under Pressure	X		
Very Light and Fluffy — May Be Windswept	Y		
Elevated Temperature	Z		

Tabla. A.2: Código de clasificación de materiales. ¹

A continuación debe seleccionarse el tipo de tornillo apropiado para impulsar el material, ya sea tipo A, B, A (t) o bien B (t) a partir de la tabla A.3:

Feeder Selection Chart

% Trough loading	Máximo tamaño de partícula	Tipo de tornillo			
		A	B	A(t)	B(t)
15%	+ 1/2"				
	- 1/2"				
30% A	+ 1/4"				
	- 1/4"				
30% B	+ 1/4"				
	- 1/4"				
45%	+ 1/8"				
	- 1/8"				

*From the Materials Table.

(t)—Tapered feeder screw.



RECOMMENDED

Tabla. A.3: Selección de tornillo alimentador. ¹

Las cáscaras de nueces, tal como se observó en la tabla A.1, corresponden al tipo 30A, con un tamaño de partícula inferior a 1/4 de pulgada, por lo que se selecciona un tornillo alimentador tipo B, cuyos parámetros se entregan en la tabla A.4:

TYPE B FEEDERS

Screw Dia.	△ Max. Speed RPM	Flight Pitch	Max. Lump Size	*Capacity Cubic Feet per Hour		Dimension						Type B2 Feeder with Extension Conveyor. H Dia.		
				Cf at one RPM	at max. RPM	B Max	△ C** Min	D	E	F	G △ Max	Trough Loading %		
												15	30	45
6	70	4	1/2	3.15	221	54	9	7	14	7	96	12	9	9
9	65	6	3/4	11.31	735	64	12	9	18	10	120	14	12	10/12
12	60	8	1	27.31	1639	72	16	10	22	13	144	20	16	14
14	55	9 9/8	1 1/4	43.72	2405	80	20	11	24	15	144	24	18	16
16	50	10 9/8	1 1/2	66.06	3303	82	24	11 1/2	28	17	144	30	20	18
18	45	12	1 3/4	94.43	4249	86	28	12 1/8	31	19	144		24	20
20	40	13 3/8	2	131.59	5264	90	32	13 1/2	34	21	144		30	24
24	30	16	2 1/2	230.37	6911	96	36	16 1/2	40	25	144			30

Tabla. A.4: Datos del tornillo alimentador tipo B. ¹

La cantidad de carbón que se desea se estimó en unos 5 [kg/h], lo cual equivale a 11 [lb/h], y utilizando la densidad del material, se calcula que este valor correspondería a 0,525 [pie³/h]. La tabla A.4 indica que esta capacidad es entregada por un tornillo alimentador de 6 pulgadas de diámetro, siendo la velocidad requerida la siguiente:

$$N = \frac{0.525}{3.15} = 0.2 \text{ RPM}$$

El esquema del tornillo alimentador presentado en el catálogo de GOODMAN CONVEYOR se observa en la figura A.1:

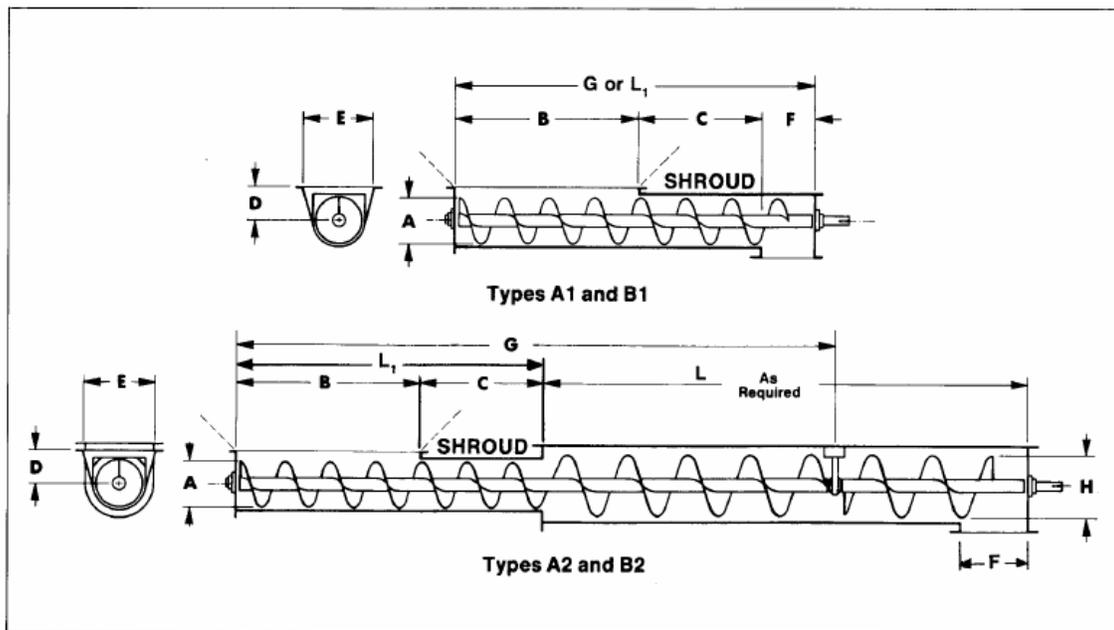


Figura. A.1: Esquema de ambos tipos de tornillos alimentadores.¹

Luego, para el cálculo del largo equivalente del tornillo debe obtenerse la fórmula indicada al tipo de tornillo seleccionado de la tabla A.5:

Lf = Equivalent Length of Feeder

Feeder Type	Flight Type Under Inlet	Material Code Class	Lf Value, Feet For Dimensions See Page 31
Type A	Standard Pitch Uniform Dia.	A15, A16, A17, A25, A26, A27,	$L_f = L_1 + \frac{B}{6} + \frac{C}{12}$
Type B	Short Pitch ($\frac{2}{3}$) Uniform Dia.	A35, A36, A37	B & C from Pg.
Type A(t)	Standard Pitch Tapered Dia. *	B15, B16, B17 B25, B26, B27	$L_f = L_1 + \frac{B}{12} + \frac{C}{12}$
Type B(t)	Short Pitch ($\frac{2}{3}$) Tapered Dia.*	B35, B36, B37	

Tabla. A.5: Largo equivalente del tornillo alimentador. ¹

Luego, reemplazando los parámetros de la tabla A.4 en la fórmula del alimentador tipo B obtenemos el largo equivalente:

$$L_f = 4 + \frac{54}{6} + \frac{9}{12} = 13.75 \text{ pies}$$

Finalmente se calcula la potencia del motor requerido para impulsar el tornillo alimentador utilizando la siguiente fórmula:

$$HP = \frac{(HP_a + HP_b)F_o}{e}$$

En donde HP_a es la fricción del alimentador vacío y se calcula según la siguiente fórmula:

$$HP_a = \frac{L_1 \cdot N \cdot F_d \cdot F_b}{1.000.000}$$

y HP_b es la fricción del material en el alimentador y se calcula según la siguiente fórmula:

$$HP_b = \frac{C \cdot W \cdot L_f \cdot F_m}{1.000.000}$$

La nomenclatura empleada es la siguiente:

C = capacidad requerida, en pie^3/h

e = eficiencia

F_b = “Hanger bearing factor” (no se recomienda para tipo 1)

F_d = factor de diámetro del impulsor

F_m = factor del material

F_o = factor de sobrecarga

L_1 = largo del alimentador, en pies

L_f = largo equivalente, en pies

N = velocidad de operación, en RPM

W = densidad del material impulsado, en lb/pie^3

El factor de sobrecarga se obtiene a partir del gráfico A.1:

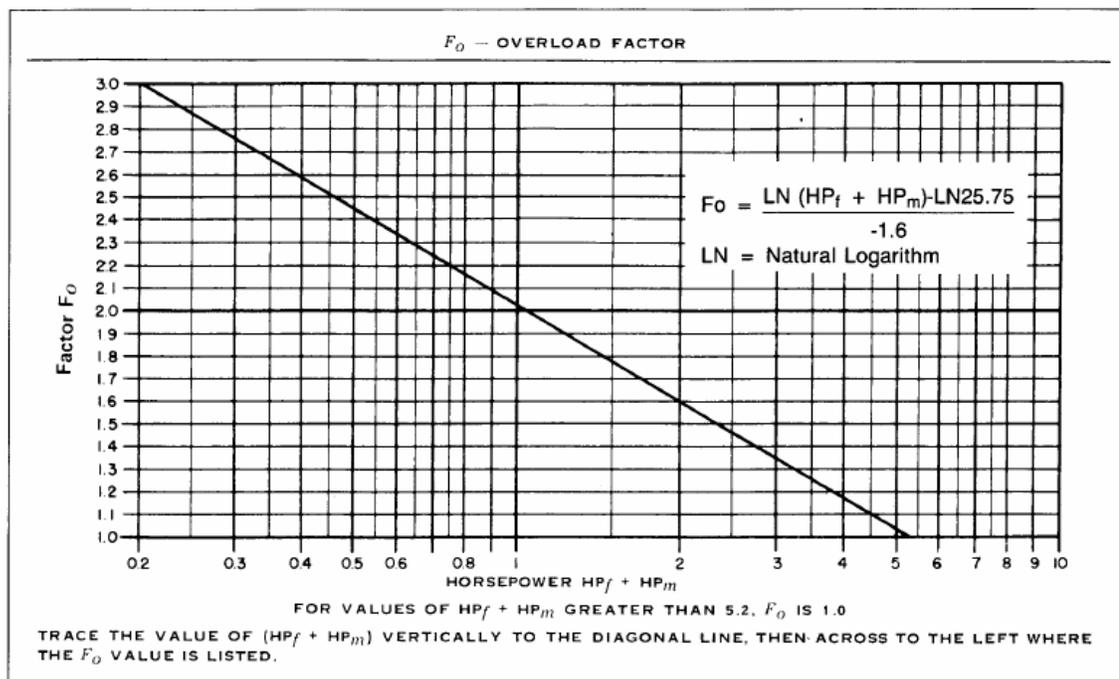


Gráfico. A.1: Gráfica de obtención del factor de sobrecarga, F_o .¹

En donde HP_f es la potencia necesaria para mover el tornillo vacío (HP_a para este caso) y HP_m es la potencia necesaria para mover el material (HP_b para este caso).

El factor de diámetro, según el diámetro del tornillo seleccionado, se obtiene a partir de la tabla A.6:

Diameter Factor, F_d

Diameter	Factor, F_d
6	18
9	31
12	55
14	78
16	106
18	135
20	165
24	235
30	360

Tabla. A.6: Factor de diámetro. ¹

Y el factor de eficiencia se obtiene a partir de la tabla A.7:

Drive Efficiency Factor, e

Screw Drive or Shaft Mount with V-Belt	V-Belt to Helical Reducer with Coupling	Motoreducer with Chain Drive	Motoreducer with Coupling	Worm Gear
.88	.87	.87	.95	Consult Mfg.

Tabla. A.7: Factor de eficiencia. ¹

Reemplazando en las fórmulas anteriores:

$$HP_a = \frac{4 \cdot 0.2 \cdot 18}{1.000.000} = 4.95 \cdot 10^{-5}$$

$$HP_b = \frac{0.525 \cdot 21 \cdot 13.75 \cdot 1.5}{1.000.000} = 2.27 \cdot 10^{-4}$$

$$Fo = \frac{\ln(4.95 \cdot 10^{-5} + 2.27 \cdot 10^{-4}) - \ln 25.75}{-1.6} = 7.17$$

Finalmente se obtiene la potencia teórica necesaria del motor:

$$HP = \frac{(4.95 \cdot 10^{-5} + 2.27 \cdot 10^{-4})7.17}{0.88} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ HP}$$

A.2 Diseño Mecánico del Reactor Batch

El primer paso en el diseño mecánico del equipo consiste en la determinación de la presión de trabajo. Tal como se explicó, ésta estará gobernada por el generador de vapor, el cual entrega vapor saturado a presión atmosférica. Por conceptos de seguridad se consideraron 2 bares sólo para los cálculos. Se cuenta entonces con los siguientes parámetros: ²

Presión del vapor saturado: 200 kPa = 2 bares

Volumen específico (de tablas de vapor): 885,44 cm³/g

Presión barométrica aproximada: 1 bar

Por lo tanto:

$$\text{Presión de operación: } 2-1=1 \text{ bar}$$

Con respecto al material de diseño del reactor, se cuenta con los siguientes parámetros:

Material: Acero inoxidable AISI 304

σ admisible a 600°C: 7500 psi = 517 bares

Eficiencia soldaduras (TIG): 80%

Espesor de corrosión recomendado para acero inoxidable: 1 mm

A continuación se aplica la ecuación ASME para cálculo de espesor de cilindros sometidos a presión interna para determinar el espesor de carcasa:

$$t = \frac{P \cdot r}{\sigma \cdot e - 0,6 \cdot P}$$

Donde,

t = espesor de pared (en mm)

P = presión de trabajo (en bar)

r = radio interno del cilindro (en mm)

σ = máxima presión admisible a la temperatura de trabajo (en bar)

e = eficiencia de soldadura

Reemplazando los parámetros y datos ya conocidos y mencionados anteriormente en la ecuación ASME se obtiene tanto el espesor de carcasa como el espesor de camisa:

$$\text{Espesor carcasa: } \frac{1 \cdot 51,13}{517 \cdot 0,8 - 0,6 \cdot 1} = 0,124 \text{ mm}$$

Espesor carcasa total: 1,2 mm

Espesor real cañería comercial: 6,02mm \Rightarrow No hay problemas

$$\text{Espesor camisa: } \frac{1 \cdot 63}{517 \cdot 0,8 - 0,6 \cdot 1} = 0,153 \text{ mm}$$

Espesor camisa total: 1,2 mm

El siguiente paso consiste en diseñar el piping:

De trabajos realizados anteriormente sobre activación térmica de carbón de cáscaras de nueces, se sabe que para una activación de 22,0325 gramos de carbón durante media hora, el consumo de vapor de agua aproximado fue de 407 gramos⁽³⁾. Dicho valor se utilizará para conocer la cantidad de vapor requerida para activar el carbón total que producirá el reactor aquí diseñado, es decir, 71,28 gramos:

$$\text{Flujo vapor requerido: } 407 \cdot \frac{71,28}{22,0325} \cdot 2 = 2633,47 \frac{\text{g}}{\text{h}}$$

Empleando el volumen específico del vapor saturado a las condiciones de trabajo se obtiene el volumen de vapor requerido:

$$\text{Flujo de vapor de alimentación: } 2633,47 \cdot 885,44 = 2.331.779,68 \frac{\text{cm}^3}{\text{h}} = 0,000648 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se propone una cañería comercial de ½ pulgada de diámetro nominal para la alimentación de vapor. Se cuenta con los siguientes parámetros:

Diámetro externo real: 21,3 mm

Espesor de pared: 2,77 mm

Por lo tanto:

$$\text{Diámetro interno real: } 21,33 - 2 \cdot 2,77 = 15,79 \text{ mm}$$

Aplicando la ecuación de continuidad se obtiene la velocidad del vapor de alimentación:

$$\text{Velocidad vapor de alimentación: } \frac{0,000648}{\pi \cdot \left(\frac{15,79}{2 \cdot 1000} \right)^2} = 3,31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dicho valor se compara con las velocidades de vapor recomendadas en cañerías presentadas en la tabla A.8:

Presión del vapor kg/cm ²	Velocidad recomendada m/s
1.0 a 1.5	5 a 30
1.5 a 5	30 a 35
5.0 a 10	35 a 40
10 a 25	40 a 50
25 a 100	50 a 60

Tabla. A.8: Velocidad de vapor recomendada en cañerías. ⁴

El vapor entregado por el generador de vapor se encuentra saturado a presión atmosférica, por lo que debe usarse el primer rango recomendado.

Pese a que la velocidad calculada es menor al rango recomendado, el valor a partir del cual se calculó dicha velocidad (407 gramos de vapor) no es la cantidad necesaria, sino que fue la cantidad de agua evaporada en una olla a presión calentada por un mechero Bunsen durante 30 minutos de operación, que fue lo utilizado para esos experimentos, ya que la reacción de activación térmica únicamente requiere una atmósfera saturada de vapor.

Debido a la mayor capacidad del generador de vapor, se estima y supone que el flujo de vapor entregado por éste será mucho mayor que el de la olla a presión calentada por el mechero Bunsen, por lo que considerando que la velocidad calculada está ligeramente por debajo del rango recomendado, el flujo de vapor entregado por el generador de vapor debiera ubicarse dentro del rango sin problemas, por lo que la cañería de ½ pulgada de diámetro nominal se acepta.

A continuación se comprueba si el espesor de pared de la cañería es apropiado para la presión de trabajo, para lo cual nuevamente se utiliza la ecuación ASME para cilindros trabajando a presión interna:

$$\text{Espesor cañería: } 1 + \frac{1 \cdot \left(\frac{15,79}{2} \right)}{517 \cdot 0,8 - 0,6 \cdot 1} = 1,02 \text{ mm}$$

Espesor real de pared: 2,77 mm \Rightarrow No hay problemas

Luego se diseñan las tapas. En primer lugar se selecciona el tipo de tapa a emplear, que serán tapas planas atornilladas. Se tiene el siguiente parámetro:

Factor C para tapas planas apertadas: 0,162

Para este tipo de tapas, la ecuación de diseño es la siguiente:

$$t = D \cdot \sqrt{C \cdot \frac{P}{\sigma \cdot e}}$$

Donde,

t = espesor de la tapa (en mm)

P = presión de trabajo (en bar)

D = diámetro de la tapa (en mm)

σ = máxima presión admisible a la temperatura de trabajo (en bar)

e = eficiencia de soldadura

Reemplazando los parámetros y valores ya conocidos en la ecuación y sumando un milímetro por conceptos de corrosión, se obtiene:

$$\text{Espesor tapas: } 1 + 102,26 \cdot \sqrt{0,162 \cdot \frac{1}{517 \cdot 0,8}} = 3,02 \text{ mm} \approx 3 \text{ mm}$$

El anterior corresponde al espesor necesario para soportar la presión de trabajo. Sin embargo, debido a las altas temperaturas, es recomendable un espesor mucho mayor para evitar el efecto de pandeo, por lo que el espesor real utilizado es de 10 mm.

A.3 Balances de Energía y diseño de sistema calefactor

La temperatura a la cual se llevará a cabo la reacción de activación térmica será de 600°C, por lo que se propone una resistencia calefactora comercial (o “nicrón”) de 1000 W que opera a 750°C y se comprobará si es adecuada.

Los mecanismos de transmisión de calor serán los siguientes:

1. Desde las resistencias hasta la superficie exterior de la chaqueta: radiación.
2. Desde superficie exterior de la chaqueta hacia la interior: conducción.
3. Desde superficie interior de la chaqueta hacia la exterior de la carcasa: convección y radiación.
4. Desde superficie exterior de la carcasa hacia la interior: conducción.
5. Desde superficie interior de la carcasa hacia el seno del vapor: convección y radiación.

El reactor estará aislado, por lo que se considerará adiabático al exterior.

Paso 1. Radiación desde las resistencias hasta la superficie exterior de la chaqueta.

Para determinar la temperatura que alcanzará la pared de la chaqueta producto del calor irradiado por las resistencias calefactoras debe emplearse la ecuación de Stefan-Boltzmann: ⁵

$$\frac{W}{A} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot (T_H^4 - T_C^4)$$

Donde,

W = potencia de la resistencia

A = área del manto de la chaqueta

σ = constante de Stefan-Boltzmann

ε_i = emisividad de cada superficie

T_H, T_C = temperaturas de la superficie caliente y fría, respectivamente

En primer lugar debe calcularse el área del manto de la chaqueta, para lo cual se cuenta con los siguientes parámetros:

Diámetro exterior de la chaqueta: 134 mm (67 mm de radio)

Largo del reactor: 30 cm

Reemplazando:

$$\text{Área exterior de la chaqueta: } 2 \cdot \pi \cdot 6,7 \cdot 30 = 1262,92 \text{ cm}^2 = 1,36 \text{ pie}^2$$

Se cuenta con los siguientes parámetros:

*Emisividad del acero pulido*⁵: 0,79

Emisividad supuesta de la resistencia: 1,0

Potencia de la resistencia: 1000 W = $3412,1 \frac{BTU}{h}$

Temperatura de la resistencia: 750°C = 1841,67 R

Constante de Stefan-Boltzmann: $1,73 \cdot 10^{-9} \frac{BTU}{h \cdot \text{pie}^2 \cdot R^4}$

Por lo tanto, reemplazando en la ecuación de Stefan-Boltzmann y despejando el valor de T_C se obtiene la temperatura que alcanzará la superficie externa de la chaqueta:

$$\begin{aligned} \text{Temperatura de la pared: } \frac{3412,1}{1,36} &= \frac{1,73 \cdot 10^{-9}}{\frac{1}{0,79} + 1 - 1} \cdot (1841,67^4 - T_C^4) \\ \Rightarrow T &= 1763,3R = 706,5^\circ C \end{aligned}$$

Paso 2. Conducción desde superficie exterior de la chaqueta hacia la interior.

$$\text{Conductividad del acero: } 25 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot \frac{^{\circ}F}{pie}}$$

Por lo tanto, la resistencia de la pared de la camisa de 4 mm de espesor puede despreciarse.

Paso 3. Convección y radiación desde superficie interior de la chaqueta hacia la exterior de la carcasa.

Para el mecanismo de radiación se empleará nuevamente la ecuación de Stefan-Boltzmann, teniendo en cuenta que esta vez, al irradiar el calor desde la pared de acero de la chaqueta hacia la pared de acero de la carcasa, la emisividad de ambas superficies será la misma.

Nuevamente se determina el área de transferencia, que esta vez corresponderá al área de la pared interior de la chaqueta:

Diámetro interior de la chaqueta: 126 mm (63 mm de radio)

Largo del reactor: 30 cm

Reemplazando y transformando:

$$\text{Área interior de la chaqueta: } 2 \cdot \pi \cdot 6,3 \cdot 30 = 1187,52 \text{ cm}^2 = 1,278 \text{ pie}^2$$

Reemplazando en la ecuación de Stefan-Boltzmann y despejando el valor de T_C se obtiene la temperatura que alcanzará la superficie externa de la carcasa:

$$\begin{aligned} \text{Temperatura de la pared: } \frac{3412,1}{1,278} &= \frac{1,73 \cdot 10^{-9}}{\frac{1}{0,79} + \frac{1}{0,79} - 1} \cdot (1763,3^4 - T_C^4) \\ \Rightarrow T &= 1643,96 R = 640,16^{\circ} C \end{aligned}$$

Para el mecanismo de convección el primer paso consiste en la determinación del número de Reynolds para el flujo de vapor, cuya fórmula es la siguiente:

$$R = \frac{De \cdot G}{\mu}$$

Donde,

De = diámetro equivalente (en pies)

G = velocidad de masa (en $\frac{lb}{h \cdot pie^2}$)

μ = viscosidad a la temperatura promedio (en $\frac{lb}{pie \cdot h}$)

Se hace necesario determinar la viscosidad del fluido, en este caso vapor de agua, a la temperatura promedio de operación. Se tienen las siguientes temperaturas:

Temperatura caliente estimada del vapor: 600°C

Temperatura de entrada del vapor: 120,23°C (de tablas de vapor saturado a 2 bar)

Temperatura promedio: 360,115°C

A la temperatura promedio calculada de 360°C, el vapor de agua presenta una viscosidad de:

$$\text{Viscosidad del vapor a } 360^\circ\text{C: } 0,05445 \frac{lb}{pie \cdot h}$$

El diámetro equivalente se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$De = 4 \cdot RH$$

Donde,

RH = Radio hidráulico

Por su parte, el radio hidráulico se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$RH = \frac{A}{PM}$$

Donde,

A = área de flujo del vapor de agua

PM = perímetro mojado

El área de flujo corresponderá al área comprendida entre la carcasa y la camisa, es decir, un ánulo. Su valor se obtiene descontando el área de la circunferencia interna al área de la circunferencia externa, para lo cual se cuenta con los siguientes datos:

Radio interior de la chaqueta: 6,3 cm = 0,207 pie

Radio exterior de la carcasa: 5,715 cm = 0,187 pie

Reemplazando:

$$\text{Área de flujo: } \pi \cdot 0,207^2 - \pi \cdot 0,187^2 = 0,025 \text{ pie}^2$$

El perímetro mojado por su parte corresponde a la suma de los perímetros de las dos circunferencias que conforman el ánulo:

$$\text{Perímetro mojado: } 2 \cdot \pi \cdot 0,207 + 2 \cdot \pi \cdot 0,187 = 2,476 \text{ pie}$$

Reemplazando ambos valores en la fórmula de cálculo del radio hidráulico, se obtiene:

$$\text{Radio hidráulico: } \frac{0,025}{2,476} = 0,01 \text{ pie}$$

Con lo cual se obtiene el diámetro equivalente:

Diámetro equivalente: $4 \cdot 0,01 = 0,04$ pie

La velocidad de masa se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$G = \frac{F_m}{A}$$

Donde,

F_m = Flujo másico de vapor de agua

A = área de flujo

Ya se determinó el flujo de vapor con anterioridad, por lo que transformando sus unidades se obtiene:

$$\text{Flujo de vapor: } 2633,47 \frac{g}{h} = 5,81 \frac{lb}{h}$$

Por lo tanto, reemplazando los valores conocidos en la fórmula de la velocidad de masa se obtiene:

$$\text{Velocidad de masa: } \frac{5,81}{0,025} = 232,4 \frac{lb}{h \cdot pie^2}$$

Finalmente, reemplazando todos los valores recién calculados en la fórmula del Número de Reynolds se obtiene el siguiente valor:

$$\text{Número de Reynolds: } \frac{0,04 \cdot 232,4}{0,05445} = 170,72$$

Con un Número de Reynolds tan bajo, la transferencia por convección al seno del vapor puede ser despreciada frente a la transferencia por radiación desde las paredes incandescentes.

Paso 4. Conducción desde superficie exterior de la carcasa hacia la interior.

Al igual que en el paso 2, la resistencia de la pared de acero de 6,02 mm de espesor puede despreciarse.

Paso 5. Convección y radiación desde superficie interior de la carcasa hacia el seno del vapor.

Nuevamente se empleará la ecuación de Stefan-Boltzmann para el mecanismo de radiación, considerando esta vez que el seno del vapor, cáscaras, etc. absorberán todo el calor entrante.

El área de transferencia corresponderá esta vez a la pared interna de la carcasa.

Diámetro interior de la carcasa: 102,26 mm (51,13 mm de radio)

Calculando y transformando:

$$\text{Área interior de la chaqueta: } 2 \cdot \pi \cdot 5,113 \cdot 30 = 963,78 \text{ cm}^2 = 1,037 \text{ pie}^2$$

Reemplazando en la ecuación de Stefan-Boltzmann y despejando el valor de T_C se obtiene la temperatura a la cual se llevará a cabo la reacción de activación térmica del carbón:

$$\begin{aligned} \text{Temperatura de la pared: } \frac{3412,1}{1,037} &= \frac{1,73 \cdot 10^{-9}}{1 + \frac{1}{0,79} - 1} \cdot (1643,96^4 - T^4) \\ \Rightarrow T &= 1487,62 \text{ R} = 553,3^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

Para el mecanismo de convección, al igual que en el paso 3, primero debe calcularse el Número de Reynolds.

La temperatura promedio de trabajo será la misma, por lo que el valor de la viscosidad del vapor de agua se mantendrá invariable respecto al valor calculado en el paso 3.

Para el paso 5 el área de flujo ya no será un anulo, sino que será el área transversal de la carcasa, por lo que se calculará a partir del área de un círculo:

Radio interior de la carcasa: 5,113 cm = 0,168 pie

Por lo tanto,

$$\text{Área de flujo: } \pi \cdot 0,168^2 = 0,089 \text{ pie}^2$$

El flujo de vapor que ingresará a la carcasa obviamente será el mismo que ingresa a la chaqueta, por lo que para el cálculo de la velocidad de masa sólo debe reemplazarse el valor del área de flujo:

$$\text{Velocidad de masa: } \frac{5,81}{0,089} = 65,28 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2}$$

Para el cálculo del diámetro equivalente no será necesario el cálculo del radio hidráulico, ya que por ser el área de flujo directamente la de un círculo, el diámetro equivalente tendrá el mismo valor que el diámetro de dicha circunferencia, es decir, el diámetro interno de la carcasa.

Finalmente, reemplazando los valores conocidos se calcula el Número de Reynolds:

$$\text{Número de Reynolds: } \frac{2 \cdot 0,168 \cdot 65,28}{0,05445} = 402,83$$

Al igual que en el paso 3, con un Número de Reynolds tan bajo, la transferencia de calor por convección al seno del vapor será despreciable frente a la transferencia por radiación desde las paredes incandescentes.

Pese a que el valor de temperatura calculado de 553,3°C en el mecanismo radiativo es menor al estimado de 600°C, la reacción de activación es exotérmica, por lo que proporcionará el

calor necesario para alcanzar la temperatura de trabajo, es decir, una vez iniciada la reacción se logrará un pseudo-régimen autotérmico, por lo tanto, las resistencias de 1000 W servirán para la tarea.

Finalmente se calculará el consumo eléctrico de las resistencias calefactoras, en donde el primer paso consiste en determinar si la instalación se efectuará en serie o en paralelo.

Debido a que en una conexión en serie la suma de las caídas de tensión de cada resistencia corresponde a la caída de tensión total, si se eligiera este tipo de instalación, la tensión de 220V se dividiría en el total de resistencias conectadas, lo cual implicaría que nunca alcanzarían la temperatura de trabajo requerida, por lo que la opción recomendable es una instalación en paralelo, en la cual se mantiene la caída de tensión para cada resistencia. El diagrama de la instalación se muestra en la figura A.2:

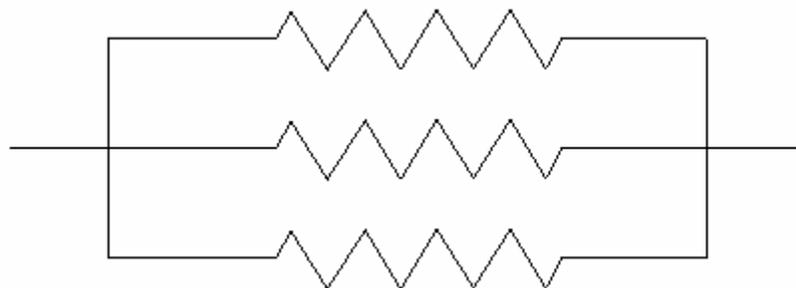


Figura. A.2: Disposición propuesta de las resistencias calefactoras en el circuito.

Para determinar la intensidad de corriente eléctrica que pasará por cada resistencia, se empleará la Ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde,

I = intensidad de corriente eléctrica (en Amperes)

V = caída de tensión (en Volts)

R = resistencia eléctrica (en Ohms)

Los nicrones fueron comprados en una tienda de artículos e insumos eléctricos, y se les midió su resistencia con un tester, la cual osciló entre 42Ω a 44Ω entre los nicrones comprados, por lo que se considerará un promedio de 43Ω para efectos de cálculo.

Sabiendo que la tensión de la línea eléctrica es de 220 V, se obtiene el valor de la corriente tal como se muestra a continuación:

$$\text{Intensidad de corriente: } \frac{220}{43} = 5,12 \text{ Amperes}$$

De acuerdo a la primera Ley de Kirchhoff, la suma de las corrientes eléctricas que llegan a un nodo es igual a la suma de las corrientes que lo abandonan, por lo que el consumo eléctrico total será el siguiente: ⁶

$$I = 5,12 + 5,12 + 5,12 = 15,36 \text{ Amperes}$$

Este consumo es razonable, ya que los enchufes que se usarán soportan un consumo de 16 Amperes, por lo que la instalación de 3 resistencias eléctricas en paralelo se acepta y se implementará en el reactor.

A continuación se calculará la carga superficial para cada resistencia, de manera de saber si las mismas no se destruirán producto de una oxidación muy elevada. La ecuación para su cálculo es la siguiente: ⁷

$$C = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot L} \left[\frac{W}{cm^2} \right]$$

En donde:

P = potencia del nicrón (en Watts)

D = diámetro del nicrón (en centímetros)

L = largo del nicrón (en centímetros)

La potencia se puede calcular conociendo la intensidad de corriente y el voltaje mediante la siguiente expresión:

$$P = I \cdot V$$

Donde,

I = intensidad de corriente eléctrica (en Amperes)

V = caída de tensión (en Volts)

P = potencia (en Watts)

Reemplazando los valores conocidos se obtiene la potencia tal como se muestra:

$$P = 5,12 \cdot 220$$

$$P = 1126,4 [W]$$

Los nicrones comprados tienen un largo de 9 metros, y un diámetro de alambre de 0,61 milímetros (medido con un micrómetro). Reemplazando los valores conocidos en la ecuación de carga superficial se obtiene el siguiente valor:

$$C = \frac{1126,4}{\pi \cdot 0,061 \cdot 900}$$

$$C = 6,53 \left[\frac{W}{cm^2} \right]$$

El valor de trabajo máximo recomendado para la carga superficial es de 3,09 W/cm² para el alambre de nicrón⁸. El valor calculado es el doble del máximo recomendado, por lo tanto se espera que la vida útil de las resistencias calefactoras se vea disminuida producto de la elevada oxidación a la que se verán sometidas, razón por la cual será necesario reemplazarlas con cierta frecuencia.

A.4 Bibliografía

1. GOODMAN CONVEYOR. Screw Conveyors Bucket Elevators Multi-Flo Conveyors. Catalog 200. Goodman Conveyor Co. P.O. Box 866/Route 178 South/Belton, South Carolina 29627, USA.
2. SMITH, J.; VAN NESS, H.; ABBOTT, M. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química, quinta edición, 1996. Editorial McGraww-Hill, México.
3. LEÓN, Marcelo. 2008. Producción de Carbón Activo a Partir de Cáscaras de Nueces: Vía Activación Química y Física. Informe Investigación y Proyecto III. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. 61 p.
4. INSPECCIÓN ESTATAL ENERGÉTICA. Guía para el análisis y evaluación de calderas y redes de distribución de vapor. [en línea] Ministerio de Economía y Planificación, Cuba. [citado Julio 20, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.energia.inf.cu/iee-mep/Document/vapor.pdf>
5. KERN, Donald. Procesos de transferencia de calor. 31^a reimpresión. 1999. Compañía editorial Continental, S.A. de C.V. México.
6. NETTO, Ricardo. Apunte de electrodinámica: Leyes de Kirchhoff. [en línea] Fisicanet. [citado Junio 24, 2010]. Disponible en World Wide Web: http://www.fisicanet.com.ar/fisica/electrodinamica/ap07_kirchhoff.php
7. KANTHAL GLOBAR® SD. Datos Técnicos. Catálogo 10-B-2-5 12-06-1000 [en línea] Kanthal Limited, Perth, Escocia. [citado Septiembre 6, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Furnace%20products%20and%20heating%20systems/Heating%20elements/SiC%20heating%20elements/Global%20SD%20heating%20elements%20SPA.pdf>

8. KANTHAL. Kanthal alloys vs. Nikrothal alloys [en línea] Kanthal Limited, Perth, Escocia, 2010. [citado Septiembre 6, 2010]. Disponible en World Wide Web: <http://www.kanthal.com/products/furnace-products-and-heating-systems/electric-heating-elements/metallic-heating-elements/kanthal-vs-nikrothal/>

Apéndice B. Evaluación Económica

B.1 Estimación de Costo de equipos principales e instrumentación

El equipo principal y base del actual Proyecto de Título es el reactor batch de activación térmica, el cual se mandó a cotizar a Bettoli S.A. en Quilpué y posteriormente se dio la orden de fabricación y compra, por lo que no fue necesario estimar su valor ya que se cuenta con el valor real.

No obstante, tal como se menciona al inicio del Capítulo 5, para presentar el proyecto a la Incubadora *Chrysalis* fue necesario escalar los equipos y la producción, razón por la cual se obtuvo el índice de escalamiento que más se adaptara al reactor a partir de la tabla B.1:

Equipment	Size Range	Exponent
Reactors, Glass-Lined, Jacketed (without drive)	50-600 gals.	0,54
Reactors, Stainless Steel, 300 psi	100-1000 gals.	0,56
Reactors		0,65 0,70
Reactors	50-4000 gals	0,74
Reactors (agitated)		0,45 0,50

Tabla. B.1: Índices de escalamiento por capacidad para reactores. Adaptado de PETERS & TIMMERHAUS. ¹

Por no estar confeccionado en vidrio, no trabajar a altas presiones ni estar agitado, el índice de escalamiento seleccionado fue de 0,74.

La cantidad de Carbón Activado generado es de 71,28 gramos, por lo que escalando dicha cantidad a una producción de 1 kilogramo, es decir, una producción de aproximadamente 14 veces la original, se obtiene el siguiente costo:

$$Costo = \$700.000 \cdot \left(\frac{1000g}{71,28g} \right)^{0,74} \approx \$4.935.000$$

Por su parte, el costo del Generador de Vapor emplazado originalmente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias se desconoce, pero considerando su antigüedad y comparándolo con equipos similares más modernos de la misma marca, *Sussman Electric Boilers*, se estimó que su costo de adquisición podría oscilar alrededor del millón de pesos.

Pasando a la instrumentación del reactor, los nicrones o resistencias calefactoras fueron comprados, y tienen un valor de \$3.000 por unidad, por lo que estimando la cantidad necesaria para calentar una masa de carbón de 14 veces la original se determinó que no debieran emplearse más de 28, por lo que el costo sería de \$84.000 como máximo.

Finalmente, la termocupla también se compró, y tuvo un valor aproximado de \$40.000, mientras que el controlador de temperatura así como sus accesorios también se compraron, ascendiendo su valor conjunto a los \$150.000. Estos accesorios tendrán el mismo valor trabajando con un reactor de 70 gramos de capacidad así como con uno de 1 kilogramo de capacidad, por lo que sus valores no fueron escalados.

Finalmente, el costo de los equipos principales fue de:

Costo de Equipos Principales: \$ 5.935.000

Y el costo de su instrumentación fue de:

Costo de la Instrumentación: \$ 274.000

B.2 Determinación del Capital Total de Inversión

En el Capítulo 5, sección 5.2.1 se explica cómo se obtuvo el capital fijo directo e indirecto. En ésta sección se realizarán los cálculos que llevaron a dichos resultados.

Para el capital fijo directo no hay más cálculos que los presentados en la sección 5.2.1, por lo que se omitirán. Sin embargo, para el cálculo del capital fijo indirecto hay algunos cálculos que no se ven reflejados en el cuerpo del actual Proyecto de Título, para ser específico, los

cálculos para la obtención de los costos legales, contingencias, capital fijo indirecto y capital de inversión.

Tal como se señaló, los costos legales se estimaron en un 1% del capital fijo, mientras que las contingencias se estimaron en un 5% del capital fijo.

Se puede observar que se tiene un ciclo, ya que para determinar el capital fijo se necesitan estos dos ítems, pero a su vez, para determinarlos, se necesita el capital fijo. Esto se soluciona determinando el capital fijo en primer lugar, descontando los porcentajes de los dos ítems faltantes.

Ya se determinó que el capital directo asciende a \$ 8.879.750, que la ingeniería y supervisión asciende a \$ 443.988, que el capital fijo es la suma entre el capital directo e indirecto, y que entre los costos legales y contingencias se suma un 6% del capital fijo, por lo tanto:

$$\text{Capital Fijo} = \left(\frac{\$8.879.750 + \$443.988}{1 - 0,6} \right) = \$9.918.870$$

De aquí, aplicando los porcentajes respectivos, se obtienen los ítems faltantes para el cálculo de los costos indirectos:

Costos Legales: \$ 99.189

Contingencias: \$ 495.943

Capital de Trabajo y Capital Total de Inversión

La obtención del capital de trabajo es similar al cálculo efectuado anteriormente. Se sabe que se estimó en un 10% del capital total de inversión, y que éste último corresponde a la suma entre el capital fijo, el capital de trabajo y los costos de puesta en marcha.

El costo de puesta en marcha se calcula como el 10% del capital fijo, el cual ya fue determinado, obteniéndose una cifra igual a \$ 991.887, con lo que el capital total de inversión se obtiene como se muestra a continuación:

$$\text{Capital Total de Inversión} = \left(\frac{\$9.918.870 + \$991.887}{1 - 0,1} \right) = \$12.123.063$$

Con lo cual el capital de trabajo, sabiendo que corresponde al 10%, equivale a:

Capital de Trabajo: \$ 1.212.306

B.3 Determinación del Beneficio Actual y Flujo de Caja

Para determinar el beneficio actual es necesario determinar en primer lugar las ganancias por venta y a continuación el costo total del producto, pudiendo calcular con ellos la utilidad operacional. La mayoría de los cálculos efectuados para el costo total del producto se desprenden directamente de la sección 5.3.1 del cuerpo del actual Proyecto de Título. Aquí se presentarán sólo aquellos cálculos que podrían no haber quedado completamente claros.

Materias Primas

Tal como se señaló, el precio considerado para las cáscaras de nueces equivale a un precio minorista de \$150 por kilogramo de cáscaras.

De los balances de masa para el diseño del reactor se determinó que la cantidad de cáscaras necesaria para una hora de operación es de 3,01 kilogramos.

Teniendo en mente que el reactor trabajará los tres turnos de trabajo, y considerando 350 días laborales en el año, los gastos en concepto de materia prima serían:

$$\text{Materia Prima} = \$150 \cdot 3,01 \cdot 24 \cdot 350 = \$3.792.896$$

Observación: La discrepancia de los resultados se debe al hecho de haber realizado los cálculos en planilla de cálculo, considerando cifras exactas. Las aquí presentadas son cifras aproximadas.

Depreciación

Tal como se señaló, se consideró una depreciación lineal de los equipos, asignándoles una vida útil de 10 años y un valor de salvamento del 10% de su costo inicial.

El valor inicial de los equipos es de \$ 5.935.000, por lo que la depreciación anual será de:

$$\text{Depreciación} = \left(\frac{\$5.935.000 - 0,1 \cdot \$5.935.000}{10} \right) = \$534.150$$

Al igual que en ciertos cálculos anteriores, en la determinación del costo total del producto nuevamente se presentan ítems que dependen del resultado final, los cuales corresponden a los servicios generales (10% del costo total del producto), gastos de distribución y ventas (5% del costo total del producto) e imprevistos (2% del costo total del producto).

La suma de todos los demás ítems calculados previamente se presentan en el cuerpo del proyecto, ascendiendo a \$ 29.327.705, por lo que el costo total del producto quedará finalmente determinado como:

$$\text{Costo Total del Producto} = \left(\frac{\$29.327.705}{1 - 0,1 - 0,05 - 0,02} \right) = \$35.334.584$$

De lo cual se desprende, aplicando los porcentajes recién mencionados:

Servicios Generales: \$ 3.448.411

Gastos de Distribución y Ventas: \$ 1.724.205

Imprevistos: \$ 689.628

Por lo tanto, restando a las ganancias por venta el costo total del producto, la utilidad operacional resultante será:

Utilidad Operacional Anual: \$ 7.515.893

Flujo de Caja

Los ítems considerados en la construcción del flujo de caja ya fueron mencionados con anterioridad. Sólo se presentarán los cálculos para la determinación de los impuestos, así como el del valor de libro.

Como se explicó, los ingresos gravables son directamente la resta entre la utilidad operacional y las pérdidas del ejercicio anterior, que no se presentaron en ningún año, y el impuesto a la renta equivale al 17% del ingreso gravable, el cual se aplica directamente.

Por su parte, el valor de libro al quinto año se calcula como sigue:

$$\text{Valor de Libro} = (\$5.935.000 - 5 \cdot \$534.150) = \$3.264.250$$

Anexo A. Formulario entregado a la Incubadora de Proyectos PUCV, *Chrysalis*

FORMULARIO DE PRESENTACIÓN DE PROYECTOS DE NEGOCIOS

Para completar el siguiente formulario, deberá considerar las siguientes recomendaciones:

- ↪ Sólo se aceptarán postulaciones que cumplan con el siguiente formato preestablecido.
- ↪ Para mayor comodidad y evitar riesgo de pérdida de información, se recomienda descargar el presente formulario en formato Word y trabajarlo en su equipo. Una vez completado proceder a copiar y pegar todos los campos en el presente formulario, existente en el sitio de Chrysalis.
- ↪ Debe destacar antecedentes que demuestren su conocimiento técnico, mérito innovador y/o de gestión del negocio.

1. Datos generales del proyecto de negocio:

1.1. Nombre del proyecto y breve resumen del mismo (el análisis competitivo, sus capacidades y competencias como emprendedor y el análisis económico, identifique claramente la componente innovadora de su proyecto)

Carbón activo de desechos agroindustriales para suplir demanda en procesos de separación en minería del Oro en Chile

El producto ofrecido, "carbón activo de cáscaras de nueces", tiene como mercado objetivo empresas mineras de extracción de oro, debido a su capacidad de retener de manera selectiva el oro presente en las soluciones de lixiviación, a diferencia de otros carbones activos de origen vegetal o mineral.

Otro carbón activo de características similares es el de cáscaras de coco, pero debido a la mayor disponibilidad de nueces en Chile, la materia prima es mucho más económica.

La demanda de carbón activo en el país es muy elevada. Según cifras de Aduana, las importaciones del mismo superan desmesuradamente las exportaciones, por lo que aparte de añadir un elevado valor agregado a las cáscaras de nueces al transformarlas en carbón activo, las cuales actualmente se consideran desechos agroindustriales, el proyecto ofrecerá una nueva oferta del producto a la minería de oro de nuestro país.

1.1.1. Dirección (si la posee)

Avenida/calle, n°, ciudad, país

1.1.2. Personería Jurídica (si la posee)

1.1.3. Rut (si posee)

1.2. Antecedentes del equipo emprendedor

1.2.1. Datos del Emprendedor (por cada uno)

Nombres	Hernán Ulises
Apellidos	Cancino Riquelme
Rut	16.251.917-4
Fecha Nacimiento	21 de Febrero, 1986
Dirección	General Cruz # 34, Valparaíso
Teléfono	9-5464002
E-Mail	hernan_ulises@hotmail.com
Nacionalidad	Chilena

Nombres	Carlos Javier
Apellidos	Carlesi Jara
Rut	13.678.147-2
Fecha Nacimiento	10 de Enero, 1979
Dirección	General Cruz # 34, Valparaíso
Teléfono	227 37 28
E-Mail	carlos.carlesi@ucv.cl
Nacionalidad	Chilena

Nombres	María Victoria
Apellidos	García de Pablo
Rut	5.173.727-K
Fecha Nacimiento	11 de Agosto, 1944
Dirección	General Cruz # 34, Valparaíso
Teléfono	227 37 21
E-Mail	mvgarcia@ucv.cl
Nacionalidad	Chilena

1.2.2. Formación del emprendedor (por cada uno)

Área de especialización o de expertise	Ingeniería Química
Institución	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Ciudad	Valparaíso

Área de especialización o de expertise	Ingeniería Química
Institución	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Ciudad	Valparaíso

Área de especialización o de	Ingeniería Química
------------------------------	--------------------

expertise	
Institución	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Ciudad	Valparaíso

1.2.3. Experiencia relacionada con el proyecto presentado (historia de éxitos/fracasos, trabajos anteriores relacionados, intentos de levantamientos previos)

Un año de trabajo en los ramos de “Investigación y Proyecto” II y III de los 11º y 12º semestres de la malla curricular de la carrera de Ingeniería Civil Química, desarrollando el proyecto de “Diseño de un reactor de activación de carbón a partir de cáscaras de nueces”, proyecto aprobado por la comisión evaluadora de dichas asignaturas.

Cinco meses como alumno memorista de la carrera de Ingeniería Civil Química con el tema de diseño, desarrollo y puesta en marcha de un reactor de activación de carbón a partir de cáscaras de nueces.

Cursadas y aprobadas las asignaturas de “Ingeniería Económica”, “Separación Sólido-Líquido”, “Industria de los Alimentos” y “Cinética y Diseño de Reactores”, todas relacionadas al tema del actual proyecto en desarrollo.

1.2.4. ¿Por qué consideran que ustedes podrían ser los más exitosos en esto?

Consideramos que podríamos ser los más exitosos debido al extenso trabajo de investigación relacionado con la activación de carbón proveniente de cáscaras de nueces desempeñado por la Escuela de Ingeniería Química de la PUCV, que viene a concretar años de investigación y estudio, tanto técnico como de prefactibilidad económica, en el proyecto aquí presentado.

El tema se abordó en el año 2005 con la tesis desarrollada por Marcela de la Cerda seguido continuamente por la profesora María Victoria García en temas de Investigación y Proyecto de la Escuela de Ingeniería Química y en dos tesis actualmente en desarrollo relacionadas con la materia.

Actualmente se diseñó y construyó externamente un reactor que se encuentra en operación, el cual es capaz de activar carbón utilizando para ello vapor de agua generado por un evaporador presente en las dependencias de la Escuela

1.2.5. Si actualmente no consideran que podrían ser los más exitosos ejecutando esta idea¿qué estiman que les falta para serlo?

Actualmente sí consideramos que podríamos ser los más exitosos ejecutando nuestra idea, desde el punto de vista técnico, conceptual e ingenieril. Únicamente estimamos que nos hace falta el impulso monetario con el cual adquirir el equipamiento necesario para conseguir dicho éxito.

2. Sobre el proyecto de negocios

2.1. Responsable del proyecto ante Chrysalis

Nombre	Hernán
Apellidos	Cancino Riquelme

2.2. Antecedente y Justificación

2.2.1. ¿Cuál es el nivel de desarrollo de su proyecto? Indique con una X lo que corresponda.

- Idea o concepto de negocio
 Prototipo conceptual (a nivel de diseño o estudios formales)
 Prototipo funcional (construido y que desempeña ciertas prestaciones)
 Prototipo desarrollado y en pruebas de validación
 Adoptado en la industria

2.2.2. Problemática / Necesidad Detectada / Oportunidad del Proyecto

Usted debe agregar un análisis breve de cual es la necesidad que detectó o la oportunidad que se estima y cuales son los factores externos (Acuerdos comerciales, coyuntura económica, políticas del gobierno, entre otros.) que permiten el desarrollo y crecimiento del proyecto de negocio.

Actualmente, nuestro país importa una mayor cantidad de carbón activo respecto a la cantidad exportada del mismo.

Las cifras registradas por el Servicio Nacional de Aduanas para los últimos años (en US\$) reflejan lo recién mencionado, lo cual demuestra la escasa producción nacional de este producto:

Año	Importaciones US\$
2002	1591635
2003	1989508
2004	1902031
2005	2162330
2006	1926837
2007	2380500

Año	Exportaciones US\$
2002	80792
2003	40000
2004	0
2005	2981
2006	19810
2007	944

Además, la producción mayoritaria de carbón activo en Chile utiliza como materia prima el

aserrín y los cuescos de durazno, desaprovechando las cáscaras de nueces, las cuales se utilizan principalmente como combustible o material de relleno de muy bajo valor agregado. Es por lo anterior que este proyecto presenta una doble ventaja: ofrecer una nueva oferta de carbón activo de características diferenciadoras para el uso en minería de Oro y por otro lado revalorizar el desecho de cáscaras de nueces como producto de alto valor agregado. Entre los factores externos que favorecerán el proyecto cabe mencionar el aumento considerable de proyectos mineros de oro en Chile, tales como Pascua Lama por ejemplo, entre otros.

2.2.3. Producto o servicio

Realizar una breve descripción del producto o servicio que sustenta el negocio, con una descripción del proceso productivo en el caso que existiera (incorporar antecedentes complementarios).

El proyecto consiste en la elaboración del producto “Carbón activo”, el cual pasa por dos grandes etapas en su proceso productivo: pirólisis y activación. La pirólisis consiste en la carbonización de las cáscaras de nueces molidas, con objetivo de eliminar cenizas y componentes volátiles que no son de interés para el producto final. La fase de activación consiste en la reacción a altas temperaturas entre vapor de agua y el carbón obtenido en la pirólisis, que conlleva a un aumento de la microporosidad interna del carbón, lo cual es deseable en las tareas de adsorción que desempeñará el producto final. Tanto las condiciones de pretratamiento del material como las condiciones operativas de la activación han sido estudiadas y validadas por el grupo que propone este proyecto. El producto es requerido en el proceso de separación de lixiviados cianurados de oro y cobre con el objetivo de retener selectivamente oro y plata de la corriente de lixiviación.

2.2.4. Diferenciación e innovación del producto o servicio con respecto a lo existente hoy en día en el mercado. Además indique los principales competidores

Describir brevemente las ventajas y desventajas de la competencia directa e indirecta, como también los productos sustitutos.

Los carbones activos presentan diferencias en las sustancias que son capaces de adsorber y en la cantidad que pueden adsorber de las mismas dependiendo de la distribución, tamaño y cantidad de poros internos, lo cual depende fuertemente del material de partida con el cual se elaboró el carbón. Las cáscaras de semillas, en este caso cáscaras de nueces, presentan una buena porosidad natural, lo cual representa una ventaja previa en la elaboración de carbón activo, resultando un producto de elevado poder adsorbente y buena selectividad. Como ventaja frente a otros productos competidores, tales como carbón activo proveniente de aserrín de madera, debido a la porosidad natural de las cáscaras de nueces, no se necesitan temperaturas tan elevadas en el proceso de activación, lo cual reduce los costos de operación. El principal competidor, aparte de toda la amplia gama de carbones activos existentes, es el carbón activo proveniente de cáscaras de coco, que posee propiedades similares al de cáscaras

de nueces, pero que sin embargo, su materia prima es mucho menos abundante que las nueces en nuestro país.

2.2.5. Sector económico en que se inserta.

Indique con una X, el que corresponda.

Turismo		Agroalimentos		Tecnologías Información y Comunicaciones	
Industria del Conocimiento		Biotecnología		Otro, indíquelo:	
Logística de Exportaciones		Manufactura	X		

2.2.6. Mercado del producto o servicio.

Describa las características de los clientes a quienes está dirigido el producto o servicio, sus principales criterios y preferencias de compra y un detalle de todos los componentes (actores) del mercado y del rubro específico en el que se inserta el proyecto.

El producto “carbón activo de cáscaras de nueces” tendrá como mercado objetivo empresas del rubro minero en la extracción de Oro.

En el proceso de extracción de oro se emplean procesos de lixiviación, lo cual genera corrientes cianuradas de oro y cobre, en las cuales debe separarse selectivamente el oro, razón por la cual el producto ofrecido poseerá un tamaño y distribución de poros tal que sea capaz de retener de manera selectiva únicamente el mineral de interés.

Además de lo anterior, el producto también es atractivo en otros mercados, tales como los campos de la Química, Farmacéutica, Industria Alimenticia, Tratamientos de agua, entre otros.

Los formatos de compra del producto son 3, cuyos usos principales se detallan a continuación:

1. Pellets: Filtros en tratamiento de aguas.
2. Granular: Adsorción de gases: aislantes térmicos, electrodomésticos.
3. Polvo: Adsorción líquida: decolorante, clarificador.

Empresas chilenas demandantes de este producto son muchas. A continuación se mencionan sólo algunas, clasificándose por rubro y aplicación:

- Aislantes térmicos y electrodomésticos: Nicolaides S. A.
- Industria de alimentos: NESTLÉ Chile, entre muchas otras.
- Laboratorios: Laboratorio Chile, MERCK Ltda.
- Jugos, bebidas y cervezas: Agroindustria nacional S. A., Embotelladora Andina
- Agropecuarias
- Celulosa
- Forestales
- Otros

Los actores de mercado para el proyecto presentado son cuatro: Proveedores de la materia prima “cáscaras de nueces”, los que corresponden a empresas del sector agroindustrial

productoras de nueces peladas, Transformación del carbón activo, el cual corresponde al actual proyecto, Distribuidores y finalmente Consumidores industriales, que corresponderán a mineras de extracción de oro.

2.2.7. Proveedores requeridos por el proyecto.

Describe cuales son los proveedores, donde se encuentran, que tan concentrados están, el poder negociador de ellos, en cuanto a disponibilidad del producto o servicio que requiere su proyecto.

Al requerir cáscaras de nueces como única materia prima, los proveedores requeridos por el proyecto son pocos: sólo aquellos que ofrezcan dicha materia.

Debido a que actualmente las cáscaras de nueces son consideradas desecho en la producción de nueces peladas, el valor es relativamente bajo, razón por la cual el poder negociador de los proveedores es limitado y la disponibilidad elevada.

Las cáscaras de nueces se venden de forma minorista o mayorista en gran medida en la región Metropolitana, aunque también se ofrecen más al sur, como por ejemplo en Valdivia.

Por otra parte, se puede considerar a las empresas exportadoras de nueces sin cáscaras como proveedores estables. Las cifras recopiladas en la “Estadística Mercado Nueces de Nogal Chilenas” presentado por ChileNUT, basándose en información aduanera actualizada a octubre de 2009, indican que las cifras de nueces sin cáscaras exportadas ha ido en aumento año a año, desde el año 2000 hasta el año 2008, exportándose este último un total de 7376,5 toneladas.

Si consideramos que un 25% del peso de la nuez corresponde a cáscara, se desecharon un total de 2458,8 toneladas de cáscaras.

Considerando un 50% del total de cáscaras eliminadas como comerciables para el proyecto, se tiene una disponibilidad de 1229,4 toneladas de cáscaras anuales, lo cual excede con creces la cantidad requerida.

2.3. Requerimientos del proyecto

2.3.1. Que lo motiva para postular a Chrysalis (Conformar Redes de Contacto, postular a fondo Capital Semilla, obtener financiamiento privado, una instalación de partida para el futuro negocio. Indicar otras si existen).

Poder concretar la etapa de validación comercial de la propuesta con apoyo en la búsqueda de fuentes de financiamiento específicas para este tipo de innovaciones.

2.3.2. ¿Cuál es la inversión inicial que necesita?

Planilla Excel que indique el detalle y monto de los bienes necesario para el comienzo del negocio (instalaciones, máquinas y equipos).

Se adjunta planilla de Excel. Ver hoja de cálculo “Inversión inicial”.

2.3.3. Estimación de la bondad económica del proyecto

Planilla Excel que señale los Ingresos(ventas) y Egresos(costos) esperados del año 1 hasta el año 5. Si posee flujo de caja evaluado (TIR y VAN), incorporarlo en lugar de la anterior.

Se adjunta planilla de Excel. Ver hoja de cálculo “Bondad económica”.

Anexo B. Carta de retiro presentada en *Chrysalis*



Valparaíso 11 de Junio de 2010

Sr. Marcelo León Vargas
Ingeniero de proyectos de Chrysalis

Ref.: Justificación de inasistencia a presentaciones

Estimado Sr. León, por medio de la presente, presento la justificación a mi nombre y de Hernán Cancino, al hecho de no participar en la etapa de presentaciones del proceso de postulación a proyectos para la incubadora de nuestra Universidad.

Haciendo una revisión general al proyecto "Carbón activo de desechos agroindustriales para suplir demanda en procesos de separación en minería del Oro en Chile" para la preparación para el Elevator Pitch encontramos ciertos detalles faltantes en la etapa de validación comercial.

Luego de la reunión explicativa realizada en sus dependencias, realizamos una reunión con Hernán para ver como se enfrentaba la nueva etapa, sin embargo los antecedentes entregados en la citada reunión evidenciaron que el objetivo del concurso era incubar ideas consolidadas de negocio más que ideas en periodo de realización y pilotaje. Al respecto realizamos un análisis de lo que al proyecto presentado le faltaba para ser realmente un negocio de rápida implementación e identificamos que la validación del producto (por parte de los potenciales clientes) es algo muy importante y que falta en este caso. Debido a esto, hemos llegado a la conclusión que el proyecto tendrá un más lógico desarrollo en las líneas de capital semilla, las cuales contempla validación comercial.

Con todas estas consideraciones, es que hemos decidido de no seguir en el concurso, sin embargo el haber presentado el proyecto ha sido de gran utilidad para el desarrollo del mismo, por lo cual creemos que superando la etapa de validación por parte de potenciales clientes, el proyecto puede ser presentado mucho más maduro a una nueva convocatoria.

Atentamente
Dr. Carlos Carlesi Jara
Profesor Auxiliar- Jefe de Investigación
Escuela de Ingeniería Química
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

pucv.cl

Av. Brasil 2950, Valparaíso-Chile
Tel: (56-32) 2273000
Fax: (56-32) 2212746
Casilla: 4059

Escuela de Ingeniería Química
Av. Brasil N°2147, 2362804 Valparaíso, Chile
Fono:(56) (32) 2273728 Fax: (56) (32) 2273807
e-mail: carlos.carlesi@ucv.cl url: www.eiq.cl

Anexo C. Cotización del reactor

----- Mensaje original -----

Asunto: COTIZACIÓN Nº B-369-09

Fecha: Thu, 26 Nov 2009 12:37:29 -0300

De: Jorge Skeet H. (Bettoli S.A.) <jskeet@bettoli.cl>

A: <gianni.olguin@ucv.cl>

Atte. Sr. Gianni Olguin.

Fabricar : 1 reactor compuesto por :-

1 carcasa (encamisada y con flanges soldados)

9 platos

1 eje central

2 tapas planas

Valor : \$ 698.860

Plazo de entrega : 10 días hábiles

Lugar de entrega : nuestra bodega

Condiciones de pago : usuales

Atte. Jorge Skeet H.