

**"DISEÑO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE
BORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC
A PARTIR DE ULEXITA"**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Química

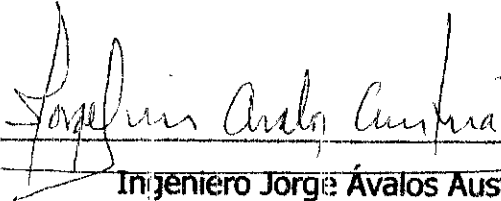
**"DISEÑO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE
BORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC
A PARTIR DE ULEXITA"**

Nohelia Dalila Gutiérrez Ríos

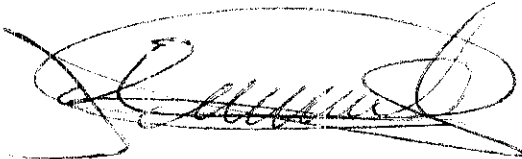
**Trabajo de graduación presentado para optar al grado académico de Licenciatura
en Ingeniería Química**

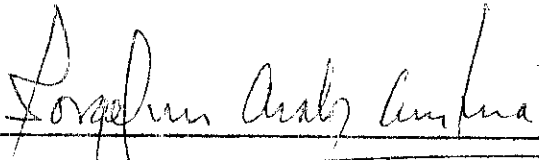
Guatemala 18 de Octubre, 2000


Vo. Bo. :

(f) 
Ingeniero Jorge Ávalos Austria
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ingeniero José Eduardo Calderón

(f) 
Ingeniero Jorge Ávalos Austria

(f) 
Ingeniero Otto Alvarado

Fecha de aprobación: 18 de Octubre del 2000

DEDICATORIA

A Dios,

A mis Padres,

A mis Hermanos,

A la Empresa "Sales, Ácidos y Solventes S.A."

A la Universidad Del Valle de Guatemala

RESUMEN

El boro se encuentra en la naturaleza como boratos con los metales más activos y comunes.

El presente estudio tiene como propósito el estudio de un proceso para fabricar borato de sodio y borato de zinc a partir de ulexita, el cual es un borato doble de sodio y calcio. Estos compuestos tienen muchas y variadas aplicaciones, siendo de gran importancia su uso como retardantes de flama y como fertilizantes en la agricultura. El estudio se hizo para la empresa "Sales, Ácidos y Solventes, S.A.".

Con base en las numerosas patentes consultadas, que abarcan un período desde 1970 hasta la fecha; a las aptitudes tecnológicas que ofrece la empresa, de sus equipos disponibles y de los mercados en los que le interesa participar, se decidió experimentar un proceso en donde la ulexita, al reaccionar con carbonato de sodio produce tetraborato de sodio, el cual a su vez reacciona con sulfato de zinc y así obtener borato de zinc.

Con el experimento se obtuvo cada uno de los productos de manera independiente, cumpliendo con la estequiometría de las reacciones involucradas. Asimismo, se evaluó una alternativa experimental en la que se unen las dos etapas y se propone el proceso para el que se diseña la planta.

A partir de los resultados experimentales y de acuerdo a lo investigado, se diseñó el diagrama de flujo general del proceso. Al tomar en cuenta que la capacidad de la planta se estableció para producir 200 toneladas métricas de borato de zinc y 100 toneladas métricas de tetraborato de sodio por mes, se realizó la ingeniería básica para cada una de las etapas involucradas, al efectuar los balances de masa y energía correspondientes a cada una de las operaciones unitarias principales.

El presente trabajo permite concluir, que es posible implementar en Guatemala una línea de producción para la fabricación de borato de sodio y borato de zinc.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	2
A. BORO.....	2
1. Estado natural.....	2
2. Boratos.....	3
2.1 Borato de sodio.....	5
a. Propiedades físicas y químicas.....	5
b. Fabricación.....	5
2.2 Borato de zinc.....	10
a. Propiedades físicas y químicas.....	10
b. Fabricación.....	10
3. Usos y aplicación a nivel industrial.....	11
4. Aspectos económicos.....	13
B. MATERIA PRIMA: ULEXITA.....	15
1. Propiedades físicas.....	15
2. Composición química.....	16
C. PROCESO DE FABRICACIÓN.....	17
1. Proceso para la obtención del borato de sodio.....	17
2. Proceso para la obtención del borato de zinc.....	18
III. JUSTIFICACIÓN.....	20
IV. OBJETIVOS.....	21
A. GENERALES.....	21
B. ESPECÍFICOS.....	21
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	22

VI. METODOLOGÍA.....	23
A. FASE EXPERIMENTAL.....	23
1. Preparación de borato de sodio.....	23
a. Evaluación a nivel experimental de la tecnología.....	23
b. Determinación de las condiciones para obtener los mejores rendimientos de tetraborato de sodio a nivel experimental.....	24
c. Proceso de un lote de ulexita para producir borato de sodio.....	25
2. Preparación de borato de zinc.....	25
3. Preparación de borato de sodio y borato de zinc simultáneamente...	26
4. Materiales.....	26
B. EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	28
C. DESCRIPCIÓN Y PROCESO DEL DISEÑO.....	28
D. DIAGRAMA DE FLUJO.....	28
E. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA.....	28
F. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PRINCIPAL Y CARACTERÍSTICAS.....	29
VII. RESULTADOS.....	30
A. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	30
1. Preparación de borato de Sodio.....	30
2. Preparación de borato de zinc.....	31
3. Producción de tetraborato de sodio y borato de zinc simultáneamente.....	33
B. DISEÑO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE TETRABORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC.....	34
1. Diagrama de flujo del proceso.....	34
2. Descripción del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	36
C. BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE TETRABORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC.....	38
D. BALANCE DE ENERGÍA DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE TETRABORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC.....	41
E. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE TETRABORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC.....	41

VIII. DISCUSIÓN.....	46
IX. CONCLUSIONES.....	57
X. RECOMENDACIONES.....	56
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS	
ANEXO A: DATOS DE REFERENCIA.....	60
ANEXO B: FASE EXPERIMENTAL.....	62
1. Preparación de borato de sodio.	62
a. Evaluación a nivel experimental de la tecnología.....	62
b. Determinación de las condiciones para obtener mejores rendimientos de tetraborato de sodio a nivel experimental.....	66
c. Proceso de un lote de ulexita para producir tetraborato de sodio.....	69
2. Preparación de borato de zinc.....	70
a. Evaluación a nivel experimental de la tecnología.....	70
b. Evaluación del porcentaje de rendimiento del borato de zinc con respecto al tiempo de reacción.....	72
3. Preparación de borato de sodio y borato de zinc simultáneamente.....	75
a. Puesta en marcha si se usa agua como disolvente inicial.....	75
b. Puesta en marcha si se usa el licor final como disolvente inicial del proceso.....	87
c. Pruebas de filtración.....	78
4. Parámetros de diseño obtenidos experimentalmente.....	80
a. Densidad.....	80
b. Viscosidad.....	82
c. Pruebas de filtración.....	82
ANEXO C: BALANCE DE MASA.....	86
1. Mezclado de las materias primas.....	89
2. Reacción para obtener tetraborato de sodio.....	90
3. Separación del carbonato de sodio y sólidos insolubles.....	91
4. Neutralización de la solución clarificada.....	93
5. Reacción para obtener borato de zinc.....	94

6. Separación del borato de zinc.....	95
7. Obtención de borato de zinc.....	97
8. Obtención de tetraborato de sodio.....	103
ANEXO D: BALANCE DE ENERGÍA.....	109
1. Mezclado de las materias primas.....	109
2. Reacción para obtener tetraborato de sodio.....	110
3. Neutralización de la solución clarificada.....	111
4. Reacción para obtener borato de zinc.....	113
5. Obtención de borato de zinc.....	114
6. Obtención de tetraborato de sodio.....	115
ANEXO E: DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO.....	116
1. Tanques.....	116
2. Bombas.....	120
3. Pan filter.....	120
4. Secador rotatorio.....	122
5. Spray dryer.....	124
6. Ventiladores.....	126
ANEXO F: DETERMINACIÓN DE BORO.....	127
ANEXO G: NOTACIÓN.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
2.1 Boratos.....	6
2.2 Propiedades físicas y químicas del borato de sodio.....	7
2.3 Composición de la salmuera de Trona.....	8
2.4 Propiedades físicas y químicas del borato de zinc.....	10
2.5 Propiedades físicas de la Ulexita.....	15
2.6 Composición química de la Ulexita.....	16
6.1 Equipo y cristalería utilizados en la fase experimental.....	27
7.1 Resultados obtenidos en la evaluación de la tecnología para producir tetraborato de sodio.....	30
7.2 Resultados obtenidos en la evaluación de la tecnología para producir borato de zinc.....	32
7.3 Resultados obtenidos en la tecnología propuesta para producir tetraborato de sodio y borato de zinc simultáneamente, al usar agua como disolvente inicial.....	33
7.4 Resultados obtenidos en la tecnología propuesta para producir tetraborato de sodio y borato de zinc simultáneamente, al usar el licor final como disolvente inicial.....	34
7.5 Flujo másico de las corrientes del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	40
7.6 Calor requerido para cada etapa del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	41
7.7 Parámetros de operación y diseño de los tanques del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	42
7.8 Parámetros de diseño de las turbinas de agitación para cada uno de los tanques del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	42

Tabla	Página
7.9 Parámetros de diseño de los motorreductores para cada uno de los tanques del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	43
7.10 Parámetros de operación y diseño de los filtros del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	43
7.11 Parámetros de operación y diseño de las bombas del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	44
7.12 Parámetros de operación del secador rotatorio del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	44
7.13 Parámetros de diseño del spray dryer del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	44
7.14 Parámetros de operación y diseño de los ventiladores del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	45
A.1 Composición química del Ulexite 40.....	60
A.2 Pesos moleculares de los reactivos y productos.....	60
A.3 Datos termodinámicos de los reactivos y productos.....	61
A.4 Capacidades caloríficas promedio de los componentes de los gases de combustión a diferentes rangos de temperatura.....	61
B.1 Determinación de la concentración final.....	62
B.2 Determinación del porcentaje de sólidos insolubles y carbonato de calcio eliminados en la filtración.....	63
B.3 Determinación del porcentaje de rendimiento de tetraborato de sodio producido.....	64
B.4 Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el tetraborato de sodio obtenido.....	65
B.5 Pruebas de solubilidad de la ulexita en agua.....	66
B.6 Masa de tetraborato de sodio obtenido para cada concentración de B_2O_3 en el licor madre evaluada.....	67
B.7 Porcentaje de rendimiento del tetraborato de sodio obtenido respecto de la concentración de B_2O_3 en el licor madre inicial.....	67

Tabla	Página
B.8 Datos obtenidos para la determinación del porcentaje de B_2O_3 en el tetraborato de sodio obtenido para cada una de las concentraciones del licor madre inicial.....	69
B.9 Evaluación del porcentaje de H_2O_3 en el producto obtenido respecto de la concentración del licor madre inicial.....	69
B.10 Resultados obtenidos para un aumento de escala, 5:1, para fabricar tetraborato de sodio.....	70
B.11 Resultados obtenidos en la evaluación de la tecnología para producir borato de zinc.....	70
B.12 Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el borato de zinc obtenido..	71
B.13 Masa de borato de zinc obtenido para cada tiempo de reacción evaluado.....	72
B.14 Evaluación del porcentaje de rendimiento del borato de zinc respecto del tiempo de reacción.....	72
B.15 Datos obtenidos para la determinación del porcentaje de B_2O_3 en el borato de zinc obtenido para cada uno de los tiempos de reacción evaluados.....	74
B.16 Evaluación del porcentaje de H_2O_3 en el producto obtenido respecto del tiempo de reacción.....	74
B.17 Porcentajes de rendimiento de tetraborato de sodio y borato de zinc obtenidos para el proceso simultáneo, al usar agua como disolvente inicial.....	75
B.18 Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el tetraborato de sodio obtenido simultáneamente, si se usa agua como disolvente inicial....	75
B.19 Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el borato de zinc obtenido simultáneamente, al usar agua como disolvente inicial.....	76
B.20 Porcentaje de agua que retienen los residuos insolubles que se retiran por filtración, si se utiliza agua como disolvente.....	76
B.21 Porcentaje de agua que retienen los sólidos de filtración que se retiran, al usar agua como disolvente.....	77
B.22 Determinación de la concentración del licor final que se usa como disolvente inicial.....	78

Tabla	Página
B.23 Porcentajes de rendimiento de tetraborato de sodio y borato de zinc obtenidos para el proceso simultáneo, si se usa el licor final como disolvente inicial.....	78
B.24 Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el tetraborato de sodio obtenido simultáneamente, al usar el licor final como disolvente inicial.....	79
B.25 Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el borato de zinc obtenido simultáneamente, si se usa el licor final como disolvente inicial.....	79
B.26 Densidad de la mezcla inicial del proceso.....	80
B.27 Densidad de la solución clarificada del proceso.....	81
B.28 Densidad del licor final del proceso.....	81
B.29 Viscosidad de las soluciones del proceso.....	82
B.30 Determinación de la capacidad de sólidos depositados en el filtro por unidad de volumen de filtrado.	82
B.31 Datos Volumen – Tiempo para la determinación de los parámetros de filtración.....	83
B.32 Resultados Volumen – Tiempo para la determinación de los parámetros de filtración.....	83
B.33 Valores de K_C , $1/q_0$, R_m y α determinados experimentalmente.....	84
E.1 Dimensionamiento de los tanques del proceso.....	117
E.2 Diseño y dimensionamiento de las turbinas de agitación para cada uno de los tanques del proceso.....	118
E.3 Potencia requerida por las turbinas de agitación para cada uno de los tanques del proceso.....	119
E.4 Parámetros de los motorreductores de velocidad.....	119
E.5 Parámetros de diseño de las bombas del proceso.....	120
E.6 Parámetros de diseño del equipo de filtración del proceso.....	122
E.7 Parámetros de operación del secador rotatorio.....	124
E.8 Parámetros de diseño del spray dryer.....	125
E.9 Parámetros de diseño de los ventiladores.....	126

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
7.1	Porcentaje de rendimiento de tetraborato de sodio contra concentración del licor madre inicial.....	33
7.2	Porcentaje de rendimiento de borato de zinc contra tiempo.....	34
B.1	Porcentaje de rendimiento de tetraborato de sodio contra concentración del licor madre inicial (Corrida 1).....	68
B.2	Porcentaje de rendimiento de tetraborato de sodio contra concentración del licor madre inicial (Corrida 2).....	68
B.3	Porcentaje de rendimiento de borato de zinc contra tiempo de reacción (Corrida 1).....	73
B.4	Porcentaje de rendimiento de borato de zinc contra tiempo de reacción (Corrida 2).....	73
B.5	Tiempo / Volumen contra volumen de filtrado.....	84
B.6	Log_{10} de α contra Log_{10} de la caída de presión.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Disposición de los átomos en una capa de cristales de H_3BO_3 (las líneas coloreadas representan enlaces de hidrógeno).....	4
2.2	Ulexita del Condado de Kern, California.....	16
7.1	Diagrama de flujo del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	35
7.2	Diagrama del balance de materia del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc.....	39
7.3	Diagrama de las dimensiones de los tanques del proceso.....	41
C.1	Diagrama del balance de materia para la etapa de mezclado de las materias primas.....	90
C.2	Diagrama del balance de materia para la etapa de reacción para obtener tetraborato de sodio.....	91
C.3	Diagrama del balance de materia para la etapa de separación del carbonato de calcio y sólidos insolubles.....	92
C.4	Diagrama del balance de materia para la etapa de neutralización de la solución clarificada.....	93
C.5	Diagrama del balance de materia para la etapa de reacción para obtener borato de zinc.....	95
C.6	Diagrama del balance de materia para la etapa de separación del borato de zinc.....	96
C.7	Diagrama del balance de materia para la etapa de obtención de borato de zinc.....	97
C.8	Diagrama del balance de materia para la etapa de obtención de tetraborato de sodio.....	103
D.1	Diagrama del balance de energía para la etapa de mezclado de las materias primas.....	109
D.2	Diagrama del balance de energía para la etapa de reacción para obtener tetraborato de sodio.....	110

Figura		Página
D.3	Diagrama del balance de energía para la etapa de separación del carbonato de calcio y sólidos insolubles.....	112
D.4	Diagrama del balance de energía para la etapa de reacción para obtener borato de zinc.....	113

I. INTRODUCCIÓN

El boro constituye aproximadamente el 0.001% de la corteza terrestre. Este compuesto no abunda, aunque existen algunos yacimientos de sus minerales, encontrándose casi completamente en la naturaleza como boratos con los metales más activos y comunes o como sus aniones derivativos. Estos compuestos tienen muchas y variadas aplicaciones en la industria del vidrio; en la industria de revestimientos y pinturas; en la industria del cuero; en la industria de los cosméticos; en la industria de materiales ignífugos; en la industria de los detergentes; en la agricultura como fertilizantes, etc.

En el presente estudio se desarrolla el diseño de un proceso básico que permite la obtención de borato de sodio y borato de zinc a partir del mineral de boro, ulexita. Este diseño se obtiene a través de la experimentación en medio acuoso, y hace reaccionar la materia prima con carbonato de sodio, lo cual da como resultado la precipitación de carbonato de calcio y una solución de tetraborato de sodio e hidróxido de sodio, que se neutraliza con ácido bórico y por último se lleva a cabo la cristalización del tetraborato de sodio pentahidratado. Luego, a partir de este producto y la reacción con sulfato de zinc es posible obtener el borato de zinc. Lo anterior se lleva a cabo si se toman en cuenta alternativas de equipo y materiales disponibles en la planta.

El desarrollo de este trabajo abarca una investigación a nivel teórico de las diversas tecnologías existentes, así como la parte experimental; descripción detallada del proceso con base en los resultados a nivel de laboratorio que se obtienen; análisis estadístico de los resultados; el diagrama de flujo del proceso; balances de masa y energía; y la descripción del equipo principal. Con base en todo lo anterior se logran establecer las condiciones óptimas de operación para llevar a cabo la manufactura de borato de sodio y borato de zinc. Por último se tiene que a partir de la discusión del proceso, las ventajas y desventajas de los métodos estudiados, el rendimiento y la calidad del producto final obtenido, permitirán a la empresa "Sales, Ácidos y Solventes, S.A." establecer su factibilidad para poner en marcha el proceso.

Una de las principales ventajas del presente trabajo la constituye el desarrollo de dos productos con gran aplicación industrial, y se puede de esta forma solventar las necesidades del mercado guatemalteco a un costo relativamente bajo para evitar que la fuga de divisas del país sea mayor.

II. ANTECEDENTES

A. BORO

1. Estado Natural

Se ha estimado que el boro constituye aproximadamente 0.001% de la corteza de la Tierra. Es un elemento geoquímico comparativamente móvil y se encuentra en el agua del mar, la que contiene 4.6 ppm de boro en peso, y permanece en proporción relativamente constante en comparación a otros de sus constituyentes mayores. Químicamente, el boro se encuentra casi completamente en la naturaleza como boratos o en forma de sus aniones derivados. Los esquistos, en particular, muestran altas concentraciones de boro, con un valor promedio de 100 ppm, encontrándose principalmente en los minerales de arcilla. Como una regla muy general, las arcillas marinas presentan más boro que las arcillas que se acumulan en lagos o planicies de inundación y esta diferencia ha sido propuesta para distinguir arcillas de diferentes orígenes (4).

Los depósitos de boro con potencial comercial de explotación son acumulaciones de hidruros de boro formados por evaporación de lagos salinos o de agua de mar. Los depósitos de lagos salinos están constituidos principalmente por boratos de sodio, de calcio o de ambos, mientras que los depósitos marinos contienen fundamentalmente boratos de magnesio (4).

El primer mineral de boro conocido fue la ulexita (boronatrocalcita), $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, agregado de fibras flojo y redondeado, conocido como "bola de algodón". A la ulexita están asociados otros boratos, y el más importante es la colemanita, $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Hoy las fuentes más importantes de bórax son los minerales kernita (rasorita), $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, y el bórax (tíncal o atíncal), $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. La kernita se encuentra en grandes cantidades asociada al bórax con una pequeña cantidad de tinakonita, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. La probertita (kramerita), $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, tiene importancia muy secundaria. Estos minerales se encuentran principalmente en el sur de California (7).

Otros países que tienen yacimientos menos importantes de bórax son el Tíbet, Italia, Rusia, Turquía y Alemania. Hay también algunos yacimientos de poca importancia en Argentina, Bolivia, Canadá, Chile, China, India, Irán, Nueva Zelanda, Nueva Guinea y Siria (7).

Los yacimientos actualmente explotados en los Estados Unidos están situados en el desierto de Mojave, California. Hay dos tipos radicalmente distintos de yacimientos: uno, cerca de la ciudad de Boron, a 217 Km al noroeste de Los Ángeles, y el segundo en el Lago Searles, unos 80 Km más lejos. El de Boron es un yacimiento en capas con la kernita y el bórax entremezclados con un esquisto relativamente blando. El mineral está cubierto con una capa aluvial de 120 – 150 metros. El yacimiento del lago Searles, cerca de la ciudad de Trona, es esencialmente un lago seco compuesto de una masa cristalina porosa cuyos huecos están llenos de salmuera alcalina saturada (7).

Dadas las diferencias de los yacimientos, las operaciones de extracción del mineral, su tratamiento y su refinación tienen que ser muy diferentes.

2. Boratos

Muchos boratos se encuentran en la naturaleza. Algunos pueden prepararse por fusión de los óxidos metálicos con B_2O_3 o ácido bórico. Los boratos deshidratados pueden obtenerse por cristalización de la solución resultante de la neutralización de ácido bórico con un álcali acuoso (19).

Al acidificar una solución acuosa de cualquier borato, se precipita el ácido ortobórico (también llamado ácido bórico), H_3BO_3 , como cristales blancos y blandos. Este ácido que también puede prepararse por la hidratación completa de B_2O_3 , tiene una capa reticular cristalina en la cual existe extenso enlace del hidrógeno entre las moléculas de $B(OH)_3$ (Ver Figura 2.1). La estructura cristalina del material explica la separación en láminas y el aspecto resbaloso. El ácido bórico y los boratos son tóxicos (19).

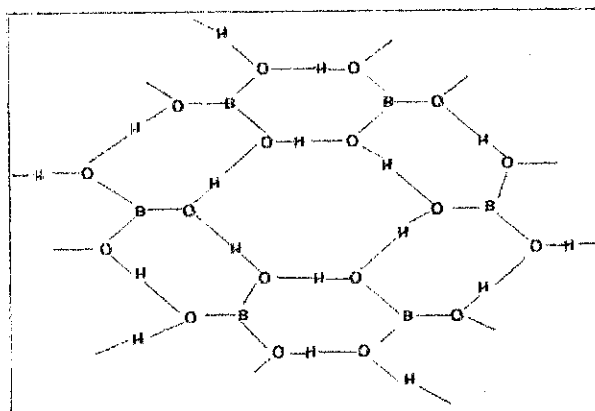


Figura 2.1 Disposición de los átomos en una capa de cristales de H_3BO_3
(Las líneas coloradas representan enlaces de hidrógeno).

En la Tabla 2.1 se presentan algunos de los boratos que existen.

Tabla 2. 1:
Boratos

Nombre	Fórmula	Característica
Tetraborato diamónico	$(NH_4)_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	Es el único borato de amonio que se encuentra en el comercio.
Metaborato de litio	$LiBO_2$	Forma cristales triclinicos o un polvo blanco.
Metaborato de sodio	$NaBO_2 \cdot 4H_2O$	Sal granulada con cristales bien definidos que se eflorescen al aire.
Pentaborato de potasio	$KB_5O_3 \cdot 4H_2O$	Es el único borato de potasio comercial y se emplea como componente en algunos fundentes especiales para soldar.
Tetraborato de rubidio	$Rb_2B_4O_7 \cdot 6H_2O$	Forma cristales prismáticos lustrosos, estables en el aire y bastante solubles en agua caliente.
Metaborato de cesio	$Cs_2B_2O_3 \cdot 7H_2O$	-----
Metaborato de magnesio	$MgO \cdot B_2O_3 \cdot 8H_2O$	-----
Colemanita	$2CaO \cdot 3H_2O_3 \cdot 5H_2O$	-----
Diborato de estroncio	$Sr_2B_2O_5$	Se obtiene por fusión de los componentes.
Metaborato de bario	$BaO \cdot B_2O_3 \cdot 4H_2O$	Aparece en forma de prismas en la fase sólida.
Borato de zinc	$ZnO \cdot B_2O_3$	Se obtiene a partir de la mezcla de la sal de zinc con borato de sodio.

(7)

2.1 Borato de sodio

a. Propiedades físicas y químicas

En la Tabla 2.2 se presentan las propiedades físicas y químicas del borato de sodio. Es un compuesto estable bajo condiciones ordinarias de uso y almacenamiento. Es incompatible con ácidos, alcaloides y sales de metales, por lo que se debe tener cuidado su exposición con éstos.

Tabla 2. 2
Propiedades Físicas y Químicas del Borato de Sodio

Apariencia	Cristales blancos – grisáceos
Olor	Sin olor
Solubilidad	6g / 100g agua
Densidad	1.73
PH	Alcalino
Porcentaje de sólidos volátiles por volumen a 21°C	0%
Punto de ebullición	320°C (680°F)
Punto de fusión	75°C (167°F)

(6)

b. Fabricación

b.1 Bórax del yacimiento de boratos de Kramer: La extracción de los minerales de borato de sodio de los yacimientos de Boron se realiza, poco más o menos, del mismo modo que cualquier otra explotación minera. El mineral extraído se transporta hasta una planta trituradora convenientemente situada. En molinos trituradores de mandíbulas se realiza una trituración preliminar, seguida por una trituración secundaria en molinos de cono. En este punto puede desviarse la corriente de mineral en dos direcciones: a los almacenes para cargar los vagones de ferrocarril que llevan el mineral a la refinería de Wilmington, California, donde el mineral es convertido en bórax refinado, o a la planta de molienda y clasificación, en la cual se trata antes de ser beneficiado en las dos plantas concentradoras diferentes situadas en la

mina. Puesto que los dos minerales, atíncar y kernita, existentes en el yacimiento, poseen caracteres físicos muy diferentes, los métodos para concentrar cada uno de ellos varían mucho. Los procedimientos son muy complicados y utilizan separadores magnéticos, calcinadores y varias unidades de separación por aire, todos adaptados a las propiedades singulares de los minerales de borato de sodio y esquisto asociado, que tienen que separarse con un rendimiento óptimo para obtener un concentrado de borato de la composición, la densidad y otras propiedades físicas deseadas (7).

Una cantidad considerable del mineral extraído se trata en esas plantas de concentración y se envían al mercado tres tipos de concentrados:

- 1) Uno sin secar, que contiene aproximadamente 49% de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 44% de agua y 7% de esquisto (7).
- 2) Otro parcialmente seco, que contiene alrededor de 65% de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 25% de agua y 10% de esquisto (7).
- 3) Un concentrado deshidratado que contiene 88 - 90% de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 0.8% de agua y 9.2% de esquisto (7).

Los minerales triturados se envían a la refinería de Wilmington, California, en la cual son tratados y convertidos en bórax refinado. El procedimiento empleado es relativamente sencillo, pues consiste en disolver el borato de sodio para separarlo del esquisto (insoluble), y luego cristalizar el bórax de la solución resultante. La diferencia en la rapidez con que se disuelven el atíncar, el bórax natural y la rasorita, contenidos en el mineral extraído, y los caracteres de las impurezas de esquisto en los que respecta a la formación del lodo introducen ciertas complicaciones. El mineral se descarga de los vagones por un sistema de vacío. La disolución de los minerales se realiza por digestión del mineral en autoclaves con aguas madres, y para acelerar la disolución de la rasorita, más difícilmente soluble, se aplica una presión de vapor de 40 lb. Estas autoclaves sirven para el doble fin de disolver los boratos solubles y separar la mayor parte de las partículas gruesas y algunas de las más finas de esquisto retenidas en una criba o doble fondo en las unidades. Las autoclaves descargan una solución de bórax muy concentrada que contiene una pequeña porción del esquisto reducido a lodo. El material insoluble más grueso se desecha. La separación de las partículas de lodo de la solución de bórax se realiza con dificultad, pues una cantidad sorprendentemente grande es coloidal y tienen un tamaño aproximado de una micra. Para obtener un producto refinado de

gran pureza, es necesario producir una solución completamente clara, de la que ha de cristalizar el bórax. Las soluciones cargadas de lodo se pasan a través de un cuenco clasificador que separa las partículas más grandes de esquisto. Después se hace pasar la solución por filtros de presión o se lleva a decantadores que funcionan a contracorriente, en los cuales se separa la mayor parte de la materia insoluble restante. Finalmente, se hace pasar la solución por un filtro prensa clasificador que separa los últimos vestigios de materia insoluble. La solución clara que sale del filtro se bombea después a los cristalizadores. En este paso hay que controlar la concentración y la temperatura, pues de otro modo puede producirse una sobresaturación que dé como resultado la formación de dos variedades del borato de sodio: el pentahidratado y el decahidratado. Esta operación se realiza al ajustar la concentración de la solución a medida que se bombea a los cristalizadores. El enfriamiento se realiza al hacer circular agua de mar por serpentines en contacto con la solución, mientras se agita continuamente. La temperatura se reduce hasta la de la atmósfera y después el lodo que contiene el bórax cristalizado pasa por centrifugas que separan las aguas madres de los cristales. Antes de sacar los cristales de los extractores, se lavan con agua limpia para eliminar las aguas madres (7).

Los cristales, que contienen aproximadamente 5% de agua en exceso, se llevan a secadores rotativos continuos, de temperatura exactamente regulada, que están constantemente cargados con el fin de impedir que se seque excesivamente el bórax hidratado y pierda una parte del agua de cristalización. Los cristales secos se envían a una planta cribadora, en la cual se separan los cristales de tamaño excesivamente grande o pequeño y se obtienen productos de tamaño uniforme para los diversos usos industriales y comerciales, o bien se llevan a otra planta para pulverizarlos. Pueden enviarse también a diferentes plantas para su conversión en otros boratos, como el metaborato de sodio, pentaborato de potasio, borato de zinc y ácido bórico, o bien para producir bórax de calidad U.S.P. o bórax de calidad especial (7).

b.2 Bórax por el procedimiento Trona: El otro yacimiento importante de bórax es un lago seco que contiene una solución de bórax y otras sales alcalinas. En la Tabla 2.3 se presenta la composición de esta salmuera. En realidad, los compuestos enumerados no existen realmente en las salmueras y la composición de las sales obtenidas varía mucho según las condiciones en que se precipitan (7).

Tabla 2.3
Composición de la salmuera de Trona

Componente:	Porcentaje en peso
Cloruro de sodio	16.35
Sulfato de sodio	6.96
Cloruro de potasio	4.70
Carbonato de sodio	4.70
Tetraborato sódico decahidratado	2.84
Fluoruro de sodio	0.01
Bromuros, litio, volframio, etc.	0.47
Total de sales (aprox.)	36.03
Agua	63.98

(7)

Se bombea la salmuera de pozos abiertos en el mineral, a unos 20 metros bajo la superficie del lago, nivel en que se obtiene una composición más favorable y menos variable que cerca de la superficie. La salmuera se transporta hasta la planta, por medio de tubería aislada a temperatura de 27°C. Se almacena en grandes tanques, en los cuales se mezcla con aguas madres resultantes de operaciones anteriores. Antes de entrar en los evaporadores, la salmuera cruda se utiliza como medio de condensación y también para lavar diversas tortas de filtros en toda la planta. La mezcla de salmuera cruda y de aguas madres procedentes de cristalizaciones anteriores se lleva a grandes evaporadores de triple efecto, con vacío, algo parecidos a los empleados en las refinerías de sal, pero mayores. Se emplean evaporadores de triple efecto por su mayor rendimiento y por su adaptabilidad al procedimiento utilizado. Cada evaporador se compone de tres unidades en serie. El vapor circula por esas unidades en sentido contrario a la salmuera, de modo que la evaporación final se realiza a la temperatura más alta. Este procedimiento es necesario para retener la potasa y el bórax en solución a medida que el líquido se hace más concentrado. Esas dos sales son mucho más solubles a temperatura elevada que a temperaturas bajas y su concentración aumenta progresivamente durante la evaporación del agua de la salmuera. Las solubilidades del carbonato, el sulfato y el cloruro de sodio son menores, y la mayor parte de esas sales precipita y se separa del

sistema evaporador por medio de trampas y filtros. La evaporación se continúa hasta que la salmuera queda saturada de cloruro de potasio. Entonces se enfría rápidamente en condiciones tales que el cloruro de potasio cristaliza mientras el bórax y otras sales permanecen en solución. El enfriamiento se realiza en dos etapas y se consigue si se somete al vacío el líquido caliente, lo que hace que hierva y se enfríe rápidamente por evaporación. El líquido concentrado que queda después de cristalizar el cloruro de potasio es bombeado a los cristalizadores de vacío, en los cuales se vuelve a enfriar, y el bórax, con una cantidad apreciable de otras sales, cristaliza y es enviado en suspensión al decantador. El material que sale por la parte inferior de éste se lleva a un filtro rotativo de vacío que separa el bórax impuro de las aguas madre; éstas vuelven a entrar en el proceso principal mezcladas con la salmuera procedente del lago (7).

La torta de bórax impuro de los filtros es disuelta en agua caliente; se filtra la solución y de ella cristaliza el bórax por enfriamiento minuciosamente controlado en cristalizadores de vacío. Este bórax húmedo y refinado se seca después con aire caliente, se toman muestras automáticamente y, como precaución final, se hace pasar por un separador magnético para eliminar todo indicio de hierro. Finalmente, se clasifica por medio de cribas y se lleva en transportadores de cinta a los respectivos lugares de almacenamiento. Este bórax refinado tiene 99.5% de riqueza (7).

b.3 Bórax y ácido bórico de Toscana: Una fuente menos importante de ácido bórico y de bórax son las fumarolas de Toscana, surtidores de gases y vapores en terrenos volcánicos. Los ingenieros italianos de la Societa Boracifera di Larderello entubaron los surtidores y así han logrado aprovechar 900,000 kilogramos de vapor por hora para las industrias de Toscana. Al mismo tiempo se obtiene ácido bórico (bórax anhidro por tratamiento con carbonato de sodio), amoniaco, dióxido de carbono y algo de hidrógeno y helio (7).

2.2 Borato de zinc

a. Propiedades físicas y químicas

En la Tabla 2.4 se presentan las propiedades físicas y químicas del borato de zinc. Éste es un compuesto cristalino no higroscópico. Su principal uso es como retardante ignífugo y supresor de humo.

Tabla 2.4
Propiedades Físicas y Químicas del Borato de Zinc

Apariencia	Cristales blancos
Olor	Sin olor
Solubilidad	0.1g / 100mL agua
Gravedad específica	2.74
Índice de refracción	1.59

(22)

b. Fabricación

El borato de zinc se precipita de una solución concentrada de bórax añadiendo sulfato o cloruro de zinc. El contenido de óxido bórico en el precipitado depende de la concentración. El mejor rendimiento se obtiene vertiendo la solución de la sal de zinc en la solución de bórax y manteniendo éste en ligero exceso. La sal de zinc (sulfato o cloruro) debe usarse en la concentración más alta posible, o mejor aún, en forma sólida. Un exceso de sulfato de zinc se disuelve con formación de compuestos complejos (7).

Si se trata una solución de ácido bórico con carbonato de zinc húmedo y el líquido resultante se evapora lentamente, cristaliza un octaborato. Cuando se calienta una solución acuosa de esta sal a 50°C, se enturbia y da un precipitado blanco, que se deposita y cuando se separa de la mayor parte de las aguas madres, cristaliza gradualmente al formar el tetraborato (7).

Si se funde óxido bórico y óxido de zinc se obtiene $3ZnO \cdot 2B_2O_3$. Por enfriamiento rápido del producto fundido se forma un vidrio transparente, de densidad 3.64, que se disuelve fácilmente en ácido clorhídrico. Si se vuelve a calentar a $700 - 900^\circ C$ cristaliza rápidamente en forma de cristales, de densidad 4.22, insolubles en ácido clorhídrico. Se encuentra en el comercio un borato de zinc que contiene aproximadamente un 44 - 46% Zn, un 32 - 35% B_2O_3 y un 31% de agua. Este producto se usa como ignífugo en algunos tejidos, pinturas y revestimientos (7).

3. Usos y Aplicaciones a Nivel Industrial

Los químicos de borato y ácido bórico tienen una gran variedad de aplicaciones industriales.

El bórax se usa en la industria de la cerámica, principalmente para la fabricación de borosilicato y vidrios similares. El óxido bórico influye en el índice refractivo y el coeficiente de expansión de estos vidrios. También se emplean grandes cantidades de bórax, bórax anhidro o los concentrados de mineral en la preparación de fritas para los esmaltes vítreos, en los cuales se obtienen las mismas ventajas indicadas para los vidrios. Los concentrados de minerales, principalmente la rasorita anhidra, encuentran fácil aplicación en este campo, especialmente en la fabricación de las capas de fondo y las fritas de colores oscuros para capas exteriores, ya que las impurezas son esencialmente las mismas que se encuentran en las otras materias primas empleadas, con la excepción de una pequeña cantidad de óxido de hierro que no tiene importancia en el tipo de fritas mencionado (7).

En la industria del cuero se utilizan las propiedades ligeramente alcalinas y preservativas del bórax. Muchos dicen que se produce una calidad superior de cuero curtido al cromo cuando se utiliza el bórax como neutralizador con preferencia al bicarbonato de sodio que suelen emplear las tenerías. El bórax se usa también en la preparación de numerosos compuestos para el acabado de pieles (7).

El bórax se ha usado durante mucho tiempo como un compuesto de lavado, como desinfectante y enjuague. Estas aplicaciones hacen uso de sus características como buffer alcalinos y sus propiedades como desinfectante. El agua boricada (solución débil en ácido

bórico) es desde hace muchos años un remedio casero para lavado de ojos y para tratar cortaduras y heridas de poca importancia, y también para la esterilización de los artículos usados en la crianza de los niños. Se usa también en las lociones para el cabello y las manos (7).

En la industria de los cosméticos, el bórax es un excelente emulsivo y se usa en la preparación de cremas faciales con base de cera y en otras composiciones que requieren un álcali suave y un preservativo no tóxico e inofensivo (7).

El ácido bórico y los boratos también se usan para tratar textiles, madera, plywood, y otros materiales combustibles, en los que sirven como retardadores de la combustión (7).

Por su acción bacteriostática y fungistática, el bórax sirve como preservativo de la madera (cuando no está expuesta a la acción de la lluvia o el agua), de los cueros sin curtir, el bagazo, la paja y otros materiales celulósicos. Se ha empleado como preservativo de alimentos en algunos países. Las aguas de refrigeración y las de tratamiento que circulan continuamente pueden mantenerse libres de bacterias y hongos, por medio del bórax. Puesto que el bórax es un inhibidor de la herrumbre, sirve para un fin doble en las aguas que se almacenan en recipientes de acero o circulan por tanques, bombas y tuberías de acero. Tiene también las ventajas de manejarse fácilmente y sin peligro, no ser tóxico y ser económico. Por estas razones, el bórax y ciertos compuestos organobóricos se convierten en buenos preservativos o agentes aditivos (7).

El bórax es un solvente excelente para los óxidos metálicos y se ha usado por mucho tiempo en soldaduras y como agente limpiador en metalurgia no ferrosa. El vidrio de bórax es un material de fusión comúnmente usado en espectroscopia analítica (8).

El ácido bórico, el metaborato de sodio y el bórax tienen aplicaciones variadas en la fabricación de artículos fotográficos. El diborato de amonio tiene un uso muy especial en la fabricación de resinas orgánicas. El pentaborato de amonio se usa mucho como componente del electrolito para los condensadores electrolíticos y es un ingrediente en las composiciones ignífugas. El pentaborato de potasio se usa principalmente en la fabricación de fundentes para las varias clases de soldadura. El borato de zinc se usa como ignífugo en algunos tejidos, pinturas y revestimientos (8).

Durante la segunda Guerra Mundial aumentó la demanda de bórax, lo que se debió en parte a que sustituyó a otros compuestos químicos y por otro lado a muchos usos nuevos de los compuestos de boro (todos los cuales se derivan del tetraborato de sodio). Por ejemplo el trifluoruro de boro y el tricloruro de boro se usan como catalizadores en síntesis orgánica y en los procedimientos analíticos de esterificación (7).

El más reciente interés en el campo de la química del boro radica en los hidruros de boro y los compuestos organobóricos. Los hidruros de boro, en particular, se han producido por lo menos a nivel planta piloto, para el estudio como combustibles de energía altos (8).

Con el descubrimiento hace unos 50 años de que el boro es uno de los elementos minerales conocidos esenciales para el crecimiento de las plantas, se ha desarrollado un interés considerable acerca del boro en los tejidos de la planta, suelos, fertilizantes, y agua mineral. Aunque es necesario para el crecimiento de la planta, los boratos cuando se presentan en cantidades grandes actúan como herbicidas (7).

El boro elemental se usa ampliamente en la industria de metales para aumentar la dureza del acero. Agregado como una aleación de ferroboro, está normalmente presente en el acero en un rango de 0.001 - 0.005%. El boro se usa como un desoxidante para las aleaciones no ferrosas y como degasificador en cobre de alta conductancia y aleaciones de cobre, además se usa para refinar las piezas de aluminio fundido. Una cantidad pequeña de boro elemental se usa en la industria de semiconductores como un agente absorbente en silicio y germanio (8).

4. Aspectos Económicos

El *Mineral Yearbook* para 1998 da una producción anual de 4,370,000 toneladas métricas de B_2O_3 (10). No se dan las cifras de producción de diversas formas de borato de sodio, ácido bórico y otros boratos fabricados. Éstos se indican como sigue, por orden de magnitud de los tonelajes producidos de tetraborato de sodio (bórax), bórax anhidro o deshidratado, ácido bórico, metaborato de sodio, pentaborato de amonio, pentaborato de potasio y diborato de amonio. Además de esos boratos refinados, se producen cantidades

notables de concentrados de borato de sodio que se ofrecen como una fuente económica de bórax para aplicaciones en las que no es esencial la pureza.

Se expenden tres calidades de bórax y ácido bórico: la calidad comercial o técnica, la calidad U.S.P. y la calidad especial. Esta última es un producto de una pureza elevada igual a la calidad q.p. y aún mejor en algunos aspectos. Estas calidades pueden obtenerse en forma granulada, pulverizada o impalpable, productos cuyas partículas dan una serie de tamaños entre los tamices de 30 mallas y 200 mallas por pulgada. Además, se produce ácido bórico como cristal (aproximadamente del tamaño de un grano de arroz). Se producen dos formas de bórax anhidro:

1. Un material semiamorfo, vendido como bórax anhidro, bórax deshidratado o Pyrobor (7).
2. Un producto amorfo de elevada densidad vendido como vidrio de bórax (7).

El ácido bórico completamente deshidratado, B_2O_3 , se vende con el nombre de ácido bórico anhidro, anhídrido bórico u óxido bórico. Todos esos productos anhidros son de calidad comercial o técnica. Se ofrece también una calidad comercial de bórax en forma de cristales del tamaño correspondiente al tamiz de ocho mallas. El pentaborato y el diborato de amonio se expenden en forma granulada o pulverizada. El pentaborato de potasio y el metaborato de sodio sólo se venden en forma de cristales finos granulados. Los tres minerales concentrados de borato de sodio antes mencionados tienen textura granular (7).

El tipo de envases para el transporte varía según el producto. El bórax anhidro, el bórax, el ácido bórico y los concentrados de rasorita se transportan a granel en vagones cajas o vagones de tolva, o bien se venden en sacos de yute o de papel de una capacidad de 100 lb. Los productos de mejor calidad se envasan en cuñetes, barriles o tambores con revestimiento de papel especial protector. El vidrio de bórax y el ácido bórico anhidro suelen envasarse en recipientes de hojalata de 50 lb, para proteger las sustancias contra la humedad atmosférica, que absorben fácilmente. Cada dos latas se embalan en una caja de madera (7).

La producción de minerales y compuestos de boro se incrementó entre 1993 y 1998. En la agricultura su demanda ha incrementado y se espera que continúe poco a poco. La

demanda de los retardadores de fuego ha crecido el 15% por año. Su uso en jabones y detergentes se espera que se incremente en un 4% por año durante los próximos 5 años (10).

B. MATERIA PRIMA: ULEXITA

1. Propiedades Físicas

La ulexita, como otros boratos, es un mineral estructuralmente complejo. La estructura básica de la ulexita contiene cadenas de sodio, agua y octaedros de hidróxido unidos en cadenas interminables, las cuales están unidas por calcio, agua, hidróxido, oxígenos poliédricos y unidades masivas de boro. La unidad básica del boro tiene una fórmula de $B_5O_6(OH)_6$ y su carga es 3-. Está compuesto de tres grupos de boratos tetraédricos y dos de boratos triangulares (5).

Tabla 2.5
Propiedades Físicas de la Ulexita

Fórmula Química	$Na_2CaB_5O_9 \cdot 8H_2O$
Composición	Borato doble de sodio y calcio octahidratado
Color	De blanco a gris claro
Dureza	2 ½
Forma de los cristales	Triclínicos
Transparencia	De transparente a traslúcido
Gravedad específica	1.6 – 1.9
Solubilidad	Poco soluble en agua caliente

(5)



Figura 2.2 Ulexita del Condado de Kern, California

2. Composición Química

Tabla 2.6
Composición Química de la Ulexita

Óxido bórico (B_2O_3)	39.0 – 48.0%
Boro (B)	12.1 – 14.9%
Óxido de calcio (CaO)	12.0 – 16.0%
Óxido de sodio (Na_2O)	10.0 – 14%
Óxido de potasio (K_2O)	1.0 – 2.0%
Óxido de magnesio (MgO)	1.0 – 2.5%
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	0.2 – 0.5%
Óxido de silicio (SiO_2)	8.0 – 13.0%
Cloruro (Cl)	4.0 – 6.0%
Sulfatos (SO_4)	2.5 – 6.0%
Humedad	0.0 – 1.0%

(5)

C. PROCESO DE FABRICACIÓN

Luego de una investigación en la base de datos de patentes que comprenden el período entre 1970 – 2000, se presentan para su estudio los métodos en los cuales se basarán los procesos de fabricación de borato de sodio y borato de zinc a diseñar.

I. Proceso para la Obtención del Borato de Sodio

De acuerdo a la U.S. Patent 4,857,286 existe un método para preparar tetraborato de sodio pentahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) a partir de la reacción entre el mineral colemanita y carbonato de sodio (12).

El tetraborato de sodio pentahidratado es un producto usado en algunas industrias, por ejemplo en soluciones anticongelantes para evitar la corrosión, en adhesivos y en la manufactura de boratos tales como el borato de zinc. En particular, el tetraborato de sodio pentahidratado es una importante forma comercial de bórax (tetraborato de sodio decahidratado) ya que debido a que está pentahidratado es una forma más económica en comparación con el decahidratado debido a sus bajos costos de transporte, manejo y almacenamiento (12).

Las sales de borato se preparan generalmente a partir de la neutralización del ácido bórico con una base adecuada. El ácido bórico se obtiene a partir de los minerales inorgánicos de borato (usualmente boratos de sodio y de calcio) por medio del tratamiento con ácido sulfúrico, luego de una extracción líquido - líquido del mineral. Una alternativa más atractiva sería el preparar las sales de borato de una pureza adecuada directamente del mineral sin tener que llevar a cabo la preparación de ácido bórico como proceso intermedio (12).

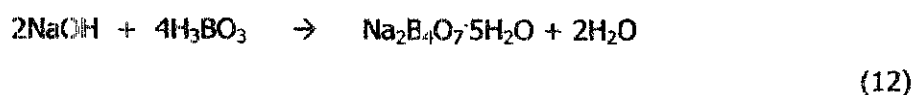
Este método satisface lo anterior, y se tiene que se puede preparar tetraborato de sodio pentahidratado de acuerdo a las siguientes etapas:

• **Etapas A:** Llevar a cabo la reacción entre la colemanita y el carbonato de sodio en un medio acuoso para producir un solución de tetraborato de sodio e hidróxido de sodio, que tienen la precipitación del carbonato de calcio. La reacción se representa por medio de la siguiente ecuación:



El carbonato de sodio puede ser total o parcialmente reemplazado por bicarbonato de sodio para obtener también buenos resultados (12).

- **Etapa B:** Tratar la solución obtenida en la etapa A, luego de precipitar los sólidos de carbonato de calcio, con ácido bórico para neutralizar el hidróxido de sodio y formar otra cantidad de tetraborato de sodio. Esta neutralización obedece a la siguiente ecuación:



- **Etapa C:** Por último, en esta etapa se cristaliza el tetraborato de sodio pentahidratado a partir de la solución acuosa obtenida en la etapa B.

Entre las consideraciones que se aconseja tomar en cuenta se tiene que es preferible llevar a cabo la reacción con colemanita previamente calcinada y pulverizada. Además, el licor obtenido en la descarga de la etapa C proporcionará el medio en que se realizará la reacción entre la colemanita y el carbonato de sodio en la etapa A (12).

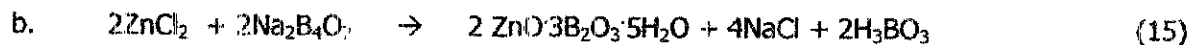
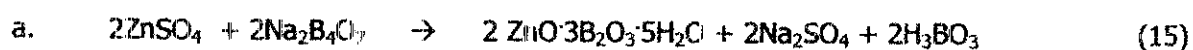
Esta patente fue desarrollada al usar el mineral colemanita, el cual es un borato de calcio representado por la siguiente fórmula $2\text{CaO}\cdot 3\text{B}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Debido a que la materia prima, ulexita, es un borato doble de sodio y calcio, se considera que presenta una composición bastante similar al mineral usado en esta patente, por lo que se pretende adaptar el método para preparar el tetraborato de sodio pentahidratado a partir de ulexita.

2. Proceso para la Obtención del Borato de Zinc

De acuerdo a la U.S. Patent 3,643,172 existe un método para preparar borato de zinc por medio de la reacción de un borato de un metal alcalino con una sal de zinc en solución acuosa a una temperatura no menor de 70°C, preferiblemente entre 90 - 100°C (15).

La sal de zinc que se emplea en el presente proceso debe ser soluble en agua y preferiblemente una sal inorgánica, tal como el sulfato de zinc, bromuro de zinc, cloruro de zinc, nitrato de zinc o alguna otra similar. Debido a sus ventajas de disponibilidad y económicas el sulfato de zinc y el cloruro de zinc se prefieren. El borato de metal alcalino preferido es el tetraborato de sodio, o bien, el tetraborato de potasio (15).

Las siguientes ecuaciones ilustran las reacciones típicas que se llevan a cabo por medio del presente método en las cuales el agua de hidratación de los reactivos no se presenta:



El borato de zinc cristaliza de la solución de reacción y luego se separa por medio de filtración, centrifugación o un proceso similar (15).

III. JUSTIFICACIÓN

El boro forma parte de la corteza terrestre en la proporción del 0.001%. El boro no abunda, pero existen algunos yacimientos de sus minerales, encontrándose siempre en la Naturaleza por lo general como borato con los metales más activos y comunes. Estos compuestos tienen muchas y variadas aplicaciones en las siguientes industrias:

- En la industria del vidrio;
- En la industria de pinturas y revestimientos;
- En la industria del cuero;
- En la industria de cosméticos;
- En la industria de materiales ignífugos;
- En la industria de los detergentes;
- En la agricultura como fertilizantes, etc.

Hasta el momento, Guatemala no posee ninguna industria que fabrique estos productos, lo cual obliga a sus usuarios a importarlos continuamente, de tal forma que se incrementan sus costos y se desfavorece a economía nacional por fuga de divisas.

Por lo anterior, el diseño de una línea de producción de borato de sodio y borato de zinc se presenta como una alternativa atractiva, ya que a partir de la transformación de la materia prima se solventarán las necesidades propias del mercado guatemalteco a un costo relativamente bajo, reduciéndose de esta manera el tiempo de obtención del producto. Además, se crearán nuevas fuentes de trabajo y se evitará que la fuga de divisas del país sea mayor.

La empresa Sales, Ácidos y Solventes, S.A. está interesada en el presente estudio para producir borato de sodio y borato de zinc. Por lo tanto, el establecimiento de la tecnología, de las etapas y condiciones de la línea de producción se realizará de acuerdo a las necesidades de la empresa.

IV. OBJETIVOS

A. GENERALES

- * Desarrollar el diseño de una línea de producción de borato de sodio y borato de zinc a partir de Ulexita para su producción industrial de la empresa "Sales, Ácidos y Solventes, S.A."
- * Establecer un método a nivel laboratorio que permita producir borato de sodio y borato de zinc para determinar las condiciones de operación más favorables para llevarlo a cabo.

B. ESPECÍFICOS

- * Determinar el proceso para obtener altos rendimientos de borato de sodio y borato de zinc y desarrollar su respectivo diagrama de flujo.
- * Determinar y dimensionar el equipo necesario para el proceso industrial, desde la materia prima hasta la entrega del producto terminado al área de empaque para su posterior distribución y consumo.
- * Determinar la caracterización de los productos finales en base al porcentaje de boro.

V. PROBLEMA A RESOLVER

Hasta la fecha no existe en Guatemala ninguna industria que produzca borato de sodio y borato de zinc, los cuales tendrían aplicación en las industrias guatemaltecas, al ser utilizados como retardantes de flama y en la agricultura como fertilizantes. Por ahora, estos productos son importados de otros países a un costo relativamente elevado con lo que se tiene fuga de divisas.

VI. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente modelo de trabajo profesional incluye siete fases que serán clave para alcanzar los objetivos planteados.

A. Fase Experimental

Tiene como finalidad fabricar el borato de sodio y el borato de zinc a partir de la ulexita, para establecer a nivel laboratorio las condiciones que lleven a cabo el proceso productivo y obtener los mejores rendimientos, así como evaluar la calidad de los productos finales en base a la determinación del porcentaje de boro y de los métodos analíticos necesarios para su caracterización.

1. Preparación de borato de sodio

a. Evaluación a nivel experimental de la tecnología

En esta fase se evaluará la tecnología para obtener el borato de sodio a partir de la materia prima ulexita. Este proceso se basa en la reacción entre la ulexita y el carbonato de sodio y se tiene como referencia la U.S. Patent 4,857,286.

1) Reactivos

- Ulexita
- Tetraborato de sodio
- Carbonato de sodio
- Ácido bórico

2) Procedimiento

1. Calcinar 100 gramos de ulexita en un rango de temperatura entre 250°C y 450°C por un tiempo aproximado de dos horas.

2. Preparar 0.130Kg de licor madre que contiene 231g de tetraborato de sodio por Kg de solución, lo cual equivale a 165g/Kg de B_2O_3 para alimentar al reactor.
3. Calentar el reactor alrededor de $95^\circ C$ y dar agitación. Al mismo tiempo se agregan 10 g de ulexita más 4.0 g de carbonato de sodio poco a poco en un período de 30 minutos. Luego de este período se continúa con la agitación por un tiempo de 1 hora a la misma temperatura.
4. Filtrar la suspensión con vacío bajo condiciones calientes.
5. Lavar el residuo con 7.5 g de agua desionizada caliente (a unos $90^\circ C$) obtener 0.140 Kg de solución acuosa.
6. Agregar 2.5 g de ácido bórico a la solución con agitación, que opera a una temperatura de $95^\circ C$.
7. La solución resultante se debe enfriar de tal forma que se cristalice el tetraborato de sodio, el cual se separará por filtración.
8. Determinar el porcentaje de boro en el producto (Ver procedimiento en el ANEXO F).
9. El licor de descarga se recircula al punto 2.
10. Repetir el proceso 5 veces.

b. Determinación de las condiciones para obtener los mejores rendimientos de tetraborato de sodio, a nivel experimental

A partir de los resultados del punto A, se determinará si la tecnología propuesta es adecuada para producir borato de sodio a partir de ulexita. Se llevará a cabo la fase experimental para determinar las condiciones que favorecen el rendimiento del tetraborato de sodio, que desarrolla el estudio de los siguientes parámetros:

1) Pruebas de solubilidad de la ulexita: Por medio de estas pruebas de solubilidad se determina el volumen de agua necesario para disolver adecuadamente la ulexita. La prueba consiste en agregar a 5.0 g de ulexita 10, 20, 30, 40 y 50 mL de agua. Trabajar en triplicado.

2) Concentración de tetraborato de sodio en el licor madre: Se lleva a cabo el proceso descrito en el punto A en duplicado para concentraciones de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 g de B_2O_3 /Kg de solución.

c. Proceso de un lote de ulexita para producir borato de sodio

En esta fase se realiza a una escala mayor el proceso, para lo cual se utilizan 79.3 gramos de ulexita, con el fin de obtener una buena cantidad de borato de sodio, el cual se usará para la siguiente etapa de la fase experimental en la que se producirá borato de zinc.

2. Preparación de borato de zinc

Esta fase tiene como finalidad preparar el borato de zinc a partir de la reacción entre el borato de sodio producido a partir de la ulexita y el sulfato de zinc de acuerdo al siguiente modelo experimental que se basa en la U.S. Patent 3,649,172.

1) Reactivos

- Tetraborato de sodio
- Sulfato de zinc heptahidratado

2) Procedimiento

1. En un beaker mezclar 14.8 g de agua a una mezcla de 14.3 g de sulfato de zinc heptahidratado, 10 g de tetraborato de sodio.
2. Agitar y calentar a una temperatura de 97°C. Se obtendrá una reacción exotérmica, la cual eleva la temperatura al punto de ebullición (103°C). Dejar reaccionar por media hora.
3. Enfriar la mezcla y remover el producto cristalino por filtración. Se lava con agua y metanol y se deja secar al aire.
4. Determinar el porcentaje de boro en el producto (Ver procedimiento en el ANEXO F).
5. Repetir el proceso variando el tiempo de calentamiento a 103°C así: 0.25, 0.50, 1.0, 2.75, 6.05 horas. Trabajar en duplicado.

3. Preparación de borato de sodio y borato de zinc simultáneamente

Esta fase tiene como finalidad preparar el borato de zinc y el borato de sodio y unir los dos procedimientos evaluados anteriormente.

1) Reactivos

- Ulexita
- Carbonato de sodio
- Ácido bórico
- Sulfato de zinc heptahidratado

2) Procedimiento

1. En un beaker agregar 153 ml. de agua y calentar alrededor de 95°C con agitación. Al mismo tiempo se agregan 21.9 g de ulexita más 5.7 g de carbonato de sodio poco a poco en un período de 30 minutos.
2. Dejar reaccionar el sistema por 1 hora a la misma temperatura.
3. Filtrar la suspensión con vacío bajo condiciones calientes.
4. Lavar el residuo con 9 mL de agua desionizada caliente (a unos 90°C).
5. Agregar 3.3 g de ácido bórico a la solución con agitación, que opera a una temperatura de 95°C y evaporar hasta unos 60 mL.
6. Separar 25 mL de la solución resultante y dejar que se cristalice el tetraborato de sodio, el cual luego se separa por filtración.
7. A la solución restante que se encuentra a unos 95°C agregarle 10.3 g sulfato de zinc pentahidratado. Se obtendrá una reacción exotérmica, la cual eleva la temperatura al punto de ebullición (103°C). Dejar reaccionar por media hora.
8. Enfriar la mezcla y remover el producto cristalino por filtración. Se lava con agua y metanol y se deja secar al aire.
9. Determinar el porcentaje de boro en los dos productos obtenidos (Ver procedimiento en el ANEXO F).
10. Repetir el proceso 6 veces.
11. Repetir el proceso para recircular el licor final en lugar de agua en el punto 1.

4. Materiales

Para la realización de toda la fase experimental se utilizan los siguientes materiales:

Tabla 6.1
Equipo y cristalería utilizados en la fase experimental

Cantidad	Equipo	Descripción
1	Balanza analítica	Mettler H80; máx. 160g; precisión 0.0001g
1	Horno	Blue M; máx. 300°C; $\pm 2.5^\circ\text{C}$
1	Mufla	SYBRON 10500 Furnace; (50 – 1200) °C; $\pm 2.5^\circ\text{C}$
3	Estufa agitadora	Corning. Stirrer / Hotplate; modelo PC-320; serie No. 53247.
1	Beaker	100 mL $\pm 5\%$; No. 1000; Pyrex, U.S.A.
6	Beaker	250 mL $\pm 5\%$; No. 1000; Pyrex, U.S.A.
2	Beaker	50 mL $\pm 5\%$; No. 1000; KIMAX, U.S.A.
2	Pipeta graduada	5 mL ± 0.05 ; TD 20°C; No. 37033; KIMAX, México
1	Pipeta graduada	10 mL ± 0.06 ; TD 20°C; No. 37033; KIMAX, México
5	Erlenmeyer	250 mL $\pm 5\%$; No. 4980; Pyrex, U.S.A.
1	Termómetro	(-20 – 150) °C ± 0.5 . No. 61066-080; HBU, U.S.A.
5	Quitazato	500 mL; No. 27060; KIMAX, U.S.A.
1	Bureta	25 mL ± 0.05 ; TD 20°C; No. 2116; Pyrex, U.S.A.
1	Probeta	100 mL ± 0.5 ; TD 20°C; LMS, Germany
2	Probeta	25 mL ± 0.05 ; TD 20°C; No. 3022; Pyrex, U.S.A.
1	Balón volumétrico	500 mL; TD 20°C; KIMAX, U.S.A.
5	Vidrios de reloj	Pyrex, England
1	Cápsula de porcelana	Harlderwanger, Berlin
2	Varilla de vidrio para agitación	-----
2	Bulbo para pipeta	Boeco, Germany.
5	Agitadores magnéticos	-----
2	Tapón de hule	-----
2	Embudo Buchner	-----
1	Caja de papel filtro	Whatman No. 5; Cat. No. 1015110; England
1	Pinza para bureta	-----
2	Soporte universal	-----
1	Mortero	Coors U.S.A.; No. 60316
1	Espátula	-----
1	Espátula analítica	-----
1	Baño térmico	Blue M; (0 – 100) °C ± 0.5
1	Barómetro	-----
1	Balanza de triple brazo	OHAUS; Modelo 700; Serie 25347; Capacidad 2610 g; ± 0.05 g
2	Pizeta	-----

.....Continuación Tabla 6.1

Cantidad	Equipo	Descripción
1	Garrafón de agua desionizada	-----
1	Viscosímetro	No. 50'W537
1	pH-metro	Hanna Instruments; EN 50081-1

B. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Esta parte tiene como finalidad el llevar a cabo el análisis estadístico adecuado de los resultados para establecer las condiciones de operación que presenten los mejores rendimientos de los productos. Además, de acuerdo a las observaciones que se realicen en la fase experimental se podrán establecer los equipos más adecuados para cada etapa del proceso productivo.

C. DESCRIPCIÓN Y DISEÑO DEL PROCESO

El objetivo de esta fase incluye la integración de los resultados experimentales, así como su adaptación a las condiciones con que se llevarán a cabo las operaciones en la planta.

D. Diagrama de Flujo

Por medio del desarrollo de un diagrama de flujo se logrará proporcionar un esquema sistemático de la línea de producción. Este mostrará cada pieza unitaria de equipo en relación a las otras. El diagrama seguirá muy de cerca el diseño experimental y se adaptará a las necesidades de la planta.

E. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

El balance de materia tiene como objetivo el dar a conocer el tamaño del equipo y a su vez, el costo de la planta dependerá directamente de éste, al partir del volumen de producción

que se desea alcanzar por la empresa "Sales, Ácidos y Solventes, S.A.". De igual forma se tomará en cuenta el balance de energía.

F. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PRINCIPAL Y CARACTERÍSTICAS

Esta etapa permitirá determinar, adquirir y/o adaptar el equipo a las necesidades del proceso. La investigación teórica que se ha efectuado hasta el momento proporciona un criterio general que puede servir como punto de partida.

VII. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este trabajo están divididos en dos partes. En la primera parte se presentan los resultados de la fase experimental. Luego, tomándolos como base, se presenta el diseño del proceso, así como los parámetros de diseño de los principales equipos del mismo.

A. RESULTADOS EXPERIMENTALES

1. Preparación de borato de sodio

Se evaluó la tecnología basada en la reacción entre la ulexita y el carbonato de sodio, la cual tiene como referencia la U.S. Patent 4,857,286.

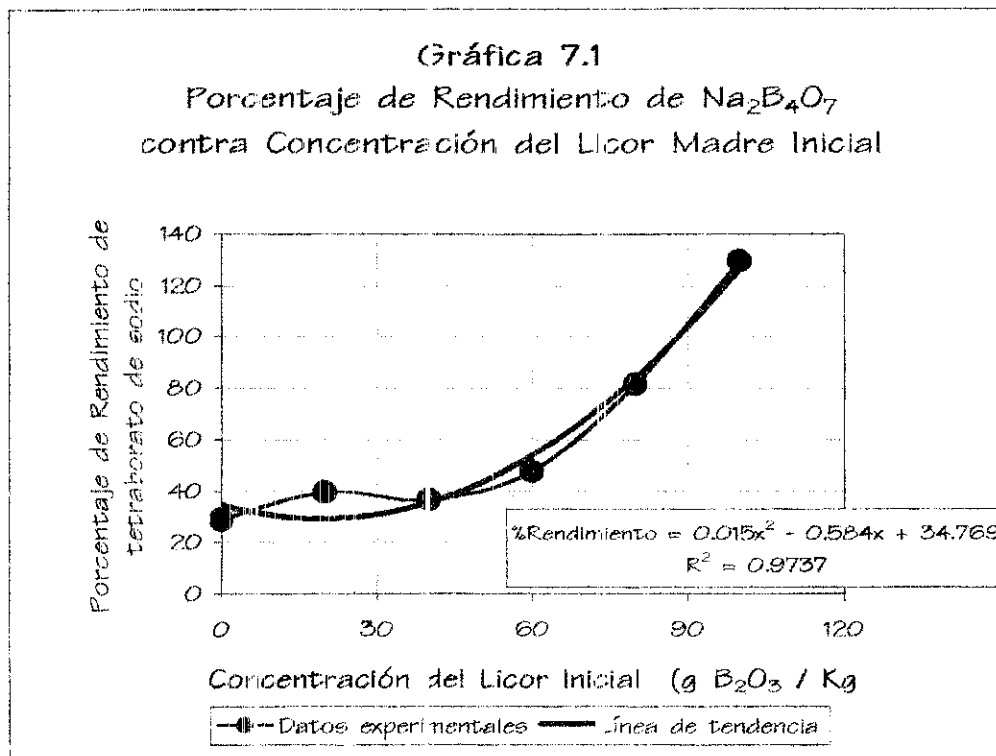
Tabla 7.1
Resultados obtenidos en la evaluación de
la tecnología para producir tetraborato de sodio

	No. de muestra	Concentración Licor Inicial (g B ₂ O ₃ / lkg solución)	Concentración Licor Final (g B ₂ O ₃ / Kg solución)	Masa de Na ₂ B ₄ O ₇ obtenido (±0.0001g)	Porcentaje de Rendimiento	Porcentaje de B ₂ O ₃ en el producto
Batería 1¹	1 ²	165.00	59.73	4.8479	41.94 %	51.49 %
	2	59.73	40.40	10.1935	88.19 %	51.56 %
	3	40.40	36.14	9.8199	84.95 %	48.16 %
	4	36.14	32.93	9.2570	80.08 %	46.21 %
	5	32.93	30.20	7.9640	68.90 %	50.96 %
Batería 2³	1	0.00	23.62	3.4899	30.19 %	55.13 %
	2	23.62	36.61	2.2856	19.77 %	49.75 %
	3	36.61	37.29	7.1985	62.28 %	49.34 %
	4	37.29	41.08	9.2930	80.40 %	50.40 %
	5	41.08	38.40	9.0655	78.42 %	50.28 %

¹ La muestra 1 de la batería contenía tetraborato de sodio en el licor inicial.

² El resultado obtenido en esta muestra 1 no es el esperado, ya que influyó el error humano durante la aplicación de la técnica de cristalización en el laboratorio.

³ La muestra 1 de la batería NO contenía tetraborato de sodio en el licor inicial.



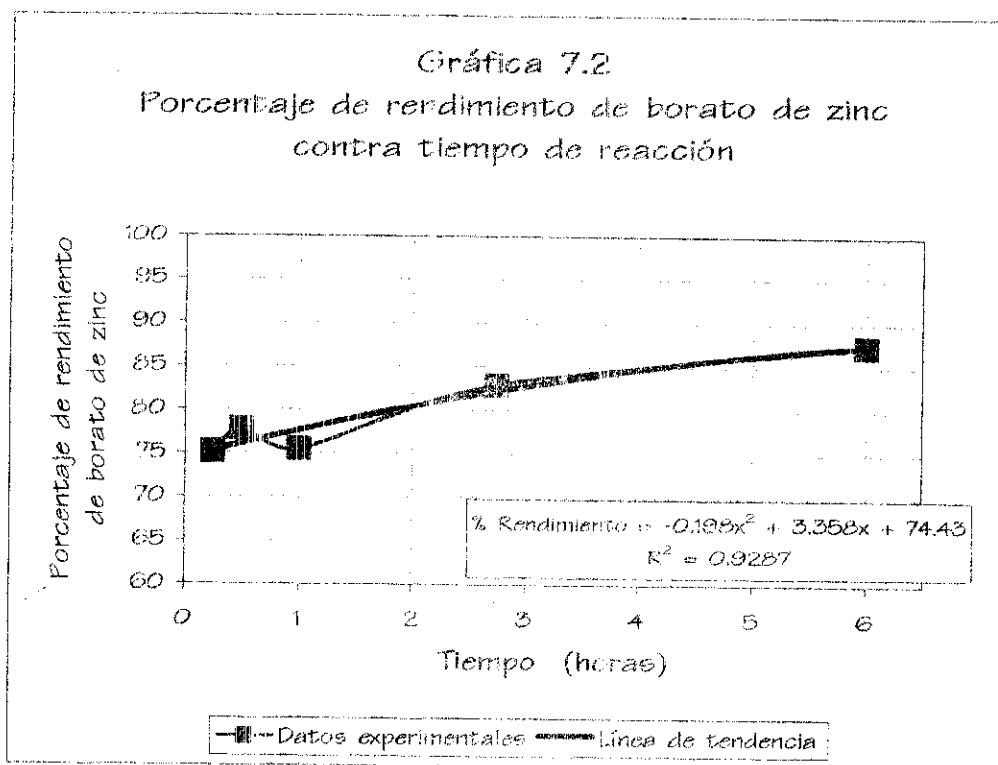
La Gráfica 7.1 muestra el comportamiento del porcentaje de rendimiento del producto obtenido respecto de la concentración de óxido bórico en el licor madre inicial, de lo que se tiene que el rendimiento aumenta al aumentar la concentración inicial.

2. Preparación de borato de zinc

Se evaluó la tecnología basada en la reacción entre el tetraborato de sodio y el sulfato de zinc, que tiene como referencia la U.S. Patent 3,649,172.

Tabla 7.2
Resultados obtenidos en la
evaluación de la tecnología para producir borato de zinc

No. de muestra	Masa de Borato de Zinc Producido ($\pm 0.0001g$)	Porcentaje de Rendimiento	Porcentaje de B_2O_3
1	5.6205	74.90 %	62.10 %
2	6.1576	82.06 %	62.00 %
3	5.1376	68.46 %	63.74 %
4	5.7084	76.07 %	61.70 %
5	5.9794	79.68 %	62.76 %
Promedio	5.7207	76.24 %	62.46 %
Desviación estándar	0.3899	5.20	0.81
Límite de confianza al 95 %	5.7207 ± 0.4840	76.24 ± 6.46	$62.46 \pm 1.01 \%$



La Gráfica 7.2 muestra el comportamiento del porcentaje de rendimiento del producto obtenido respecto del tiempo de reacción, de lo que se tiene que el rendimiento aumenta al aumentar el tiempo de reacción.

La Gráfica 7.2 muestra el comportamiento del porcentaje de rendimiento del producto obtenido respecto del tiempo de reacción, de lo que se tiene que el rendimiento aumenta al aumentar el tiempo de reacción.

3. Producción de tetraborato de sodio y borato de zinc simultáneamente

A partir de los resultados anteriores se propuso una tecnología que uniera tanto el proceso para obtener tetraborato de sodio y al mismo tiempo obtener borato de zinc.

Tabla 7.3
Resultados obtenidos en la tecnología propuesta para producir tetraborato de sodio y borato de zinc simultáneamente al usar agua como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ obtenida ($\pm 0.0001\text{g}$)	Porcentaje de rendimiento $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Porcentaje de B_2O_3 en $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Masa de ZnOB_2O_3 obtenida ($\pm 0.0001\text{g}$)	Porcentaje de rendimiento ZnOB_2O_3	Porcentaje de B_2O_3 en ZnOB_2O_3
1	4.3305	64.60 %	47.60%	3.4551	63.88 %	63.23%
2	3.4768	51.87 %	50.05%	3.6215	66.96 %	60.64%
3	3.8078	56.80 %	49.00%	3.5094	64.88 %	61.11%
4	3.0795	45.94 %	49.98%	3.8406	71.01 %	61.30%
5	3.1134	46.44 %	50.33%	3.3107	61.21 %	61.41%
6	3.0137	44.96 %	49.58%	3.2618	60.31 %	61.00%
Promedio	3.4709	51.77 %	49.42%	3.4998	65.59 %	61.45 %
Desviación estándar	0.5182	7.73	1.01	0.2123	3.67	0.91
Límite de confianza al 95 %	3.4709 ± 0.5439	51.77 ± 8.11	49.42 ± 1.06	3.4998 ± 0.2229	65.59 ± 3.85	61.45 ± 0.96

Tabla 7.4
Resultados obtenidos en la tecnología propuesta para producir
tetraborato de sodio y borato de zinc simultáneamente
al usar el licor final como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ obtenida ($\pm 0.0001\text{g}$)	Porcentaje de rendimiento $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Porcentaje de B_2O_3 en $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Masa de ZnOB_2O_3 obtenida ($\pm 0.0001\text{g}$)	Porcentaje De rendimiento ZnOB_2O_3	Porcentaje de B_2O_3 en ZnOB_2O_3
1	1.7445	26.02 %	47.80%	4.1834	77.34 %	62.50%
2	1.8350	27.37 %	48.41%	2.4199	44.74 %	62.13%
3	1.6245	24.23 %	47.61%	2.9078	53.76 %	64.16%
4	1.5911	23.74 %	47.74%	2.6431	48.87 %	61.30%
5	1.3949	20.81 %	49.29%	2.8080	51.92 %	57.74%
6	1.9065	28.44 %	48.97%	2.4799	45.85 %	62.78%
Promedio	1.6828	25.10 %	48.30%	2.9070	53.75 %	61.77
Desviación estándar	0.1853	2.76	0.70	0.6524	12.06	2.18
Límite de confianza al 95 %	1.6828 \pm 0.1945	25.10 \pm 2.90	48.30 \pm 0.74 %	2.9070 \pm 0.6848	53.75 \pm 12.66	61.77 \pm 2.29

B. DISEÑO DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE TETRABORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC

I. Diagrama de flujo del proceso

Con base en los procesos propuestos en la U.S. Patent 4,857,287 y la U.S. Patent 3,649,172, así como en los resultados que se obtuvieron de la experimentación, se propone una línea para la fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc que opera en forma continua. En general, el proceso se puede dividir en ocho etapas. La figura 7.1 es un diagrama básico del proceso donde se pueden apreciar cada una de sus etapas.

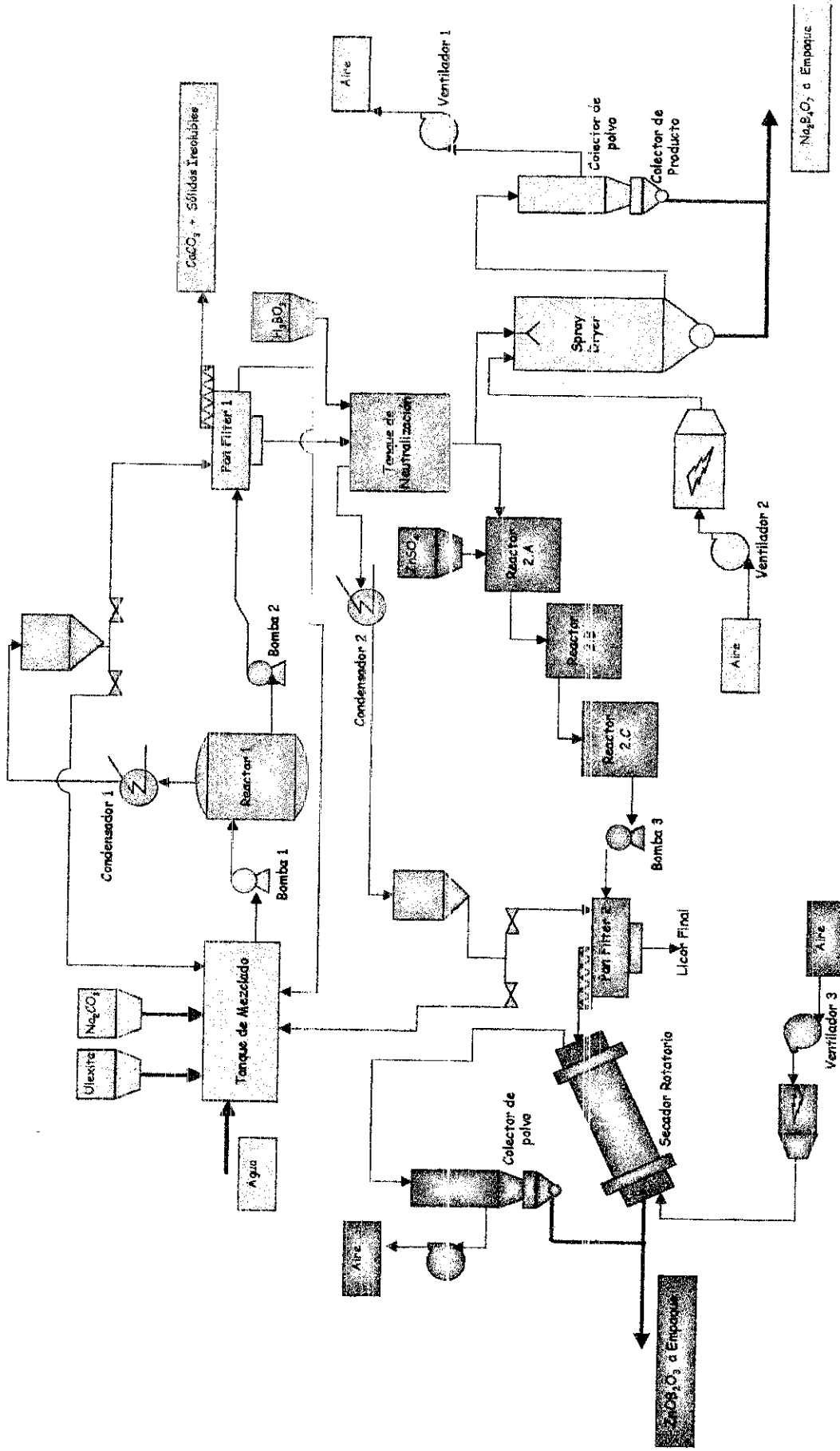


Figura 7.1 Diagrama de Flujo del Proceso de Fabricación de Tetraborato de Sodio y Borato de Zinc

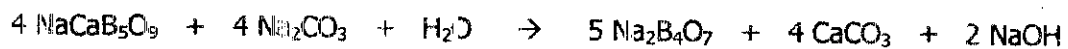
2. Descripción del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

1) Mezclado de las materias primas:

El agua se alimenta al tanque de mezclado donde se calienta a una temperatura de 95°C. Al mismo tiempo las materias primas, ulexita y carbonato de sodio, se agregan proporcionalmente en un período de media hora. Además se recirculan dos corrientes de agua a unos 80°C y el agua de lavado proveniente de la primera etapa de filtración.

2) Reacción para obtener tetraborato de sodio:

En esta etapa se deja reaccionar la materia prima durante una hora a una temperatura de 95°C. La reacción que se lleva a cabo se presenta por la siguiente ecuación:



A partir de la reacción se obtiene una suspensión que contiene tetraborato de sodio e hidróxido de sodio, el carbonato de calcio que se precipita y los sólidos insolubles propios de la ulexita.

Durante este tiempo se logra evaporar el 40% de agua que entra, con el fin de saturar la solución. El vapor de agua producido pasa por el condensador 1 en donde se convierte a su estado líquido nuevamente. Una parte del agua condensada se usa posteriormente para el lavado de los sólidos en la etapa de filtración y la otra parte se recircula a la alimentación en la etapa 1.

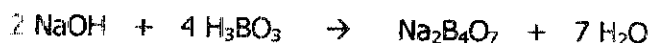
3) Separación del carbonato de calcio y sólidos insolubles:

En esta etapa se lleva a cabo la separación de los componentes sólidos de la suspensión, carbonato de sodio y material insoluble, por medio de un pan filter. Los sólidos antes de ser descartados se lavan con un 10% de agua proveniente del condensador 1 de la etapa 2, la cual se encuentra a 80°C. Esta agua de lavado se recircula a la etapa 1 y la

solución clarificada que contiene tetraborato de sodio e hidróxido de sodio pasa a la siguiente etapa.

4) Neutralización de la solución clarificada:

Durante el proceso de reacción de la etapa 2 se produce hidróxido de sodio, el cual es uno de los componentes de la solución clarificada. Este se convierte a tetraborato de sodio por medio de su neutralización con ácido bórico:



Además, se evapora un 40% de agua la cual pasa al condensador 2 y tiene un proceso similar que el agua evaporada en la etapa 2.

En este punto la corriente de licor de tetraborato de sodio se divide en dos. Una parte continúa a la etapa 8, en donde se sigue el proceso para obtener el tetraborato de sodio. La otra parte pasa a la etapa 5 para continuar con el proceso de obtención de borato de zinc.

5) Reacción para obtener borato de zinc:

La parte del licor que de tetraborato de sodio que sigue el proceso de fabricación de borato de zinc, pasa a una batería de tres reactores en cascada. En el primero de ellos se le agrega sulfato de zinc heptahidratado, el cual reacciona con el tetraborato de sodio y se logra la precipitación del borato de zinc. La reacción del proceso se representa de acuerdo a la siguiente ecuación:



El tiempo de reacción es de 6 horas, teniendo un tiempo de residencia de dos horas en cada uno de los reactores de la batería. La temperatura al inicio es de 95°C que aumenta hasta 103°C, que es su punto de ebullición, debido a la reacción exotérmica.

6) Separación de borato de zinc:

La suspensión obtenida en la etapa 5 se enfría mientras se transporta a otro pan filter, donde se separará el borato de zinc del licor final. El producto sólido se lava con un 10% de agua proveniente del condensador 2 de la etapa 4. El licor final se descarta.

7) Obtención de borato de zinc:

El producto sólido obtenido en la etapa anterior llevará en un transportador de tornillo hacia un secador rotatorio, en el cual se llevará a cabo la operación de secado que tiene un tiempo de retención de aproximadamente una hora. El flujo del material adentro del secador es en contracorriente al flujo de gas. El producto seco se traslada a su tolva de almacenamiento donde permanecerá por un tiempo adecuado antes de empaquetarlo, para que logre una homogenización adecuada.

8) Obtención de borato de sodio:

La parte del licor de tetraborato de sodio que se separa en la etapa 4 se alimenta a un spray dryer, en donde se evapora el agua y se cristaliza el tetraborato de sodio con el tamaño de partícula deseado. Luego el producto que es arrastrado por la corriente de gas pasa a una ciclón donde se lleva a cabo un proceso de separación de los sólidos. El producto seco se traslada a su tolva de almacenamiento donde permanecerá por un tiempo adecuado antes de empaquetar, para que se logre una homogenización adecuada.

C. BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE TETRABORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC

La figura 7.2 es un diagrama básico del balance de materia del proceso donde se pueden apreciar las corrientes que entran y salen en cada una de sus etapas. Los flujos másicos en kg/h de las corrientes, que están identificadas alfabéticamente se presentan en la Tabla 7.5.

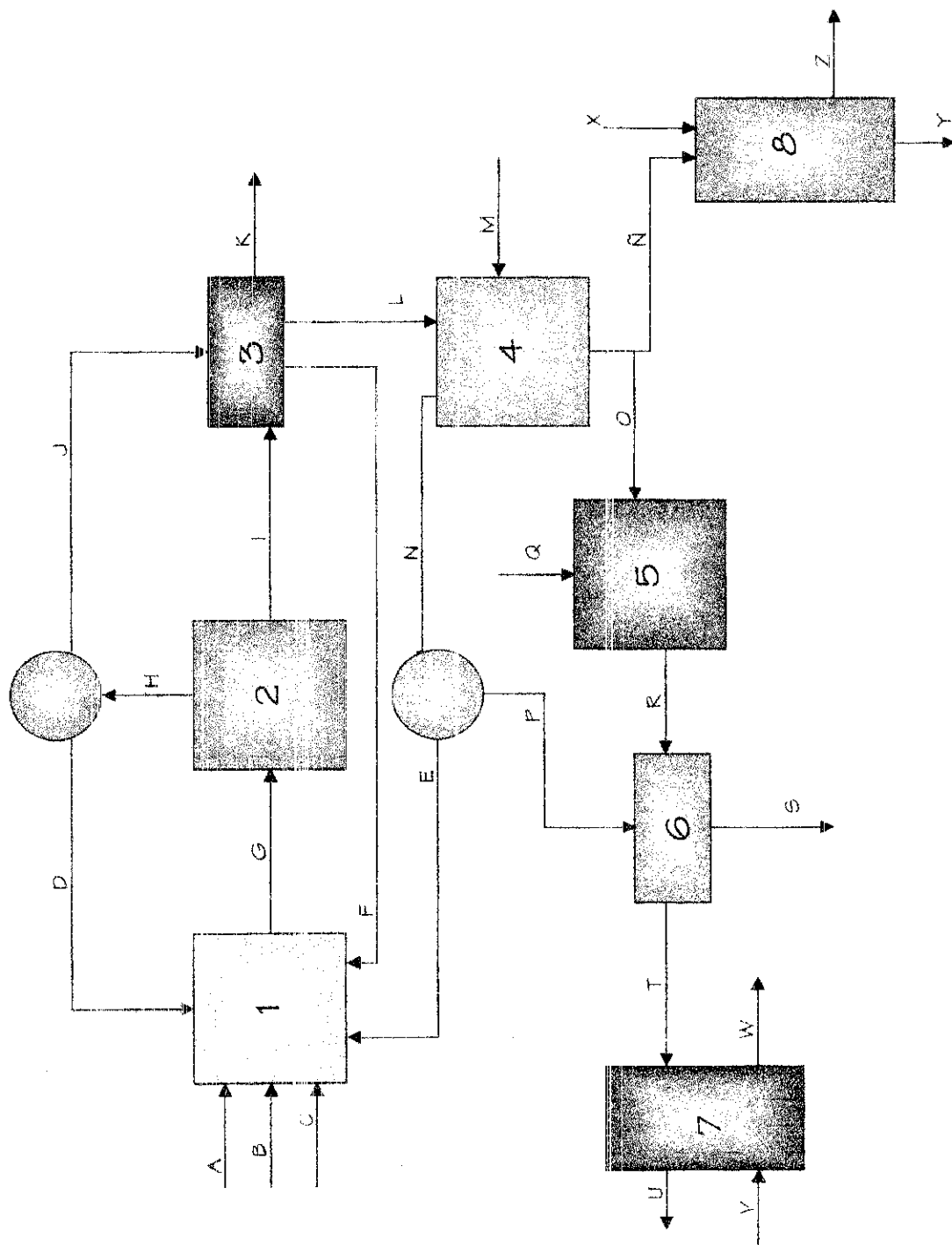


Figura 7.2 Diagrama del Balance de Materia del Proceso de Fabricación de Tetraborato de Sodio y Borato de Zinc

Tabla 7.5
Flujo másico de las corrientes del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

Corriente		Flujo Másico (tm/h)
A	Ulexite 40	2.79
B	Carbonato de sodio	0.73
C	Agua	8.53
D	Agua de recirculación 1	6.27
E	Agua de recirculación 2	3.15
F	Agua de lavado recirculada	1.52
G	Mezcla inicial	22.99
H	Agua evaporada 1	7.79
I	Suspensión de reacción 1	15.20
J	Agua de lavado 1	1.52
K	Residuo insoluble	3.57
L	Solución clarificada	11.63
M	Ácido bórico	0.43
N	Agua evaporada 2	3.90
Ñ	Licor de tetraborato de sodio 1	2.67
O	Licor de tetraborato de sodio 2	5.49
P	Agua de lavado 2	0.75
Q	Sulfato de zinc heptahidratado	2.00
R	Suspensión de reacción 2	7.49
S	Licor final	6.33
T	Sólidos de filtración	1.91
U	Borato de zinc seco	1.05
V	Gas de entrada secado 1	7.09
W	Gas de salida secado 1	7.94
X	Gas de entrada al spray dryer	9.06
Y	Tetraborato de sodio seco	0.68
Z	Gas de salida secado 2	11.04

D. BALANCE DE ENERGÍA DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE TETRABORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC

Tabla 7.6
Calor requerido para cada etapa del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

Etapa	Calor (kJ/h)
Mezclado de las materias primas	276634.52
Reacción para obtener tetraborato de sodio	129472.15
Neutralización de la solución clarificada	15102.60
Reacción para obtener borato de zinc	-44980.68
Obtención de borato de zinc	689175.16
Obtención de tetraborato de sodio	1060156.38

E. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO DE PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE TETRABORATO DE SODIO Y BORATO DE ZINC

En esta sección se indican las dimensiones necesarias del equipo involucrado en las etapas del proceso para fabricar tetraborato de sodio y borato de zinc. La figura 7.3 detalla las dimensiones de un tanque de proceso, con el fin de que se identifiquen los parámetros en las tablas posteriores.

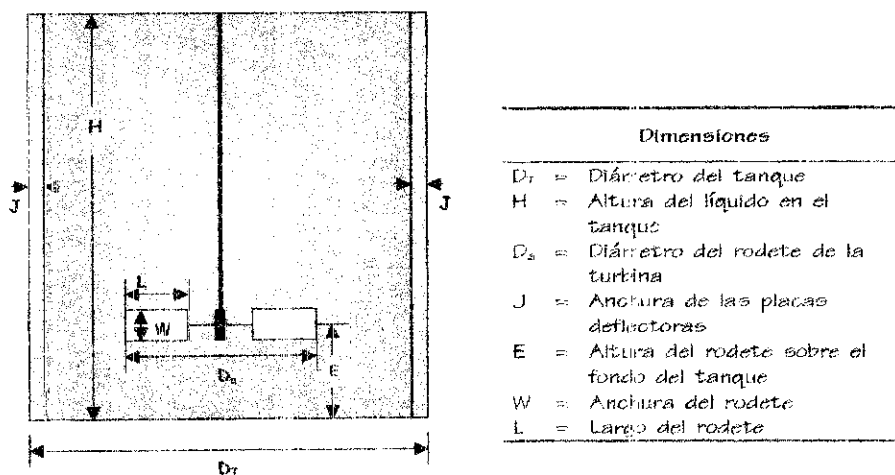


Figura 7.3 Diagrama de las dimensiones de los tanques del proceso

Tabla 7.7
Parámetros de operación y diseño de los tanques del
proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

Tanque	Carga de operación (tm/h)	Tiempo de residencia (h)	Capacidad del tanque (m ³)	Altura (m)	Diámetro (m)
Tanque de Mezclado	22.99	0.5	12.32	2.50	2.50
Reactor 1	22.99	1.0	24.63	3.15	3.15
Tanque de Neutralización	11.63	0.5	6.58	2.03	2.03
Reactor 2.A	7.49	2.0	14.38	2.64	2.64
Reactor 2.B	7.49	2.0	14.38	2.64	2.64
Reactor 2.C	7.49	2.0	14.38	2.64	2.64

Tabla 7.8
Parámetros de diseño de las turbinas de agitación para cada uno de
los tanques del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

	D _a (m)	J (m)	E (m)	W (m)	L (m)	Potencia	
						kW	hp
Tanque de Mezclado	0.83	0.21	0.83	0.17	0.21	4.48	6.01
Reactor 1	1.05	0.26	1.05	0.21	0.26	14.52	19.46
Tanque de Neutralización	0.68	0.17	0.68	0.14	0.17	6.41	8.60
Reactor 2.A	0.88	0.22	0.88	0.18	0.22	6.70	8.98
Reactor 2.B	0.88	0.22	0.88	0.18	0.22	6.70	8.98
Reactor 2.C	0.88	0.22	0.88	0.18	0.22	6.70	8.98

Tabla 7.9
Parámetros de diseño de los motorreductores para cada uno de los tanques del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

	Velocidad de salida (rpm)	Velocidad de entrada (rpm)	Eficiencia	P	
				kW	hP
Tanque de Mezclado	100	1800	0.86	2.48	3.32
Reactor 1	75	1200	0.86	2.08	2.79
Tanque de Neutralización	125	1800	0.86	2.71	3.64
Reactor 2.A	75	1200	0.86	2.08	2.79
Reactor 2.B	75	1200	0.86	2.08	2.79
Reactor 2.C	75	1200	0.86	2.08	2.79

Tabla 7.10
Parámetros de operación y diseño de los filtros del proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

	Pan filter 1	Pan Filter 2
Caída de presión, ΔP	50805 N/m ² (15 pulgHg)	50805 N/m ² (20 pulgHg)
Masa de sólidos depositada por unidad de volumen filtrado, C	141.6 Kg/m ³	49.83 Kg/m ³
Coefficiente de compresibilidad, s	0.6422	0.6422
Resistencia específica de la torta, α_0	$1.10 * 10^8$ m/Kg	$1.10 * 10^8$ m/Kg
Fracción del ciclo de filtrado para formación de la torta, f	1/3	1/3
Velocidad de giro, n	$1/30$ s ⁻¹	$1/30$ s ⁻¹
Velocidad de producción de sólidos, M_c	0.4583 Kg/s	0.1935 Kg/s
Área total de Filtrado, β_T	10.37 m ²	7.06 m ²
Diámetro del pan filter, $D_{Pan\ filter}$	3.75 m	3.13 m

Tabla 7.11
Parámetros de operación y diseño de las bombas del
proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

	Capacidad de operación (m ³ /h)	Cabeza total dinámica (m)	Eficiencia	Potencia Real	
				kW	hP
Bomba 1	20.53	32.00	65.0 %	3.08	4.14
Bomba 2	13.57	32.00	65.0 %	2.04	2.73
Bomba 3	5.99	32.00	65.0 %	1.00	1.35

Tabla 7.12
Parámetros de operación del secador rotatorio del
proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

Diámetro del secador, T_D	0.60 m
Longitud del secador, Z	2.40 m
Inclinación del secador, s	0.08 m/m
Velocidad rotacional, N	15.92 rpm (0.2653 rev/s)
Tiempo de retención, θ	1 hora

Tabla 7.13
Parámetros de diseño del spray dryer del
proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

Caída de presión, ΔP	$1.10 \cdot 10^7$ N/m
Diámetro de la gota, D_g	43.01 μ m
Tiempo de secado de la gota, t_s	5 s
Volumen de la cámara de secado, V_s	17.32 m ³
Longitud de la cámara de secado, L_s	4.45 m
Diámetro de la cámara de secado, D_s	2.22 m
Longitud del cono de salida del producto, Z_s	3.33 m
Diámetro de la salida del producto, J_s	0.56 m

Tabla 7.14
Parámetros de operación y diseño de los ventiladores del
proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc

	Capacidad de operación (m ³ /h)	Presión de operación (cm H ₂ O)	Eficiencia	Potencia Real	
				kW	hP
Ventilador 1	1075.31	25.40	65.0%	1.14	1.53
Ventilador 2	22400.25	15.24	65.0 %	14.28	19.16
Ventilador 3	7260.79	25.40	65.0 %	7.72	10.35
Ventilador 4	7544.8	25.40	65.0 %	8.02	10.75

VIII. DISCUSIÓN

El presente modelo profesional investigó la posibilidad de producir tetraborato de sodio y borato de zinc a partir de ulexita, proceso para el cual se diseñó una línea de producción.

Con base en la investigación de técnicas y procedimientos ya desarrollados (Ver referencias 12 y 15), se seleccionaron los métodos descritos anteriormente para producir dichos productos, y luego fueron evaluados experimentalmente en el laboratorio. Ahora se procederá a analizar, a partir de los resultados, las ventajas y desventajas que presenta cada uno para poder seleccionar los parámetros de diseño adecuados, adaptándolos lo mejor posible a las condiciones locales existentes. Es importante hacer notar que ambos procesos pueden ser modificados levemente y no se limitan exclusivamente a las opciones presentadas, siempre y cuando se conserven los fundamentos principales y la secuencia básica del proceso.

Generalmente, el tetraborato de sodio se prepara a partir de la neutralización del ácido bórico, que se obtiene por el tratamiento previo del mineral con ácido sulfúrico. Por lo tanto, una de las principales ventajas que presenta la tecnología seleccionada, es que se obtiene el tetraborato de sodio directamente del mineral sin tener que preparar ácido bórico como subproducto intermedio, lo que significa que el proceso tiene una mayor simplicidad, se requiere de menos equipo y por lo tanto se disminuyen los costos de operación.

Esta tecnología se desarrolló al utilizar colemanita como materia prima, el cual es un mineral de borato de calcio. Debido a que la materia prima del proceso, ulexita, es un borato doble de sodio y calcio la reacción puede adaptarse al lograr que al reaccionar con el carbonato de sodio se desplace el calcio que lo conforma, se precipite en forma de carbonato de calcio y formándose tetraborato de sodio en solución. Las condiciones de reacción están dadas por la estequiometría involucrada y de acuerdo a la bibliografía, no existe diferencia significativa en el aumento del porcentaje de rendimiento del tetraborato de sodio, por lo que estos parámetros no fueron estudiados. Otra condición de operación que se estableció a partir de la literatura fue la temperatura, ya que al trabajar en el rango de 90 a 95 °C, el producto que se obtiene al final del proceso presentará la hidratación deseada, y es en este caso tetraborato de sodio monohidratado y su forma anhidra.

Los resultados que se obtuvieron para la evaluación del método se presentan en la tabla 7.1. A partir de estos, se puede afirmar que es posible aplicar la tecnología a la ulexita ya que presenta porcentajes de rendimiento respecto del tetraborato de sodio teórico que se debía obtener entre un 20 y 85 %. Este rango es bastante amplio y a partir de este hecho se determina que el rendimiento mejora en función del incremento de la concentración de B_2O_3 del licor madre inicial, tal y como puede observarse en la gráfica 7.1. Esto es razonable, ya que para que en un proceso de cristalización el licor madre y los cristales alcancen el equilibrio, el licor se debe encontrar lo más saturado posible a la temperatura final del proceso. Por lo tanto, este es uno de los parámetros de importancia que se deben tomar muy en cuenta para el diseño del proceso.

La tecnología seleccionada para la fabricación de borato de zinc, se basa en la reacción entre un borato alcalino y una sal de zinc. Ya que es un objetivo del presente trabajo, así como de la Empresa "Sales, Ácidos y Solventes, S.A.", se escogió el tetraborato de sodio como el borato alcalino presente en la reacción. Además, la sal de zinc seleccionada es sulfato de zinc, ya que esta empresa posee una línea de producción de la misma. Lo anterior permitirá la fácil disponibilidad de las materias primas para el proceso y disminuirá los costos de obtención de las mismas. Al igual que para la tecnología para la fabricación del tetraborato de sodio, las condiciones de reacción están dadas de acuerdo a la estequiometría involucrada en este proceso.

Los resultados que se obtuvieron para la evaluación de este método se presentan en la tabla 7.2. A partir de estos, se puede afirmar que es posible aplicar la tecnología a las materias primas propuestas, ya que presenta un porcentaje de rendimiento, respecto del borato de zinc teórico que se debía obtener, alrededor de un 77%. Sin embargo, al observar la gráfica 7.2 se tiene que al aumentar el tiempo de reacción aumenta el porcentaje de rendimiento, lo cual coincide con los resultados esperados de acuerdo a la literatura consultada. Así, para un tiempo de reacción de 6 horas, el porcentaje de rendimiento aumentó hasta un 88%. Por lo tanto, se puede mejorar el rendimiento si se aumenta el tiempo de residencia para la reacción, y este mismo aumento compensará los costos de operación.

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron en la evaluación de los métodos por separado, se estableció el diseño de una tecnología a partir de la cual se pueden obtener los

dos productos simultáneamente, con el fin de reducir las operaciones unitarias involucradas para su fabricación por separado. Solamente se analizó el proceso cuando la concentración de B_2O_3 en el licor madre inicial fue cero y para la primera recirculación del licor final.

Según los resultados que se presentan en la tabla 7.3 se puede observar que el rendimiento de tetraborato de sodio aumentó de un 29 a un 52 % cuando la concentración de B_2O_3 en el licor madre es cero. Por lo tanto, se hace notar que para obtener mejores rendimientos lo importante es saturar el licor, lo cual se logra por medio de la concentración de las suspensiones durante la etapa de reacción entre la ulexita y el carbonato de sodio, así como en la etapa de neutralización del licor filtrado. En cambio, se tiene que el rendimiento de borato de zinc disminuyó de un 77 a un 66%, cuando el tiempo de reacción fue de 30 minutos, por lo que para el diseño del proceso se considera un mayor tiempo de residencia para que se lleve a cabo la reacción con el fin de aumentar el rendimiento.

Sin embargo, los resultados que se obtuvieron para el proceso con recirculación del licor final y que se presentan en la tabla 7.4 muestran una disminución marcada en los rendimientos de ambos productos, pero sobre todo para el rendimiento del tetraborato de sodio que disminuyó en un 50%. Esto puede deberse a que los otros productos de la reacción para producir borato de zinc, ácido bórico y sulfato de sodio, interfieren en las reacciones involucradas en el proceso. Por lo tanto no es recomendable recircular el licor final a la etapa inicial del proceso.

En cuanto a la caracterización de los productos en forma de porcentaje de óxido bórico, se tiene que el tetraborato de sodio posee alrededor de un 50% y el borato de zinc alrededor de un 60%, los cuales caen en el rango normal que presentan estos compuestos en productos comerciales.

Al tomar como base los resultados anteriores se propone una línea de fabricación simultánea de tetraborato de sodio y borato de zinc que opera de manera continua.

Antes de esto, es necesario resaltar que lo que se presenta a continuación es solamente una aproximación basada en el escalamiento de los resultados experimentales. Sin embargo, es importante hacer énfasis en que este tipo de escalamiento no es el más apropiado para poner en marcha de forma directa el proceso a nivel industrial, ya que pueden

surgir problemas inesperados y que no han sido considerados a nivel laboratorio, siendo uno de los casos más sencillos las impurezas que puede presentar el agua de proceso.

De todas formas, el éxito de la puesta en marcha de la línea a nivel industrial se basa desde las primeras pruebas experimentales y el escalamiento más pequeño, por lo que lo que se expone en este trabajo cobra gran importancia y significa el primer paso para la determinación de las dimensiones críticas y tamaños relativos del equipo que se utilizará para el desarrollo del proceso.

Por lo tanto, se recomienda que antes de llevar a cabo el proceso a nivel industrial se realice una serie de escalamientos a nivel planta piloto, por medio de los cuales se logre recopilar la información adecuada que solucione los posibles problemas que se presenten durante las pruebas y se logre de esta manera mejorar los rendimientos de ambos productos.

Debido a que la Empresa "Sales, Ácidos y Solventes, S.A." tiene como propósito cubrir tanto las necesidades de estos productos del mercado guatemalteco, así como cubrir una parte del mercado centroamericano, el diseño de la línea se ha optado por un tamaño nominal de 200 tm/mes de borato de zinc y 100 tm/mes de borato de sodio. Se ha asumido un mes laboral de 24 días y 12 horas diarias de trabajo, por lo que la capacidad nominal equivale a 1.04 tm/h de producto terminado.

En general el proceso se divide en ocho etapas. La primera consiste en mezclar las materias primas para producir tetraborato de sodio y calentar la mezcla hasta 95°C. La segunda es la reacción para obtener una solución de tetraborato de sodio e hidróxido de sodio, y precipitar el carbonato de calcio; aquí deben controlarse cuidadosamente las condiciones de reacción, especialmente la temperatura, agitación, el porcentaje de agua evaporada y el tiempo de residencia, para lograr la saturación de la solución que permitirá la obtención posterior de cristales de sodio de tamaño y características adecuadas. La tercera etapa consiste en la separación mecánica del carbonato de calcio de la solución clarificada, que es la que interesa para continuar el proceso. En la cuarta etapa, se lleva a cabo la neutralización del hidróxido de sodio con ácido bórico, aumentando el rendimiento de tetraborato de sodio. Además en esta etapa se divide el licor de tetraborato de sodio en dos corrientes, una para continuar con el proceso de fabricación del tetraborato de sodio y la otra para continuar con el proceso de fabricación de borato de zinc. En la etapa cinco, se lleva a cabo la reacción del

tetraborato de sodio con el sulfato de zinc, para obtener la formación de borato de zinc como precipitado; en esta etapa también se debe tener cuidado con el control de las condiciones de operación, como lo son la temperatura, agitación y sobre todo el tiempo de residencia para lograr los mejores rendimientos. En la sexta etapa, se separa el borato de zinc para luego ser llevado a la etapa siete, en la cual pasa por un proceso de secado y por último se transporta hasta el área de empaque del producto final. Simultáneamente, se lleva a cabo la etapa ocho, en la cual se cristaliza y seca el tetraborato de sodio, para luego transportarlo hasta el área de empaque del producto final.

La figura 7.1 es un diagrama básico del proceso donde se pueden observar claramente todas las etapas del proceso. En el diagrama no se incluyen todos los equipos auxiliares, tales como válvulas, reguladores de flujo, motores de agitadores, etc. pero se discutirán con un poco de detalle más adelante. La figura 7.2 presenta un balance de materia del proceso, en este se incluyen todas las corrientes involucradas, las cuales identificadas alfabéticamente y el flujo másico correspondiente a cada una de ellas se presentan en la tabla 7.5. Además, en la tabla 7.6 se presentan los requerimientos de energía para cada una de las etapas principales del proceso. En este trabajo no se ha considerado el estudio cinético químico de las reacciones involucradas, ya que queda fuera de los propósitos del mismo.

A lo largo del proceso se requiere de un total de seis tanques. El tanque de mezclado, el cual se usa para incorporar la ulexita y el carbonato de sodio al agua. El reactor 1, en donde se lleva a cabo la reacción para formar tetraborato de sodio. El tanque de neutralización, en donde se lleva a cabo la neutralización del hidróxido de sodio. Y por último, se cuenta con una batería de reactores en cascada, en los cuales se llevará a cabo la reacción para formar el borato de zinc. Estos tanques deben ser construidos de un material que sea resistente a la corrosión debido al contacto directo con la solución. Entre los materiales que se pueden recomendar están el acero al carbono, el acero inoxidable, el teflón y resinas epóxicas. Debido a las facilidades que ofrece un taller que trabaja fibra de vidrio dentro de la empresa, una muy buena opción resulta utilizar éste como material de construcción recubriéndolo de una resina epóxica, con lo que se obtendría una buena resistencia mecánica y disminuirían los costos en la construcción del equipo.

La capacidad de los tanques depende básicamente del flujo másico que reciben y del tiempo de residencia. En el tanque de mezclado el tiempo de residencia es de media hora,

con lo cual se busca obtener una buena mezcla lo suficientemente homogénea, así como lograr su calentamiento hasta 95°C. En el reactor 1, el tiempo de residencia es de una hora, con el fin de que la reacción se complete y la suspensión se concentre lo más que se pueda para evaporar alrededor de un 40% de agua. En el tanque de neutralización se tiene un tiempo de residencia de media hora. En la batería de reactores el tiempo total de residencia es de seis horas, ya que es el tiempo óptimo de reacción. La batería está conformada por tres reactores, dos horas de tiempo de residencia en cada reactor. Esto se ha dispuesto así, ya que se logra disminuir la capacidad que se necesitaría al usar un solo tanque y por lo tanto, el espacio físico que requeriría se disminuye, así como los costos de construcción y de operación. Los tiempos de residencia en los reactores pueden disminuirse por medio del uso de un catalizador adecuado, que puede ser en este caso el óxido de zinc.

En la tabla 7.7 se presentan las dimensiones para cada uno de estos tanques. La capacidad de operación de los tanques se ha estimado en un 20% mayor que la carga que recibe. Esto se hizo con el propósito de tener un margen de seguridad, así como la posibilidad de un aumento futuro en la capacidad de la línea. Según los modelos matemáticos, el área superficial más pequeña, o sea la menor cantidad de material para su construcción, se obtiene cuando las dimensiones del tanque se definen como el diámetro dos veces la altura. Sin embargo, para obtener una buena agitación, la altura del líquido debe ser similar al diámetro del tanque ($H = D$). Por lo tanto, las dimensiones que se presentan constituyen la segunda opción. Por supuesto que los tanques se pueden construir con otras medidas, si las circunstancias lo requieren.

Los tanques deben tener agitación para obtener una buena mezcla de los componentes y evitar de esta forma que las partículas suspendidas se asienten. Se recomienda usar en cada uno de los tanques turbinas de cuatro o seis aspas. Para el diseño se han seguido los parámetros establecidos por las proporciones típicas de una turbina estándar. En base a los datos presentados en la tabla 7.8, se recomienda la instalación de un motor de 20 hp para el reactor 1; un motor de 10 hp para el tanque de neutralización y cada uno de los tanques de la batería de reacción 2; y para el tanque de mezcla un motor de 8 ó 10 hp. Además, para poder generar las velocidades de entrada que se requieren para cada uno de los casos se deberán instalarse motorreductores que cumplan con los parámetros de la tabla 7.9, para lo que se recomienda la instalación de un motorreductor de 4 hp para el tanque de mezclado y el tanque de neutralización y uno de 3hp para los cuatro reactores.

En el proceso también es necesario contemplar al menos dos equipos de separación de mecánica. Uno para la etapa de separación de carbonato de calcio y material insoluble, y el otro para la etapa de separación de borato de zinc. El tamaño de partícula a retener, oscila entre unos 10 y 100 micrones, por lo que se recomienda trabajar con filtros de malla, ya sea metálica, de tela o plástica resistentes a temperaturas un poco superiores a 80°C. Existen varias opciones de filtros; los principales factores a considerar en la elección del tipo adecuado son el material de construcción, la facilidad de limpieza y capacidad. El material de construcción debe ser altamente resistente a la corrosión como ya se mencionó anteriormente. De los principales tipos de filtros se pueden mencionar el filtro de platos horizontales, el filtro tubular, el filtro de hojas presurizado, aunque estos presentan como una gran desventaja que la remoción de la torta es complicada y esto retrasa el proceso. Una opción que se puede tomar como atractiva sería la de colocar filtros prensa, ya que estos son económicos y de fácil mantenimiento. Sin embargo, fácilmente se tapa el área de filtración y cada vez que esto pase se tendría que abrir para retirar el material sólido implicando que el proceso se retrase. Se podría pensar en solucionar este problema poniendo un segundo filtro, de manera de desviar la corriente al otro para llevar a cabo la remoción del material del otro, pero esto solamente aumentaría los costos de inversión inicial, los costos de operación y de mantenimiento, por lo que se prefirió seleccionar pan filter para cada una de las etapas mencionadas.

La torta húmeda de borato de zinc que se retira del segundo pan filter debe secarse para eliminar la mayor parte del agua presente en el producto. De acuerdo a las características que presenta esta torta húmeda de producto, una buena opción para trasladarla hacia el secador será el uso de un transportador de tornillo. Durante el proceso de secado, la cantidad de agua se reduce desde un 45% hasta alrededor de un 1 % preferiblemente. Para esta etapa, de los diferentes tipos de secadores se seleccionó uno de contacto directo. No se recomienda usar el secador rotatorio con el que cuenta la empresa, ya que es demasiado grande y no se adecua a los fines del proceso, lo cual implicaría que los costos de operación se incrementen, y se vuelva antieconómica la operación. Es por esta razón, que en la tabla 7.12 se presentan los parámetros de diseño para un secador mejor adaptado.

En este tipo de secadores lo importante es que la temperatura de los gases se mantenga constante y el aire de secado se puede calentar ya sea por medio de una resistencia eléctrica, por la combustión de hidrocarburos o por medio de un intercambiador de calor de superficie ampliada o de placas por donde fluye vapor saturado. Por lo tanto, por el rango de

temperaturas que se maneja y se debe aprovechar que el producto no es termosensible, así como por el contenido de humedad alto del producto que entra se ha seleccionado utilizar diesel como combustible y de esta manera obtener una mezcla de aire y gases de combustión como gas secante. Los gases entran al secador a una temperatura de al menos 400°C. Esta temperatura puede ser un poco más alta, ya que el producto no es termosensible, pero para ésto se recomienda realizar pruebas experimentales, así como también para determinar el tiempo de residencia dentro del secador. Para aumentar la eficiencia de secado el proceso se realiza en contracorriente.

Para la etapa de obtención de tetraborato de sodio se tienen las mismas opciones de secadores que para el borato de zinc. Sin embargo, se seleccionó un spray dryer, ya que al mismo tiempo que se cristaliza el producto se lleva a cabo la evaporación del agua, lo que implica una operación unitaria menos. Entre las ventajas que presenta se tiene que de acuerdo a las propiedades del licor de tetraborato de sodio que se alimenta y el tamaño deseado de partícula, el spray dryer con atomizadoras a presión es el equipo recomendado. Además la versatilidad del equipo, su fácil control y operación, así como los costos de operación y la inversión de capital mucho menor que la requerida para otros equipos, hacen interesante esta alternativa. Este equipo operará en flujo paralelo, ya que de esta manera se manejan temperaturas menores dentro de la cámara de secado, lo cual favorece para disminuir el costo del aislante térmico necesario para el recubrimiento de la cámara y alarga la vida útil del material de construcción de la cámara.

Para el transporte de las soluciones involucradas en el proceso se deben instalar bombas en lugares estratégicos, como lo son las descargas del tanque de mezclado, del reactor 1 y del último reactor de la batería. Las bombas centrífugas son una opción económica y confiable, aunque por el hecho de que las corrientes poseen sólidos suspendidos, se debe modificar el rodete de las mismas. La potencia de los motores para las bombas se presentan en la tabla 7.10, estos valores deberán redondearse a la unidad inmediata superior. Por lo tanto, la bomba 1 deberá tener un motor de 5 hp, mientras que las bombas 2 y 3 deberán tener uno de 3 hp y 2 hp respectivamente.

También se debe mencionar que los flujos se pueden regular por medio del uso de válvulas y por el diámetro de la tubería. El proceso requiere de un cuidadoso control de las corrientes. Para el control del flujo de las materias primas, se tiene en el mercado una gran

variedad de dosificadores controlados manualmente o automáticamente. El fabricante puede recomendar el tipo y tamaño más adecuado según las necesidades descritas anteriormente. Para las corrientes de entrada y salida de cada una de las etapas se recomienda instalar medidores de flujo, y así tener un buen control de las mismas.

IX. CONCLUSIONES

1. Se puede producir tetraborato de sodio y borato de zinc a partir de ulexita.
2. A mayor concentración de B_2O_3 del licor inicial en la etapa de mezclado de materias primas, se logra aumentar el rendimiento de producción de tetraborato de sodio.
3. El rendimiento de producción de borato de zinc aumenta con el tiempo de reacción, por lo que se recomienda para esta etapa un tiempo de residencia de 6 horas.
4. El diseño de la línea de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc que se presenta es solamente una aproximación basada en el escalamiento de los resultados experimentales a nivel laboratorio.
5. La empresa "Sales, Ácidos y Solventes, S.A." considera, dentro de sus posibilidades tecnológicas, implementar este proceso, aprovechando los equipos disponibles.
6. Una buena parte del equipo principal puede ser fabricado localmente en fibra de vidrio, con lo que se reducirá la inversión inicial.

X. RECOMENDACIONES

1. Ya que el escalamiento realizado no es el apropiado en su totalidad para llevar a cabo el proyecto a una escala industrial, se recomienda realizar estudios sobre varios escalamientos a nivel planta piloto para recopilar la información adecuada que permita una mejor optimización del proceso.
2. Experimentar el proceso utilizando el sulfato de zinc en solución, ya que esto evitaría un mayor costo de operación para la empresa.
3. Experimentar recircular el licor final a la etapa de neutralización, ya que este posee un buen contenido de ácido bórico con lo que se podría utilizar para la neutralización del hidróxido de sodio y se disminuirían los costos de obtención de la materia prima.
4. Investigar la factibilidad del uso de un catalizador adecuado en la etapa de reacción de borato de zinc, con lo cual se puede disminuir el tiempo de reacción reduciéndose de esta forma los costos de operación.
5. Investigar y evaluar la posibilidad de obtener carbonato de calcio para utilizarlo como agregado en construcción.
6. Investigar la posibilidad de incorporar una etapa en la que se cristalice el ácido bórico y se aproveche como subproducto del proceso.
7. Realizar un estudio cinético químico de las reacciones involucradas en el proceso, para determinar su influencia en el diseño de los reactores.
8. Realizar una evaluación económica sobre el montaje de la línea, de tal manera que permita determinar la factibilidad de la misma.
9. Es conveniente realizar un estudio de mercado completo para tener bases concretas que permitan tomar las decisiones adecuadas respecto de los planes de producción y estrategias de ventas.
10. Realizar un estudio de impacto ambiental, que permita determinar cuales son los aspectos ecológicos más importantes que se deben considerar.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Bisio, A., y R. Kabel. 1985. Scaleup of chemical processes: conversion from laboratory scale test to successful commercial size design. John Wiley & Sons, Inc. USA.
2. Eastes, W. 1979. Method for producing calcium borates. U.S. Patent 4,233,051. Ohio, USA.
3. Eastes, W., y A. Tarantino. 1980. Method for producing calcium borates. U.S. Patent 4,270,944. Ohio, USA.
4. Gould, R. 1961. Borax to Boranes. American Chemical Society Applied Publications. USA.
5. INKABOR. Especificaciones de la ulexita.
6. J.T. Baker, Inc. Sodium borate specifications.
7. Kirk, R. y D. Othmer. 1964. Enciclopedia de Tecnología Química. Volumen 3. Unión Tipográfica Editorial Hispanoamericana. México.
8. Kolthoff, I. y E. Phillip. 1978. Treatise on Analytical Chemistry. Part II, volume 10. John Wiley & Sons. USA.
9. Lydya, P. 1997. Mineralogy Yearbook: Boron.
10. Lydya, P. 1998. Mineralogy Yearbook: Boron.
11. Lydya, P. 2000. Boron. U.S. Geological Survey, Mineral Commodities Summaries, February.
12. Mazzinghi, P. 1987. Method for producing sodium tetraborate pentahydrate. U.S. Patent 4,857,286. Milán, Italia.

13. McCabe, W., et. al. 1991. Operaciones Básicas de Ingeniería Química. McGraw-Hill. 4ta. Edición. España.
14. Merck & CO, Inc. 1983. The Merck Index. 10th edition. Rahway, N.J. USA.
15. Nies, N., y R. Hulbert. 1972. Zinc borate of low hydration and method for preparing same. U.S. Patent 3,649,172. California, USA.
16. Pepi, M. 1992. Process for disaggregating boronatrocalcite ore in an alkaline medium for the production of sodium borate and calcium borate. U.S. Patent 5,268,154. Savigliana Vinci, Italia.
17. Perry, R., et. al. 1984. Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill. 6th edition. USA.
18. Peters, M., y K. Timmerhaus. 1980. Plant design and economics for chemical engineers. 3rd edition. McGraw-Hill Book Company. USA.
19. Polendo, J. 1987. Process to beneficiate colemanite and/or howlite minerals. U.S. Patent 4,756,745. Monterrey, México.
20. Rodgers, G. 1995. Química Inorgánica. McGraw-Hill. España.
21. Thorpe, J., y M. Whitley. Thorpe's Dictionary of Applied Chemistry. 4ta. Edición. Volumen 2. LONGMANS. USA.
22. Treybal, R. 1988. Operaciones de Transferencia de Masa. McGraw-Hill. 2^a edición. México.
23. United States Borax & Chemical Corporation. 1979. Firebreak® ZB specifications.

ANEXOS

ANEXO A

DATOS DE REFERENCIA

Tabla A.1
Composición química del Ulexite 40

* Óxido bórico (B_2O_3)	40.04 %
* Óxido de calcio (CaO)	13.04 %
* Óxido de sodio (Na_2O)	12.48 %
* Óxido de potasio (K_2O)	1.62 %
* Óxido de magnesio (MgO)	1.26 %
* Óxido de hierro (Fe_2O_3)	0.41 %
* Óxido de silicio (SiO_2)	11.40 %
* Cloruros (Cl)	4.06 %
* Sulfatos (SO_4)	5.05 %
* Pérdidas por calcinación a 900°C	15.01 %

Tabla A.2
Pesos moleculares de los reactivos y productos

* Ulexite 40 ($NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$)	405.2410 g/mol
* Ulexita ($NaCaB_5O_9$)	261.1194 g/mol
* Carbonato de sodio (Na_2CO_3)	105.9890 g/mol
* Ácido bórico (H_3BO_3)	61.8329 g/mol
* Tetraborato de sodio ($Na_2B_4O_7$)	201.2194 g/mol
* Carbonato de calcio ($CaCO_3$)	100.0894 g/mol
* Hidróxido de sodio ($NaOH$)	39.9971 g/mol
* Sulfato de zinc heptahidratado ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)	287.5480 g/mol
* Borato de zinc ($ZnOB_2O_3$)	155.9996 g/mol
* Sulfato de sodio (Na_2SO_4)	142.0412 g/mol
* Agua (H_2O)	18.0152 g/mol

Tabla A.3
Datos termodinámicos de los reactivos y productos

Compuesto	Calor específico KJ/tm °C	Entalpía de formación a 25°C KJ/gmol
* Ulexite 40 ($\text{NaCaB}_5\text{O}_{13} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)	1357.22	0
* Carbonato de sodio (Na_2CO_3)	603.32	-1127.42
* Ácido bórico (H_3BO_3)	1392.47	-1087.40
* Tetraborato de sodio ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)	993.94	-3291.10
* Carbonato de calcio (CaCO_3)	834.25	-1211.27
* Hidróxido de sodio (NaOH)	1487.61	-469.60
* Sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	344.99	-982.80
* Borato de zinc (ZnOB_2O_3)	764.76	-3291.10
* Sulfato de sodio (Na_2SO_4)	902.56	-1387.10
* Agua (H_2O)	4187	-285.84

Tabla A.4
**Capacidades caloríficas promedio de los componentes de
los gases de combustión a diferentes rangos de temperatura**

Rango de temperatura	Cp Promedio KJ/kmol °C			
	Oxígeno (O_2)	Dióxido de carbono (CO_2)	Agua (H_2O)	Nitrógeno (N_2)
400°C - 25°C	31.80	45.36	36.02	29.23
400°C - 0°C	31.60	45.03	35.94	29.18
60°C - 0°C	26.38	37.84	35.10	28.46
600°C - 25°C	32.71	47.09	36.51	29.54
600°C - 0°C	32.83	47.34	36.59	29.59
70°C - 0°C	26.82	38.38	35.13	28.50

ANEXO B

FASE EXPERIMENTAL

1. Preparación de borato de sodio

a. Evaluación a nivel experimental de la tecnología

Se evaluó la tecnología para obtener tetraborato de sodio a partir de la ulexita, que tiene como referencia el proceso descrito en la U.S. Patent 4,857,286 desarrollado para colemanita. Con base en este método se hicieron las modificaciones necesarias para adaptarlo a la ulexita.

Para la evaluación del método se utilizaron 2 baterías:

- La concentración inicial del licor de la muestra No.1 de la batería 1 fue de 165.00 g B_2O_3 / Kg de solución y a partir del licor final se repitió el procedimiento para las siguientes muestras.
- La concentración inicial del licor de la muestra No.1 de la batería 2 fue de 0.00 g B_2O_3 / Kg de solución (solamente agua como disolvente) y a partir del licor final se repitió el procedimiento para las siguientes muestras.

Tabla B.1
Determinación de la concentración del licor final

	No. de muestra	Masa de solución (± 0.05 g)	Volumen de NaOH 0.9790 N utilizado (± 0.05 mL)	Concentración del licor final (g B_2O_3 / Kg solución)
Batería 1	1	5.2	9.1	59.73
	2	4.9	5.8	40.40
	3	5.1	5.4	36.14
	4	5.7	5.5	32.93
	5	5.2	4.6	30.19
Batería 2	1	5.2	3.6	23.63
	2	5.5	5.9	36.61
	3	5.4	5.9	37.29
	4	5.4	6.5	41.08
	5	5.6	6.3	38.40

➤ *Cálculo de la concentración del licor final*

Para calcular la concentración del licor final se tiene la siguiente relación:

$$\frac{\text{mL de NaOH 0.9790N usados}}{\text{Kg de solución}} = \frac{0.03413 \text{ g B}_2\text{O}_3}{1 \text{ mL NaOH 0.9790N}} = \frac{\text{g B}_2\text{O}_3}{\text{Kg de solución}}$$

Entonces para la muestra No. 1 de la batería 1 se tiene:

$$\frac{9.1 \text{ mL de NaOH 0.9790N} * 0.03413 \text{ g B}_2\text{O}_3}{5.2 * 10^{-3} \text{ Kg de solución}} = \frac{59.73 \text{ g B}_2\text{O}_3}{\text{Kg de solución}}$$

Tabla B.2
Determinación del porcentaje de sólidos insolubles y carbonato de calcio eliminados en la filtración

	No. de muestra	Masa de CaCO ₃ + sólidos insolubles (± 0.0001 g)	Porcentaje de material insoluble
Batería 1	1	18.7921	13.05 %
	2	4.5650	4.56 %
	3	4.8703	3.38 %
	4	4.5007	3.12 %
	5	4.8146	3.34 %
Batería 2	1	4.4578	3.10 %
	2	5.5607	3.86 %
	3	5.6436	3.92 %
	4	5.0734	3.52 %
	5	6.9967	4.86 %

➤ *Cálculo del porcentaje del material insoluble:*

El porcentaje de material insoluble está dado por:

$$\% \text{ Material Insoluble} = \frac{\text{g CaCO}_3 + \text{sólidos insolubles}}{\text{g totales de mezcla}} * 100$$

Quando se trabaja con 10 gramos de ulexita calcinada, se tiene que los gramos totales de mezcla son:

$$\begin{array}{r} 10 \text{ g Ulexita} \\ 4 \text{ g de Na}_2\text{CO}_3 \\ + 130 \text{ g de solución} \\ \hline 144 \text{ g de mezcla} \end{array}$$

Así, para la muestra No. 1 de la batería 1 se tiene:

$$\% \text{ Material Insoluble} = \frac{18.7921 \text{ g CaCO}_3 + \text{sólidos insolubles}}{144 \text{ g totales de mezcla}} * 100 = 13.05 \%$$

Tabla B.3
Determinación del porcentaje de rendimiento de tetraborato de sodio producido

	No. de muestra	Masa de Na ₂ B ₄ O ₇ obtenida (± 0.0001 g)	Porcentaje de Rendimiento
Batería 1	1 ⁴	4.8479	41.94 %
	2	10.1935	88.16 %
	3	9.8199	84.95 %
	4	9.2570	80.08 %
	5	7.9640	68.90 %
Batería 2	1	3.4899	30.19 %
	2	2.5856	19.77 %
	3	7.1985	62.28 %
	4	9.2930	80.39 %
	5	9.0655	78.43 %

➤ *Cálculo del porcentaje de rendimiento:*

El porcentaje de rendimiento se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ obtenidos}}{\text{g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ que se deben obtener}} * 100$$

Siguiendo la estequiometría de las reacciones involucradas, se concluye que para 10g de ulexita calcinada se debe obtener la siguiente cantidad de tetraborato de sodio:

1) *Tetraborato de sodio a partir de la etapa de reacción 1 (Na₂B₄O₇ 1):*

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 &= 10 \text{ g NaCaB}_5\text{O}_9 * \frac{1 \text{ mol NaCaB}_5\text{O}_9}{261.1194 \text{ g NaCaB}_5\text{O}_9} * \frac{5 \text{ mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{4 \text{ mol NaCaB}_5\text{O}_9} \\ \frac{201.2194 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{1 \text{ mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} &= 9.6325 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \end{aligned}$$

⁴ El resultado obtenido en esta muestra 1 no es el esperado, ya que influyó el error humano durante la aplicación de la técnica de cristalización en el laboratorio.

2) *Tetraborato de sodio a partir de la etapa de neutralización (Na₂B₄O₇ 2):*

Se calcula el hidróxido de sodio producido en la primera reacción del proceso, para lo que se tiene:

$$\text{NaOH} = 10 \text{ g NaCaB}_5\text{O}_9 * \frac{1 \text{ mol NaCaB}_5\text{O}_9}{251.1194 \text{ g NaCaB}_5\text{O}_9} * \frac{2 \text{ mol NaOH}}{4 \text{ mol NaCaB}_5\text{O}_9} *$$

$$\frac{39.9971 \text{ g NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}} = 0.7659 \text{ g NaOH}$$

$$\frac{\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{2} = 0.7659 \text{ g NaOH} * \frac{1 \text{ mol NaOH}}{39.9971 \text{ g NaOH}} * \frac{1 \text{ mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{2 \text{ mol NaOH}} *$$

$$\frac{201.2194 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{1 \text{ mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} = 1.9265 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$$

Por lo tanto, la suma de los dos será la cantidad teórica de tetraborato de sodio que se debe obtener:

$$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ Teórico} = \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ 1} + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ 2} = (9.6325 + 1.9265) \text{ g} = 11.5590 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$$

Entonces para la muestra No. 1 de la batería 1 se tiene:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{4.8479 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{11.5590 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} * 100 = 41.94 \%$$

Tabla B.4
Determinación del porcentaje de B₂O₃ en el tetraborato de sodio obtenido

	No. de muestra	Masa de muestra (± 0.0001 g)	Volumen de NaOH 0.0790 N utilizado (± 0.05 mL)	Porcentaje de B ₂ O ₃
Batería 1	1	1.0871	16.4	51.49 %
	2	1.0459	15.8	51.56 %
	3	1.1257	15.9	48.16 %
	4	1.0339	15.2	46.21 %
	5	1.0648	15.9	50.96 %
Batería 2	1	1.0030	16.2	55.12 %
	2	1.0359	15.1	49.75 %
	3	1.0445	15.1	49.34 %
	4	1.0351	15.3	50.40 %
	5	1.0997	16.2	50.28 %

➤ *Cálculo del porcentaje de B_2O_3 en el producto obtenido:*

El porcentaje de óxido bórico en cada muestra se determinó por el método volumétrico descrito en el ANEXO F, teniendo la siguiente relación:

$$\% B_2O_3 = \frac{\text{mL NaOH 0.9790N usados} * \frac{0.03413 \text{ g } B_2O_3}{1 \text{ mL NaOH 0.9790N}}}{\text{g de muestra del producto}} * 100$$

Entonces para la muestra No. 1 de la batería 1 se tiene:

$$\% B_2O_3 = \frac{16.4 \text{ mL NaOH 0.9790N} * \frac{0.03413 \text{ g } B_2O_3}{1 \text{ mL NaOH 0.9790N}}}{1.0871 \text{ g de muestra del producto}} * 100 = 51.49\%$$

b. **Determinación de las condiciones para obtener mejores rendimientos de tetraborato de sodio a nivel experimental**

1.) Pruebas de solubilidad de la ulexita

Tabla B.5
Pruebas de solubilidad de la ulexita en agua

Volumen de agua (± 0.5 mL)	Muestra No. 1	Muestra No. 2	Muestra No. 3
10	NSD	NSD	NSD
20	NSD	SDP	NSD
30	SD	SD	SDP
40	SD	SD	SD
50	SD	SD	SD

NSD = No se disolvió **SDP** = Se disolvió parcialmente **SD** = Se disolvió

A partir de estos resultados se tiene que se necesitan 35 mL de agua por cada 5 gramos de ulexita.

- 2) Comportamiento de la concentración de B_2O_3 en el licor madre respecto del rendimiento de tetraborato de sodio obtenido:

Tabla B.6
Masa de tetraborato de sodio obtenido
para cada concentración de B_2O_3 del licor madre inicial evaluada

		Concentración del licor madre inicial (g B_2O_3 / Kg solución)					
		0	20	40	60	80	100
Masa de Tetraborato de Sodio ($\pm 0.0001g$)	Corrida 1	1.0336	1.4445	1.1875	2.0038	3.0891	4.2240
	Corrida 2	1.1214	1.4834	1.5310	1.5394	2.9858	5.4254
Promedio (gramos)		1.0775	1.4640	1.3592	1.7716	3.0374	4.8247

Tabla B.7
Porcentaje de rendimiento del tetraborato de sodio obtenido respecto de
la concentración de B_2O_3 en el licor madre inicial

		Concentración del licor madre inicial (g B_2O_3 / Kg solución)					
		0	20	40	60	80	100
Porcentaje de Rendimiento	Corrida 1	27.75%	38.79%	31.89%	53.81%	82.95%	113.89%
	Corrida 2	30.11%	39.83%	41.11%	41.34%	80.18%	145.68%
Promedio		28.93%	39.31%	36.50%	47.58%	81.56%	129.78%

> *Cálculo del porcentaje de rendimiento:*

El cálculo del porcentaje de rendimiento se hace de la misma forma que para la Tabla B.3. La cantidad teórica de tetraborato de sodio es de 3.7241 g, que corresponde al proceso de 5.0 gramos de Ulexite 40.

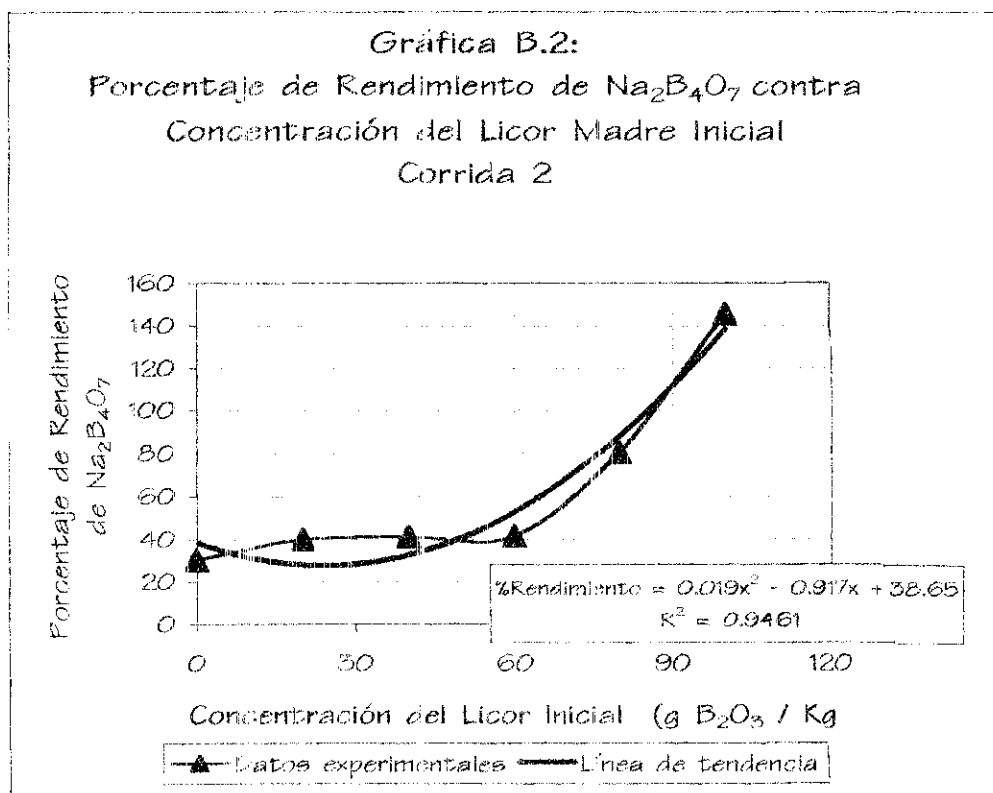
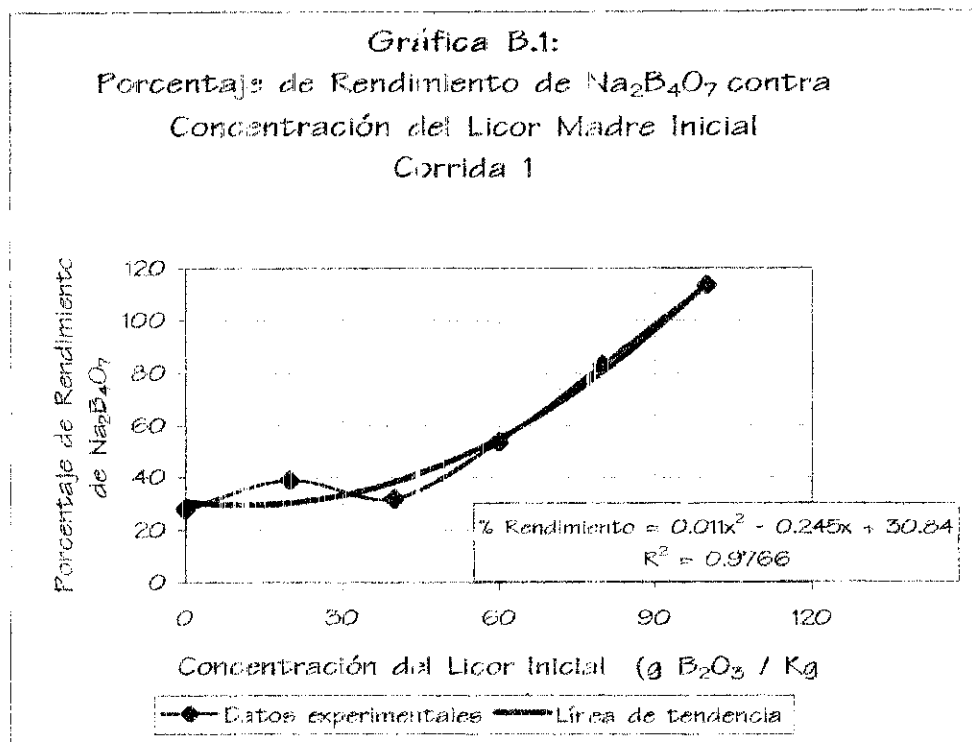


Tabla B.8
Datos obtenidos para la determinación del
porcentaje de B_2O_3 en el tetraborato de sodio obtenido
para cada una de las concentraciones del licor madre inicial

	Concentración del Licor Inicial (g B_2O_3 / Kg de solución)	Masa de muestra (± 0.0001 g)	Volumen de NaOH 0.9790 N utilizado (± 0.05 mL)
Corrida 1	0	0.8502	14.4
	20	0.9947	16.8
	40	0.8534	13.4
	60	1.0209	16.4
	80	1.0148	16.2
	100	1.0035	15.9
Corrida 2	0	0.9539	16.2
	20	1.0045	17.0
	40	1.0013	16.3
	60	1.0053	16.5
	80	1.0007	15.8
	100	1.0069	16.1

Tabla B.9
Evaluación del porcentaje de B_2O_3 en el producto obtenido
respecto de la concentración del licor madre inicial

Porcentaje de B_2O_3	Corrida	Concentración del licor madre inicial (g B_2O_3 / Kg solución)					
		0	20	40	60	80	100
		1	57.81%	57.64%	53.59%	54.83%	54.48%
2	57.96%	57.76%	55.56%	56.02%	53.88%	54.57%	
Promedio		57.90%	57.70%	54.58%	55.42%	54.18%	54.32%

➤ *Cálculo del porcentaje de B_2O_3 en el producto obtenido:*

El cálculo del porcentaje de B_2O_3 se hace de la misma forma que para la Tabla B.4.

c. Proceso de un lote de ulexita para producir tetraborato de sodio

Se realizó el proceso aumentando la escala 5:1 de los experimentos iniciales. Para 79.3 gramos de Ulexite 40 se tienen los siguientes resultados.

Tabla B.10
Resultados obtenidos para un aumento de escala 5:1
para fabricar tetraborato de sodio

	Corrida 1	Corrida 2
Concentración del Licor Madre inicial (g B₂O₃ / Kg de solución)	40.0	40.0
Masa de material insoluble (± 0.0001 g)	74.6195	67.6023
Porcentaje de material insoluble	9.95 %	9.02 %
Masa de tetraborato de sodio obtenido (± 0.0001 g)	47.1976	48.0156
Porcentaje de rendimiento	79.91 %	81.29 %

2. Preparación de borato de zinc

a. Evaluación a nivel experimental de la tecnología

Se evaluó la tecnología para obtener borato de zinc a partir del tetraborato de sodio producido a nivel de laboratorio, y que tiene como referencia el proceso descrito en la U.S. Patent 3,649,172. La sal de zinc que se escogió usar para el proceso fue sulfato de zinc heptahidratado.

Tabla B.11
Resultados obtenidos en la evaluación de
la tecnología para producir borato de zinc

No. de muestra	Masa de Borato de Zinc Producido (± 0.0001g)	Porcentaje de Rendimiento
1	5.6205	74.90 %
2	6.1576	82.06 %
3	5.1376	68.46 %
4	5.7084	76.07 %
5	5.9794	79.68 %
Promedio	5.7207	76.24 %
Desviación estándar	0.3899	5.20
Límite de confianza al 95 %	5.7207 ± 0.4840	76.24 ± 6.46

➤ *Cálculo del porcentaje de rendimiento:*

El porcentaje de rendimiento se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{g ZnOB}_2\text{O}_3 \text{ obtenidos}}{\text{g ZnOB}_2\text{O}_3 \text{ que se deben obtener}} * 100$$

De acuerdo a la estequiometría de la reacción que se lleva a cabo, al iniciar con 10g de tetraborato de sodio se debe obtener la siguiente cantidad de borato de zinc:

$$\begin{aligned} \text{ZnOB}_2\text{O}_3 \text{ Teórico} &= 10 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 * \frac{1 \text{ mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{201.2194 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \frac{1 \text{ mol ZnOB}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \\ &= \frac{150.9996 \text{ g ZnOB}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol ZnOB}_2\text{O}_3} = 7.5042 \text{ g Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \end{aligned}$$

Entonces, para la muestra No. 1 se tiene:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{5.6205 \text{ g ZnOB}_2\text{O}_3}{7.5042 \text{ g ZnOB}_2\text{O}_3} * 100 = 74.90 \%$$

Tabla B.12
Determinación del porcentaje de B₂O₃ en el borato de zinc obtenido

No. de muestra	Masa de muestra (± 0.0001 g)	Volumen de NaOH 0.9741 N (± 0.05 mL)	Porcentaje de B ₂ O ₃
1	1.0054	18.4	62.10 %
2	1.0179	18.6	62.00 %
3	1.1179	21.0	63.74 %
4	1.0064	18.3	61.70 %
5	1.0435	19.3	62.76 %
Promedio			62.46 %
Desviación estándar			0.81
Límite de confianza al 95 %			62.46 ± 1.01 %

➤ *Cálculo del porcentaje de B₂O₃ en el producto obtenido:*

El porcentaje de óxido bórico en cada muestra se determinó por el método volumétrico descrito en el ANEXO F, y tiene la siguiente relación:

$$\% \text{ B}_2\text{O}_3 = \frac{\text{mL NaOH 0.9741N usados} * \frac{0.03393 \text{ g B}_2\text{O}_3}{1 \text{ mL NaOH 0.9741N}}}{\text{g de muestra del producto}} * 100$$

Entonces para la muestra No. 1 se tiene:

$$\% \text{B}_2\text{O}_3 = \frac{18.4 \text{ mL NaOH } 0.974 \text{ N} * \frac{0.03393 \text{ g B}_2\text{O}_3}{1 \text{ mL NaOH } 0.974 \text{ N}}}{1.0054 \text{ g de muestra del producto}} * 100 = 62.10\%$$

- b. Evaluación del porcentaje de rendimiento del borato de zinc respecto del tiempo de reacción

Tabla B.13
Masa de borato de zinc obtenido para cada tiempo de reacción evaluado

		Tiempo de reacción (horas)				
		0.25	0.50	1.00	2.75	6.00
Masa de Borato de Zinc ($\pm 0.0001\text{g}$)	Corrida 1	2.7349	2.8542	2.8049	3.2965	3.2367
	Corrida 2	2.9026	2.9797	2.8559	2.9213	3.3197
Promedio (g)		2.8188	2.9170	2.8304	3.1089	3.2782

Tabla B.14
Evaluación del porcentaje de rendimiento del borato de zinc respecto del tiempo de reacción

		Tiempo de reacción (horas)				
		0.25	0.50	1.00	2.75	6.00
Porcentaje de Rendimiento	Corrida 1	72.89 %	76.07 %	74.76 %	87.86 %	86.26 %
	Corrida 2	77.36 %	79.41 %	76.11 %	77.86 %	88.48 %
Promedio		75.12 %	77.74 %	75.44 %	82.88 %	87.37 %

➤ *Cálculo del porcentaje de rendimiento:*

El porcentaje de rendimiento se calcula de forma similar que para la Tabla B.11. La cantidad teórica de borato de zinc es de 3.7521 g, que corresponde al proceso de 5.0 gramos de tetraborato de sodio.

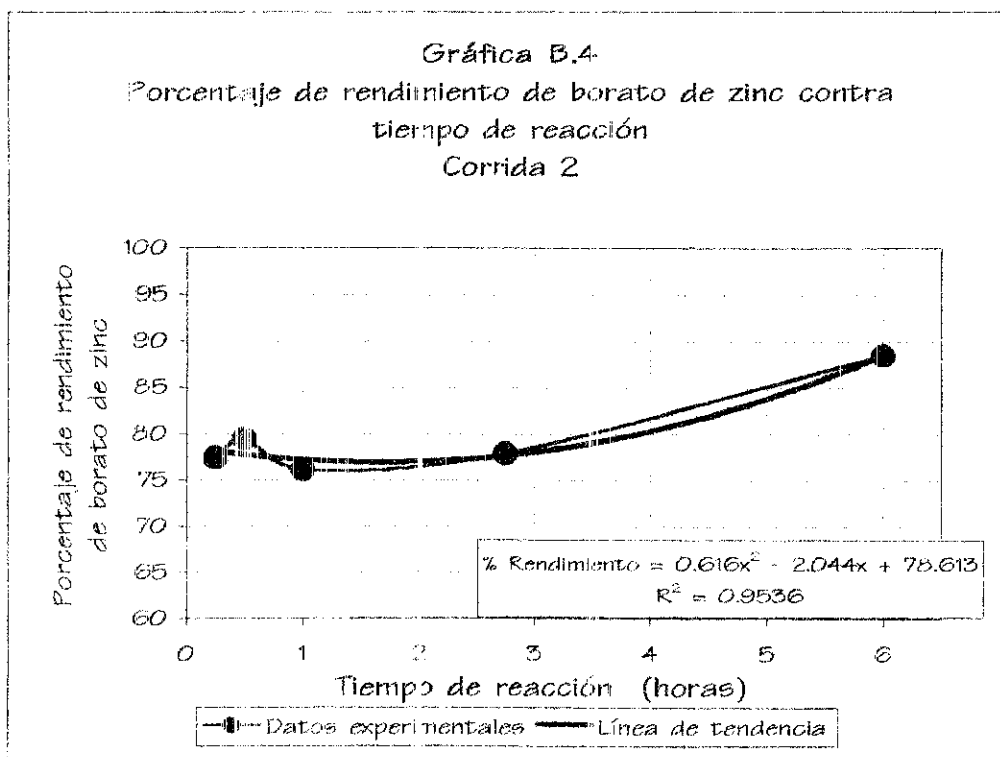
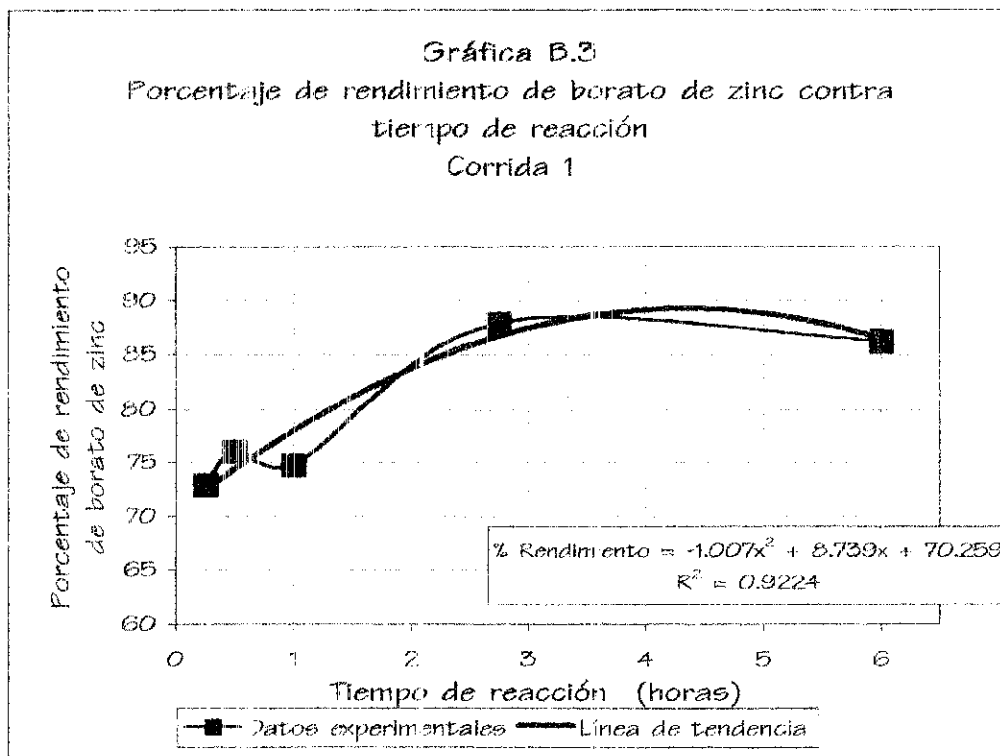


Tabla B.15
Datos obtenidos para la determinación del
porcentaje de B_2O_3 en el borato de zinc obtenido
para cada uno de los tiempos de reacción evaluados

	Tiempo de reacción (Horas)	Masa de muestra (± 0.0001 g)	Volumen de NaOH 0.9141 N utilizado (± 0.05 mL)
Corrida 1	0.25	1.0064	18.0
	0.50	1.0064	18.3
	1.00	1.0714	17.9
	2.75	1.0040	18.4
	6.00	1.1792	22.4
Corrida 2	0.25	0.9723	18.0
	0.50	1.0350	19.3
	1.00	1.0153	20.0
	2.75	1.0212	19.3
	6.00	1.0187	18.3

Tabla B.16
Evaluación del porcentaje de B_2O_3 en
el producto obtenido respecto del tiempo de reacción

		Tiempo de reacción (horas)				
		0.25	0.50	1.00	2.75	6.00
Porcentaje de B_2O_3	Corrida 1	60.68%	61.70%	56.69%	62.18%	64.45%
	Corrida 2	62.81%	62.76%	66.84%	64.12%	60.95%
Promedio		61.74%	62.23%	61.76%	63.15%	62.70%

➤ *Cálculo del porcentaje de B_2O_3 en el producto obtenido:*

El cálculo del porcentaje de B_2O_3 se hace de la misma forma que para la Tabla B.12.

3. Preparación de borato de sodio y borato de zinc simultáneamente

a. Puesta en marcha al usar agua como disolvente inicial del proceso

Tabla B.17
Porcentajes de rendimiento de tetraborato de sodio y borato de zinc obtenidos para el proceso simultáneo al usar agua como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ obtenida ($\pm 0.0001\text{g}$)	Porcentaje de rendimiento $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	Masa de ZnOB_2O_3 obtenida ($\pm 0.0001\text{g}$)	Porcentaje De rendimiento ZnOB_2O_3
1	4.3305	64.60 %	3.4551	63.88 %
2	3.4768	51.87 %	3.6215	66.96 %
3	3.8078	56.80 %	3.5094	64.88 %
4	3.0795	45.94 %	3.8406	71.01 %
5	3.1134	46.44 %	3.3107	61.21 %
6	3.0137	44.96 %	3.2618	60.31 %
Promedio	3.4709	51.77 %	3.4998	65.59 %
Desviación estándar	0.5182	7.73	0.2123	3.67
Límite de confianza al 95 %	3.4709 \pm 0.5439	51.77 \pm 8.11	3.4998 \pm 0.2229	65.59 \pm 3.85

➤ *Cálculo del porcentaje de rendimiento:*

El porcentaje de rendimiento de cada uno de los productos se obtiene de forma similar que para la Tabla B.3 y la Tabla B.11. Además, se tiene que la cantidad teórica de tetraborato de sodio para este procedimiento es 6.7033 g y para borato de zinc es de 7.2101 g.

Tabla B.18
Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el tetraborato de sodio obtenido simultáneamente si se usa agua como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de muestra ($\pm 0.0001\text{g}$)	Volumen de NaOH 0.9141 N ($\pm 0.05\text{ mL}$)	Porcentaje de B_2O_3
1	1.0550	14.8	47.60%
2	1.0101	14.9	50.05%
3	1.0040	14.5	49.00%
4	1.0047	14.8	49.98%
5	1.0041	14.9	50.33%
6	1.0060	14.7	49.58%
Promedio			49.42%
Desviación estándar			1.01
Límite de confianza al 95 %			49.42 \pm 1.06 %

➤ *Cálculo del porcentaje de B_2O_3 en el producto obtenido:*

El cálculo del porcentaje de B_2O_3 se hace de la misma forma que para la Tabla B.12.

Tabla B.19
Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el borato de zinc obtenido simultáneamente al usar agua como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de muestra (± 0.0001 g)	Volumen de NaOH 0.9141 N (± 0.05 mL)	Porcentaje de B_2O_3
1	1.0034	18.7	63.23%
2	1.0015	17.9	60.64%
3	1.0048	18.1	61.11%
4	1.0073	18.2	61.30%
5	1.0000	18.1	61.41%
6	1.0068	18.1	61.00%
Promedio			61.45 %
Desviación estándar			0.91
Límite de confianza al 95 %			61.45 \pm 0.96 %

➤ *Cálculo del porcentaje de B_2O_3 en el producto obtenido:*

El cálculo del porcentaje de B_2O_3 se hace de la misma forma que para la Tabla B.4.

Tabla B.20
Porcentaje de agua que retienen los residuos insolubles que se retiran por filtración si se utiliza agua como disolvente inicial

No. de Muestra	Masa torta húmeda (± 0.0001 g)	Masa torta seca (± 0.0001 g)	Masa agua (± 0.0001 g)	Masa total (Agua de lavado + suspensión 1) (± 0.0001 g)	Porcentaje de agua
1	26.7212	11.9814	14.7398	132.1962	11.15 %
2	25.5195	12.4939	13.0256	148.4079	8.78 %
3	30.3447	14.7243	15.6204	142.3075	10.98 %
4	27.4143	11.4701	15.9442	124.1761	12.84 %
5	29.1420	12.0098	17.1322	153.0291	13.18 %
6	30.7784	12.5434	18.2350	152.9782	11.92 %
Promedio					11.48 %
Desviación estándar					1.58
Límite de confianza al 95 %					11.48 \pm 1.66

➤ *Cálculo del porcentaje de agua retenido:*

El porcentaje de agua retenido está dado por:

$$\% \text{ Agua retenido} = \frac{\text{g agua retenida en la torta}}{\text{g totales (suspensión de reacción 1 + agua de lavado)}} * 100$$

Entonces para la muestra No. 1 se tiene:

$$\% \text{ agua retenido} = \frac{14.7398 \text{ g agua}}{132.1962 \text{ g totales}} * 100 = 11.15 \%$$

Tabla B.21
Porcentaje de agua que retienen los sólidos de filtración
que se retiran al usar agua como disolvente inicial

No. de Muestra	Masa torta húmeda (± 0.0001g)	Masa torta seca (± 0.0001g)	Masa agua (± 0.0001g)	Masa total (Agua de lavado + suspensión 2) (± 0.0001g)	Porcentaje de agua
1	12.8045	3.4551	9.3494	106.3045	8.79 %
2	12.7339	3.6215	9.1124	95.9339	9.50 %
3	16.3587	3.5094	12.8493	92.7587	13.85 %
4	14.6277	3.8406	10.7871	133.0277	8.11 %
5	12.3573	3.3106	9.0471	80.1578	11.29 %
6	13.1398	3.2618	9.8780	89.2398	11.07 %
Promedio					10.44 %
Desviación estándar					2.09
Límite de confianza al 95 %					10.44 ± 2.19

➤ *Cálculo del porcentaje de agua retenido:*

El porcentaje de agua retenido está dado por:

$$\% \text{ Agua retenido} = \frac{\text{g agua retenida en la torta}}{\text{g totales (suspensión de reacción 2 + agua de lavado)}} * 100$$

Entonces para la muestra No. 1 se tiene:

$$\% \text{ agua retenido} = \frac{9.3494 \text{ g agua}}{106.3045 \text{ g totales}} * 100 = 8.79 \%$$

- b. Puesta en marcha usando el licor final como disolvente inicial del proceso

Tabla B.22
Determinación de la concentración del licor final
que se usa como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de solución (± 0.0001 g)	Volumen de NaOH 0.9790 N utilizado (± 0.05 mL)	Concentración del licor final (g B_2O_3 / Kg solución)
1	5.3068	6.7	43.09
2	5.3870	7.6	48.15
3	5.1546	6.3	41.71
4	5.2941	6.7	43.19
5	5.3426	6.2	39.61
6	5.4198	8.0	50.38

➤ *Cálculo de la concentración del licor final*

El cálculo de la concentración del licor final se determinó de igual forma que para la Tabla B.1.

Tabla B.23
Porcentajes de rendimiento de tetraborato de sodio y
borato de zinc obtenidos para el proceso simultáneo
si se usa el licor final como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de $Na_2B_4O_7$ obtenida (± 0.0001 g)	Porcentaje de rendimiento $Na_2B_4O_7$	Masa de $ZnOB_2O_3$ obtenida (± 0.0001 g)	Porcentaje De rendimiento $ZnOB_2O_3$
1	1.7445	26.02 %	4.1834	77.34 %
2	1.8350	27.37 %	2.4199	44.74 %
3	1.6245	24.23 %	2.9078	53.76 %
4	1.5911	23.74 %	2.6431	48.87 %
5	1.3949	20.81 %	2.8080	51.92 %
6	1.9065	28.44 %	2.4799	45.85 %
Promedio	1.6828	25.10 %	2.9070	53.75 %
Desviación estándar	0.1853	2.76	0.6524	12.06
Límite de confianza al 95 %	1.6828 \pm 0.1945	25.10 \pm 2.90	2.9070 \pm 0.6848	53.75 \pm 12.66

➤ *Cálculo del porcentaje de rendimiento:*

El porcentaje de rendimiento de cada uno de los productos se obtiene de igual forma que para la Tabla 17.

Tabla B.24
Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el tetraborato de sodio obtenido simultáneamente al usar el licor final como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de muestra (± 0.0001 g)	Volumen de NaOH 0.9790 N (± 0.05 mL)	Porcentaje de B_2O_3
1	1.0221	14.4	47.80%
2	1.0163	14.5	48.41%
3	1.0120	14.2	47.61%
4	1.0020	14.1	47.74%
5	1.0257	14.9	49.29%
6	1.0116	14.6	48.97%
Promedio			48.30%
Desviación estándar			0.70
Límite de confianza al 95 %			48.30 \pm 0.74 %

➤ *Cálculo del porcentaje de B_2O_3 en el producto obtenido:*

El cálculo del porcentaje de B_2O_3 se hace de la misma forma que para la Tabla B.4.

Tabla B.25
Determinación del porcentaje de B_2O_3 en el borato de zinc obtenido simultáneamente si se usa el licor final como disolvente inicial

No. de muestra	Masa de muestra (± 0.0001 g)	Volumen de NaOH 0.9790 N (± 0.05 mL)	Porcentaje de B_2O_3
1	1.0206	18.8	62.50%
2	1.0048	18.4	62.13%
3	1.0100	19.1	64.16%
4	1.0073	18.2	61.30%
5	1.0519	17.9	57.74%
6	1.0160	18.8	62.78%
Promedio			61.77
Desviación estándar			2.18
Límite de confianza al 95 %			61.77 \pm 2.29

➤ *Cálculo del porcentaje de B_2O_3 en el producto obtenido:*

El cálculo del porcentaje de B_2O_3 se hace de la misma forma que para la Tabla B.4.

4. Parámetros de diseño obtenidos experimentalmente:

a. Densidad

La densidad de las diferentes soluciones se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{\text{Masa de la solución}}{\text{Volumen de la solución}}$$

A partir de ésta, se obtienen los resultados que se presentan a continuación.

1) Mezcla inicial

Tabla B.26
Densidad de la mezcla inicial del proceso

No. de muestra	Masa de Mezcla Inicial (± 0.0001 g)	Volumen de Mezcla Inicial (± 0.05 mL)	Densidad (g/mL)
1	146.2354	132	1.11
2	144.7962	125	1.16
3	135.7591	122	1.11
4	157.4459	146	1.08
5	141.8944	124	1.14
6	151.6213	134	1.13
Promedio			1.12
Desviación estándar			0.03
Límite de confianza al 95 %			1.12 ± 0.03

2) Solución clarificada:

Tabla B.27
Densidad de la solución clarificada del proceso

No. de muestra	Masa de Solución Clara (± 0.0001 g)	Volumen de Solución clara (± 0.05 mL)	Densidad (g/mL)
1	105.4750	99	1.06
2	122.8884	117	1.05
3	111.9628	106	1.06
4	96.7618	90	1.08
5	100.8437	94	1.07
6	122.2507	116	1.05
Promedio			1.06
Desviación estándar			0.01
Límite de confianza al 95 %			1.06 ± 0.01

3) Licor final:

Tabla B.28
Densidad del licor final del proceso

No. de muestra	Masa de Licor Final (± 0.05 g)	Volumen de Licor Final (± 0.05 mL)	Densidad (g/mL)
1	93.5	87	1.07
2	83.2	77	1.08
3	76.4	71	1.08
4	118.4	115	1.03
5	67.8	62	1.09
6	76.1	71	1.07
Promedio			1.07
Desviación estándar			0.02
Límite de confianza al 95 %			1.07 ± 0.02

b. **Viscosidad**

La viscosidad del licor de reacción se obtuvo por medio de un viscosímetro de Ostwald cuya constante tiene un valor de 0.003572, la cual se relaciona de la siguiente forma con el tiempo:

$$\text{Viscosidad Cinemática (v)} = 0.003572 * \text{tiempo recorrido entre las marcas}$$

A partir de la viscosidad cinemática se tiene que la viscosidad del líquido será:

$$\text{Viscosidad } (\mu) = \text{Densidad } (\rho) * \text{Viscosidad cinemática (v)}$$

Tabla B.29
Viscosidad de las soluciones del proceso

	Tiempo (± 0.5 s)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Viscosidad (Kg m / s)
Mezcla inicial	134	4.78 * 10 ⁻⁷	5.35 * 10 ⁻⁴
Solución clarificada	128	4.57 * 10 ⁻⁷	4.84 * 10 ⁻⁴
Licor final	128	4.57 * 10 ⁻⁷	4.89 * 10 ⁻⁴

c. **Pruebas de filtración:**

Tabla B.30
Determinación de la capacidad de sólidos depositados
en el filtro por unidad de volumen de filtrado

No. de Muestra	Masa torta húmeda (± 0.0001g)	Masa torta seca (± 0.0001g)	Volumen de filtrado (± 0.5 mL)	Cs (g/mL)	C (g/mL)
1	26.7212	11.9814	99	0.1210	0.1395
2	27.5195	12.9939	117	0.1068	0.1206
3	30.3447	14.7243	106	0.1389	0.1599
4	27.4928	11.4701	90	0.1274	0.1514
5	29.1420	12.0098	94	0.1278	0.1526
6	30.7784	12.5434	116	0.1081	0.1257
Promedio					0.1416
Desviación estándar					0.0158
Límite de confianza al 95 %					0.1416 ± 0.0166

- *Cálculo de la concentración de sólidos en la suspensión por unidad de volumen de filtrado:*

La cantidad de sólidos por unidad de líquido de alimentación al filtro se puede definir como "C", por lo tanto, C se calcula por:

$$C = \frac{C_s}{1 - [(m_F / m_C) - 1] C_s / \rho}$$

donde m_F representa la masa de la torta húmeda y m_C la masa de la torta seca.

Entonces para la muestra No. 1 se tiene:

$$C = \frac{(11.9814g / 99 \text{ mL})}{1 - [(26.7212g / 11.9814g) - 1] (11.9814g / 99 \text{ mL}) / 1.12 \text{ g/mL}} = 0.1395 \text{ g/mL}$$

Tabla B.31
Datos Volumen - Tiempo para la determinación de los parámetros de filtración

Caída de Presión (± 0.5 mmHg)	93	125	164	275	340
Volumen de filtrado (± 0.5 mL)	Tiempo (± 1 s)	Tiempo (± 1 s)	Tiempo (± 1 s)	Tiempo (± 1 s)	Tiempo (± 1 s)
150	185	123	109	78	63
200	262	175	151	120	95
250	379	235	202	164	138
300	487	304	250	209	185
350	636	389	310	264	237
400	789	478	378	325	284
450	---	579	440	379	345

Tabla B.32
Resultados Volumen - Tiempo para la determinación de los parámetros de filtración

Caída de Presión (± 0.5 mmHg)	93	125	164	275	340
Volumen de filtrado (± 0.5 mL)	Tiempo / Volumen (s/mL)	Tiempo / Volumen (s/mL)	Tiempo / Volumen (s/mL)	Tiempo / Volumen (s/mL)	Tiempo / Volumen (s/mL)
150	1.2003	0.8200	0.6572	0.5200	0.4600
200	1.3100	0.8750	0.7350	0.6000	0.5150
250	1.5160	0.9400	0.8080	0.6560	0.5520
300	1.6233	1.0133	0.8333	0.6967	0.6167
350	1.8171	1.1114	0.8857	0.7543	0.6771
400	1.9725	1.1950	0.9750	0.8125	0.7100

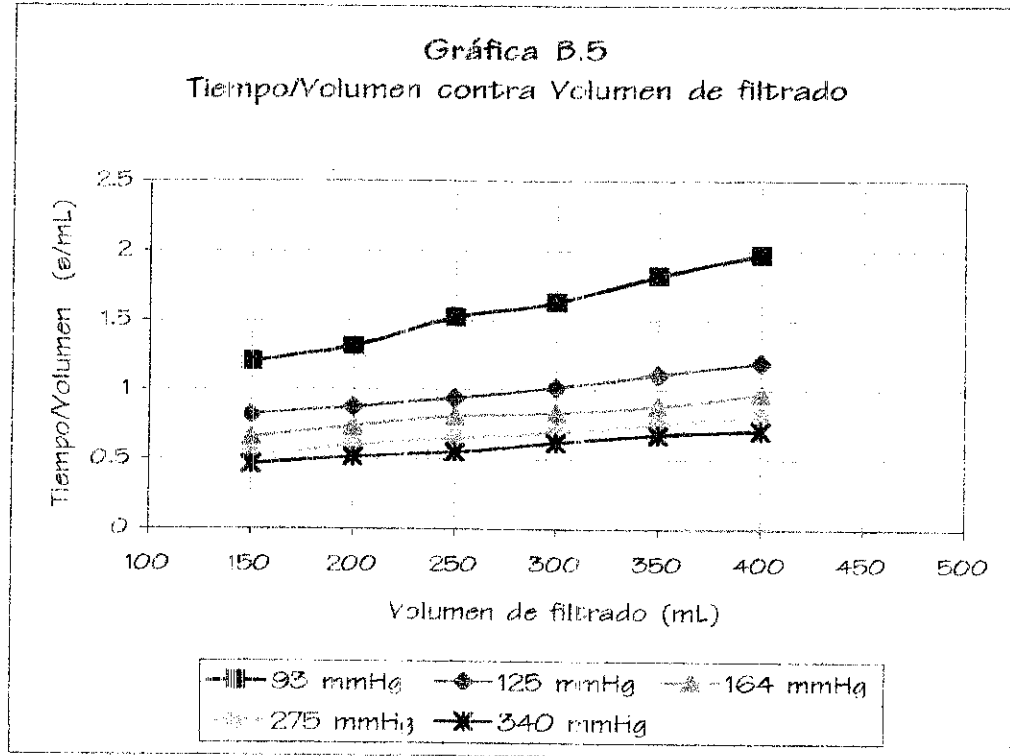
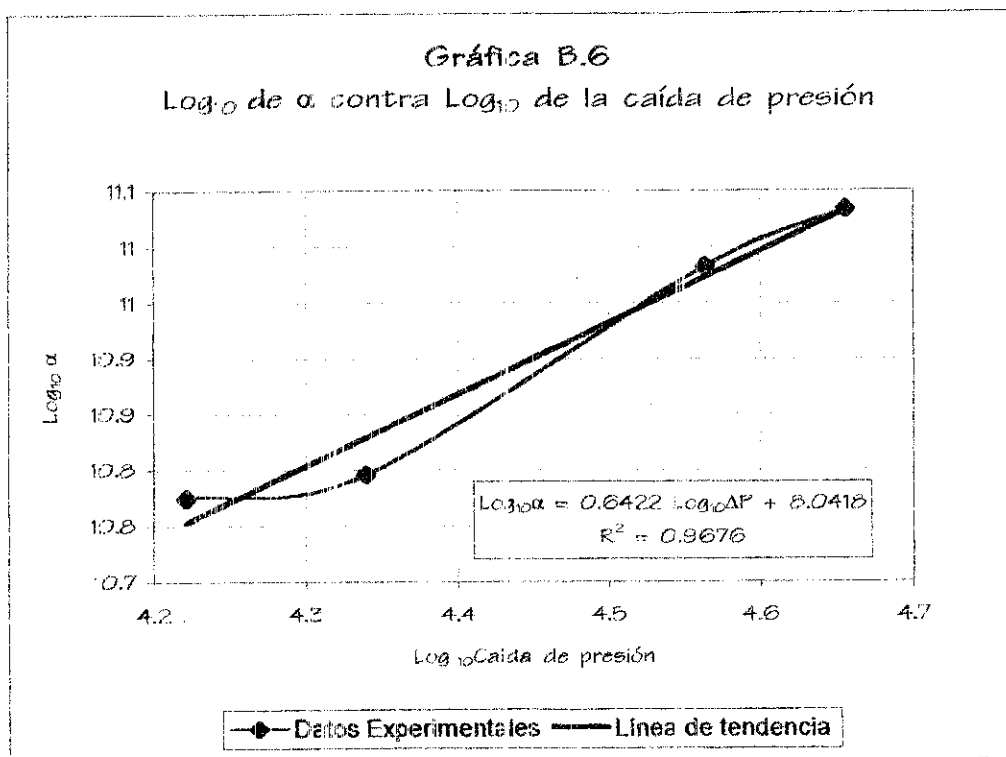


Tabla B.33
Valores de K_c , $1/q_0$, R_m y α determinados experimentalmente

Caída de Presión (N/m^2)	$K_c/2$ s/m^3	$1/q_0$ s/m	α m/Kg	R_m m^{-1}
12396	$6.20 \cdot 10^9$	$7.11 \cdot 10^5$	$9.16 \cdot 10^{10}$	$1.56 \cdot 10^{11}$
16661	$3.00 \cdot 10^9$	$5.75 \cdot 10^5$	$5.95 \cdot 10^{10}$	$1.70 \cdot 10^{11}$
21859	$2.40 \cdot 10^9$	$4.91 \cdot 10^5$	$6.25 \cdot 10^{10}$	$1.91 \cdot 10^{11}$
36655	$2.20 \cdot 10^9$	$3.64 \cdot 10^5$	$9.61 \cdot 10^{10}$	$2.37 \cdot 10^{11}$
45318	$2.00 \cdot 10^9$	$3.06 \cdot 10^5$	$1.08 \cdot 10^{11}$	$2.46 \cdot 10^{11}$

- $K_c/2$ corresponde a la pendiente de las curvas de la gráfica B.5
- $1/q_0$ corresponde a la ordenada en el origen de las curvas de la gráfica B.5



ANEXO C

BALANCE DE MASA

A partir del siguiente balance de masa se deriva la cantidad en masa de cada una de las materias primas que se utilizarán en el proceso de fabricación de tetraborato de sodio y borato de zinc. Con esto se procede a determinar la capacidad de los equipos involucrados, lo cual servirá como base para su adecuado dimensionamiento. La planta se diseña en base a las siguientes consideraciones:

→ **Tipo de operación:**

Continua

→ **Organización del trabajo por mes:**

Se trabajará 24 días al mes durante 12 horas diarias.

→ **Base de cálculo:**

Volúmenes de producto terminado a producir:

- Tetraborato de sodio = 100 tm / mes = 0.35 tm / hora
- Borato de zinc = 200 tm / mes = 0.69 tm / hora

Además se producirá la cantidad de borato de sodio necesaria para utilizarlo como materia prima en la fabricación del borato de zinc.

→ **Materia prima requerida para el proceso:**

i.) Ulexita 40:

El cálculo de la ulexita que se necesita usar como materia prima se realiza de forma regresiva a partir del cálculo de tetraborato de sodio que se requiere para producir las 0.69 tm/h de borato de zinc. Para esto se tiene lo siguiente:

- *Tetraborato de sodio teórico:*

De acuerdo a la relación estequiométrica dada por la reacción, se tiene que la cantidad teórica de tetraborato de sodio será:

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ Teórico} &= \frac{0.69 \text{ tm ZnOB}_2\text{O}_3}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ tm mol ZnOB}_2\text{O}_3}{150.9996 \text{ tm ZnOB}_2\text{O}_3} * \frac{1 \text{ tm mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{1 \text{ tm mol ZnOB}_2\text{O}_3} * \\ &= \frac{201.2194 \text{ tm Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{1 \text{ tm mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} = 0.92 \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \end{aligned}$$

- *Tetraborato de sodio real:*

De los resultados que se obtuvieron en la fase experimental y que se presentan en la Tabla B.17 se tiene que esta etapa del proceso posee un 65.59% de rendimiento. La cantidad real de tetraborato de sodio que se necesita será:

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ Real 2} &= \frac{0.92 \text{ tm Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{1 \text{ hora}} * \frac{100\%}{65.59\%} = 1.40 \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \end{aligned}$$

Además, se deben producir 0.35 tm/h de tetraborato de sodio como producto final. A partir de los resultados que se presentan en la Tabla B.17, se tiene que esta etapa del proceso posee un 51.77 % de eficiencia. Entonces:

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ Real 1} &= \frac{0.35 \text{ tm Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{1 \text{ hora}} * \frac{100\%}{51.77\%} = 0.68 \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la cantidad total de tetraborato de sodio que se debe producir será:

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ Total} &= \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ Real 1} + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ Real 2} = 0.68 \text{ tm/h} + 1.40 \text{ tm/h} = 2.08 \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \end{aligned}$$

Entonces, de acuerdo a la estequiometría de las reacciones involucradas para la producción de tetraborato de sodio, se calcula la cantidad de ulexita necesaria para el proceso de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Ulexite 40} &= \frac{2.08 \text{ tm Na}_2\text{H}_4\text{O}_7}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ tm mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{201.2194 \text{ tm Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \frac{2 \text{ tm mol NaCaB}_5\text{O}_9}{3 \text{ tm mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \\ &\frac{1 \text{ tm mol Ulexite 40}}{1 \text{ tm mol NaCaB}_5\text{O}_9} * \frac{405.241 \text{ tm Ulexite 40}}{1 \text{ tm mol Ulexite 40}} = 2.79 \text{ tm/h Ulexite 40} \end{aligned}$$

2) Carbonato de Sodio:

Según la estequiometría de la reacción para producir tetraborato de sodio, la cantidad de carbonato de sodio necesaria para reaccionar con 2.79 tm/h de Ulexite 40 será:

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{CO}_3 &= \frac{2.79 \text{ tm Ulexite 40}}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ tm mol Ulexite 40}}{405.241 \text{ tm Ulexite 40}} * \frac{1 \text{ tm mol NaCaB}_5\text{O}_9}{1 \text{ tm mol Ulexite 40}} * \\ &\frac{4 \text{ tm mol Na}_2\text{CO}_3}{4 \text{ tm mol NaCaB}_5\text{O}_9} * \frac{105.9890 \text{ tm Na}_2\text{CO}_3}{1 \text{ tm mol Na}_2\text{CO}_3} = 0.73 \text{ tm/h Na}_2\text{CO}_3 \end{aligned}$$

3) Ácido Bórico:

Según la estequiometría de la reacción para la neutralización del hidróxido de sodio formado, la cantidad de ácido bórico necesaria para procesar 2.79 tm/h de Ulexite 40 será:

$$\begin{aligned} \text{H}_3\text{BO}_3 &= \frac{2.79 \text{ tm Ulexite 40}}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ tm mol Ulexite 40}}{405.241 \text{ tm Ulexite 40}} * \frac{1 \text{ tm mol NaCaB}_5\text{O}_9}{1 \text{ tm mol Ulexite 40}} * \\ &\frac{2 \text{ tm mol H}_3\text{BO}_3}{2 \text{ tm mol NaCaB}_5\text{O}_9} * \frac{61.8324 \text{ tm H}_3\text{BO}_3}{1 \text{ tm mol H}_3\text{BO}_3} = 0.43 \text{ tm/h H}_3\text{BO}_3 \end{aligned}$$

4) Sulfato de Zinc Heptahidratado:

De acuerdo a la estequiometría de la reacción para la fabricación del borato de zinc, la cantidad de sulfato de zinc heptahidratado que se requiere para reaccionar con 1.40 tm/h de tetraborato de sodio será:

$$\begin{aligned} \text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} &= \frac{1.40 \text{ tm Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ tm mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{201.2194 \text{ tm Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \frac{1 \text{ tm mol ZnSO}_4}{1 \text{ tm mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \\ &\frac{1 \text{ tm mol ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}}{1 \text{ tm mol ZnSO}_4} * \frac{287.5480 \text{ tm ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}}{1 \text{ tm mol ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} = \frac{2.00 \text{ tm/h}}{\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} \end{aligned}$$

5) Agua:

A partir de los resultados de solubilidad de la ulexita en agua, que se presentan en la Tabla B.5, se tiene que se necesitan 35 mL de agua por cada 5 gramos de material. Entonces el agua que se requiere para el proceso es:

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{2.79 \text{ tm Ulex}}{1 \text{ hora}} * \frac{35 \text{ mL H}_2\text{O}}{5.0 * 10^{-6} \text{ tm Ulex}} * \frac{9.97 * 10^{-7} \text{ tm H}_2\text{O}}{1 \text{ mL H}_2\text{O}} = \frac{19.47 \text{ tm/h}}{\text{H}_2\text{O}}$$

* **BALANCE DE MASA PARA CADA ETAPA DEL PROCESO**

El balance de masa para cada una de las etapas se resume en la siguiente ecuación:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

1. **Mezclado de las materias primas:**

En esta etapa el balance de masa se desarrolla alrededor del tanque de mezclado, para el cual se tiene:

Entradas							=	Salidas
Ulexite 40	+ Na ₂ CO ₃	+ Agua	+ Agua de recirculación 1	+ Agua de recirculación 2	+ Agua de lavado recirculada	=	Mezcla Inicial	
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)		(G)	

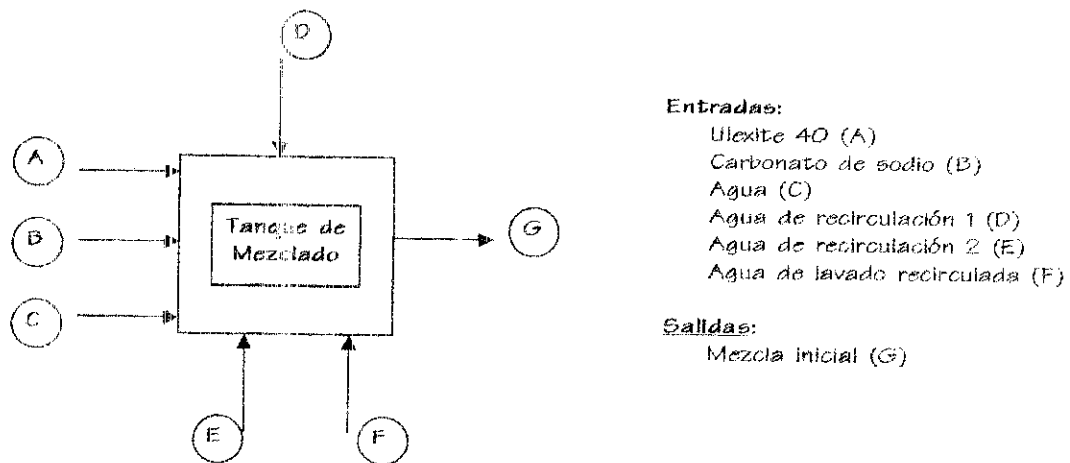


Figura C.1 Diagrama del Balance de Materia para la Etapa de Mezclado de las Materias Primas

Despejando para la mezcla inicial se tiene:

Mezcla inicial (G) =

$$2.79 \text{ tm/h} + 0.73 \text{ tm/h} + 6.53 \text{ tm/h} + 6.27 \text{ tm/h} + 3.15 \text{ tm/h} + 1.52 \text{ tm/h} = 22.99 \text{ tm/h}$$

2. Reacción para obtener tetraborato de sodio:

En esta etapa el balance de masa se desarrolla alrededor del reactor, para el cual se tiene:

Entradas	=	Salidas	
Mezcla Inicial (G)	=	Agua evaporada 1 (H)	+ Suspensión de reacción 1 (I)

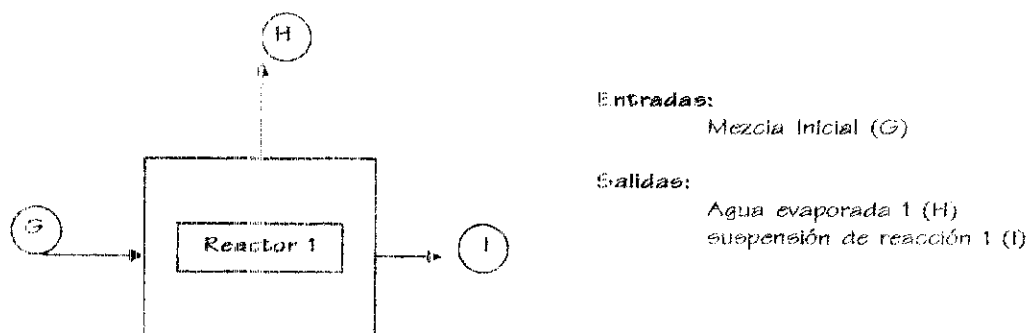


Figura C.2 Diagrama del Balance de Materia para la Etapa de Reacción para obtener Tetraaborato de Sodio

El agua evaporada 1 (H) corresponde al 40% del agua total en la entrada, entonces:

$$\text{Agua evaporada 1 (H)} = 0.4 * (19.47 \text{ tm/h}) = 7.79 \text{ tm/h}$$

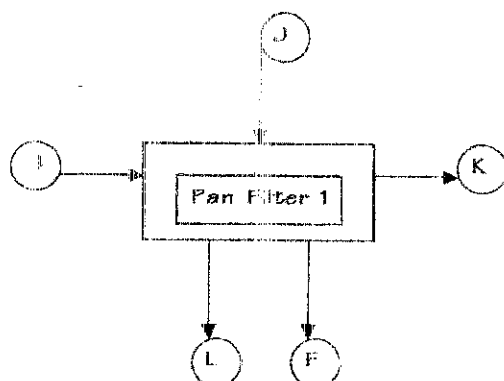
De esto se tiene que la suspensión de reacción 1 que sale será:

$$\text{Suspensión de reacción 1 (I)} = 22.99 \text{ tm/h} - 7.79 \text{ tm/h} = 15.20 \text{ tm/h}$$

3. Separación del carbonato de sodio y sólidos insolubles

En esta etapa el balance de masa se desarrolla alrededor del pan filter 1, para el cual se tiene:

Entradas		=	Salidas					
Suspensión de reacción 1 (I)	+	Agua de lavado 1 (J)	=	Residuo insoluble (K)	+	Solución clarificada (L)	+	Agua de lavado recirculada (F)

**Entradas:**

Suspensión de reacción 1 (I)
 Agua de lavado 1 (J)

Salidas:

Residuo insoluble (K)
 Solución clarificada (L)
 Agua de lavado recirculada (F)

Figura C.25 Diagrama del Balance de Materia para la Etapa de Separación del Carbonato de Calcio y Sólidos Insolubles

El agua de lavado corresponde al 10% del flujo de la suspensión de reacción. Por lo tanto se tiene:

$$\text{Agua de lavado (J)} = 0.1 * (15.20 \text{ tm/h}) = 1.52 \text{ tm/h}$$

El residuo insoluble está formado por carbonato de calcio precipitado debido a la reacción; el material insoluble propio de la materia prima; y el agua que retienen los sólidos durante la filtración. La cantidad de carbonato de calcio se determina por medio de la estequiometría de la reacción de la siguiente manera:

$$\text{CaCO}_3 = \frac{2.79 \text{ tm Ulexite 40}}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ tm mol Ulexite 40}}{405.241 \text{ tm Ulexite 40}} * \frac{1 \text{ tm mol NaCaB}_5\text{O}_9}{1 \text{ tm mol Ulexite 40}} * \frac{4 \text{ tm mol CaCO}_3}{4 \text{ tm mol NaCaB}_5\text{O}_9} * \frac{100.0894 \text{ tm Na}_2\text{CO}_3}{1 \text{ tm mol CaCO}_3} = 0.69 \text{ tm/h CaCO}_3$$

Al material insoluble corresponde 0.96 tm/h. Según los resultados experimentales de la Tabla B.20, el residuo insoluble en esta filtración sale con un 11.48% de humedad respecto del flujo total de entrada al filtro:

$$\begin{aligned}\text{Humedad de la torta} &= 0.1148 * (15.20 \text{ tm/h} + 1.52 \text{ tm/h}) \\ &= 1.92 \text{ tm/h}\end{aligned}$$

Entonces el total de residuo insoluble que sale será:

$$\begin{aligned}\text{Residuo insoluble (K)} &= 0.69 \text{ tm/h} + 0.96 \text{ tm/h} + 1.92 \text{ tm/h} \\ &= 3.57 \text{ tm/h}\end{aligned}$$

Por lo tanto, la solución clarificada que sale será:

$$\begin{aligned}\text{Solución clarificada (L)} &= 15.20 \text{ tm/h} + 1.52 \text{ tm/h} - 3.57 \text{ tm/h} - 1.52 \text{ tm/h} \\ &= 11.53 \text{ tm/h}\end{aligned}$$

4. Neutralización de la solución clarificada

En esta etapa el balance de masa se desarrolla alrededor del tanque de neutralización, para el cual se tiene:

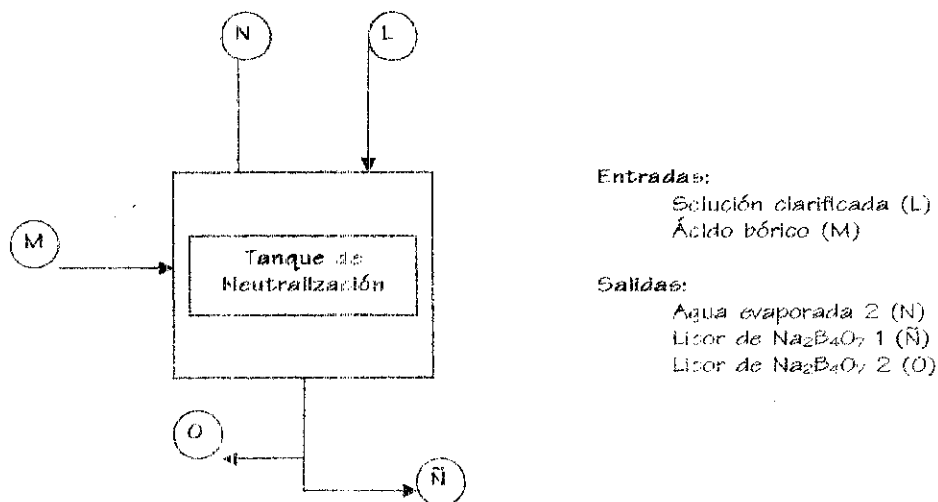


Figura C.4 Diagrama del Balance de Materia para la Etapa de Neutralización de la Solución Clarificada

Entradas		=	Salidas					
Solución clarificada	+	Ácido bórico	=	Agua evaporada 2	+	Licor de tetraborato de sodio 1	+	Licor de tetraborato de sodio 2
(L)		(M)		(N)		(Ñ)		(O)

El agua evaporada corresponde al 40% del agua total en la entrada, entonces:

$$\text{Agua evaporada 2 (N)} = 0.4 * (9.76 \text{ tm/h}) = 3.90 \text{ tm/h}$$

El licor total de tetraborato que se obtiene después de la neutralización será:

$$\begin{aligned} \text{Licor total de Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 &= 11.63 \text{ tm/h} + 0.43 \text{ tm/h} - 3.90 \text{ tm/h} \\ &= 8.16 \text{ tm/h} \end{aligned}$$

En la salida del tanque, el licor total de tetraborato de sodio se divide en dos corrientes. La primera corriente, licor de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 1, es de la que se obtiene el tetraborato de sodio como producto final. La segunda corriente, licor de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 2, continua con el proceso para la fabricación del borato de zinc. Se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} \text{Licor de} \\ \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ 1} \\ \text{(Ñ)} \end{array} = 0.68 \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 * \frac{8.16 \text{ tm/h Licor total Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{2.08 \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} = 2.67 \text{ tm/h Licor de Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ 1}$$

$$\begin{array}{l} \text{Licor de} \\ \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ 2} \\ \text{(O)} \end{array} = 1.40 \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 * \frac{8.16 \text{ tm/h Licor total Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{2.08 \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} = 5.49 \text{ tm/h Licor de Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \text{ 2}$$

5. Reacción para obtener borato de zinc

En esta etapa el balance de masa se desarrolla alrededor del primer reactor de la batería en cascada, para el cual se tiene:

Entradas		=	Salidas
Licor de tetraborato de sodio 2 (O)	+	Sulfato de Zinc Heptahidratado (Q)	= Suspensión de reacción 2 (R)

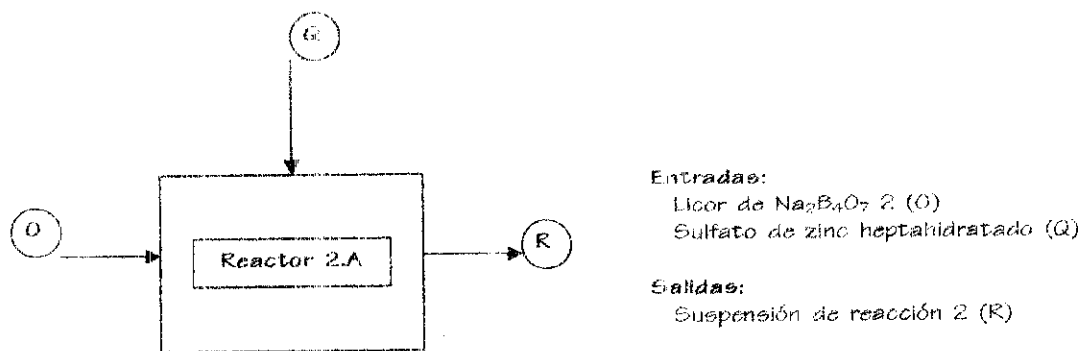


Figura C.5 Diagrama del Balance de Materia para la Etapa de Reacción para obtener Borato de Zinc

Despejando para la suspensión de reacción 2 se tiene:

$$\text{Suspensión de reacción 2 (R)} = 5.49 \text{ tm/h} + 2.00 \text{ tm/h} = 7.49 \text{ tm/h}$$

6. Separación del borato de zinc

En esta etapa el balance de masa se desarrolla alrededor del pan filter 2, para el cual se tiene:

Entradas		=	Salidas
Suspensión de reacción 2 (R)	+	Agua de lavado 2 (P)	= Licor Final (S) + Sólidos de filtración (T)

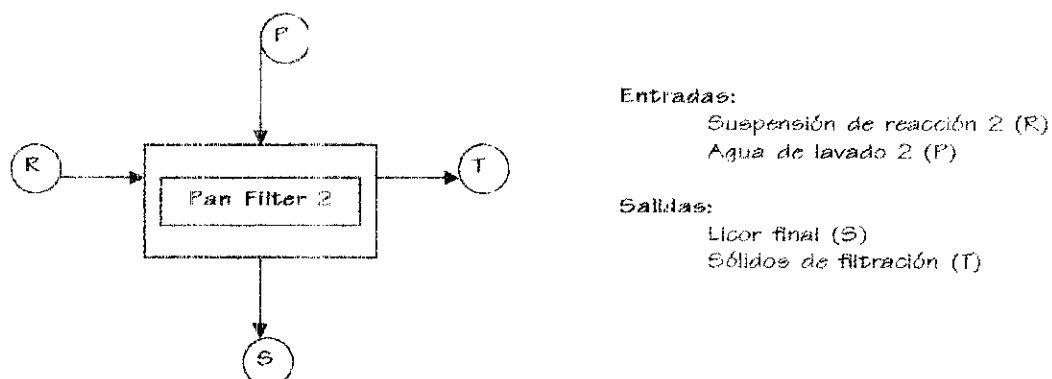


Figura C.6 Diagrama del Balance de Materia para la Etapa de Separación del Borato de Zinc

El agua de lavado corresponde al 10% del flujo de la suspensión de reacción 2:

$$\text{Agua de lavado 2 (P)} = 0.1 * (7.49 \text{ tm/h}) = 0.75 \text{ tm/h}$$

Los sólidos de filtración están formados por el borato de zinc y el agua que retiene durante la filtración. La cantidad de borato de zinc se determina por medio de la estequiometría de la reacción, de la siguiente manera:

$$\text{ZnOB}_2\text{O}_3 = \frac{1.40 \text{ tm Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{1 \text{ hora}} * \frac{1 \text{ tm mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7}{201.2194 \text{ tm Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} * \frac{1 \text{ tm mol ZnOB}_2\text{O}_3}{1 \text{ tm mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} *$$

$$\frac{150.9996 \text{ tm ZnOB}_2\text{O}_3}{1 \text{ tm mol ZnOB}_2\text{O}_3} = 1.05 \text{ tm/h ZnOB}_2\text{O}_3$$

Según los resultados experimentales de la Tabla B.21 el borato de zinc en esta filtración sale con un 10.44% de humedad con respecto al flujo total que entra al filtro:

$$\text{Humedad de la torta} = 0.1044 * (7.49 \text{ tm/h} + 0.75 \text{ tm/h}) = 0.86 \text{ tm/h}$$

Entonces el total de sólidos de filtración que sale será:

$$\text{Sólidos de filtración (T)} = 1.05 \text{ tm/h} + 0.86 \text{ tm/h} = 1.91 \text{ tm/h}$$

Por lo tanto, el licor final que sale será:

$$\text{Licor final (S)} = 7.49 \text{ tm/h} + 0.75 \text{ tm/h} - 1.91 \text{ tm/h} = 6.33 \text{ tm/h}$$

7. Obtención de borato de zinc

En esta etapa el balance de masa se desarrolla alrededor del secador rotatorio, para el cual se tiene:

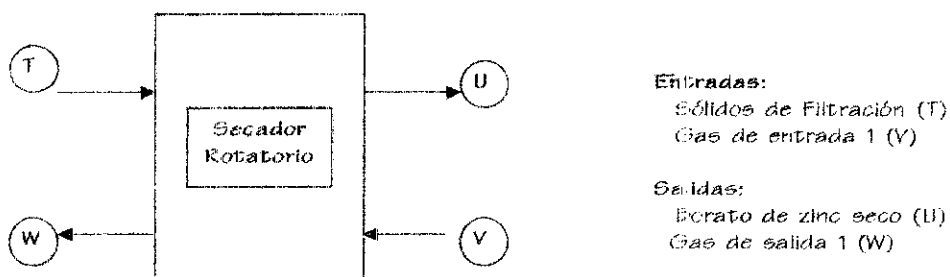


Figura C.7 Diagrama del Balance de Materia para la Etapa de Obtención de Borato de Zinc

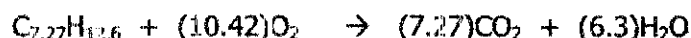
Entradas		=	Salidas	
Sólidos de filtración (T)	+ Gas de entrada 1 (V)	=	Borato de zinc seco (U)	+ Gas de salida 1 (W)

Por su fácil adaptabilidad al tipo de proceso y su bajo costo, se escogió diesel como combustible. De acuerdo a la literatura, este se encuentra clasificado como un aceite combustible No. 2, compuesto de un 87.3 % de carbono y un 12.6 % de hidrógeno. Al asumir una base de 100 Kg de combustible se tiene:

$$\text{Kmoles de C} = 100 \text{ Kg diesel} * \frac{87.2 \text{ Kg C}}{100 \text{ Kg diesel}} * \frac{1 \text{ Kmol C}}{12 \text{ Kg C}} = 7.27 \text{ Kmol C}$$

$$\text{Kmoles de H} = 100 \text{ Kg diesel} * \frac{12.6 \text{ Kg H}}{100 \text{ Kg diesel}} * \frac{1 \text{ Kmol H}}{1 \text{ Kg H}} = 12.6 \text{ Kmol H}$$

Los 100 Kg de combustible están representados por la fórmula empírica $C_{7.27}H_{12.6}$, y se tiene que la reacción de combustión es:



El calor de combustión para este combustible es 45475.37 kJ/Kg.

Para disminuir la temperatura de los gases de combustión a 400°C, estos se mezclarán con aire a temperatura ambiente. De acuerdo a datos proporcionados por el INSIVUMEH, la temperatura media para el lugar de la planta es de 25°C y un 79% de humedad relativa. En estas condiciones se tiene que el aire posee 2.7389 Kmoles de agua por cada 100 Kmoles de aire seco.

El aire necesario para la combustión y el empleado para la disminución de la temperatura, se calculan de la siguiente manera:

Compuesto	Kmoles en la entrada	Kmoles en la salida
$C_{7.27}H_{12.6}$	1	0
O_2	x	x - 10.42
CO_2	0	7.27
H_2O	$(2.7389/21)x$	$(2.7389/21)x + 6.3$
N_2	$(79/21)x$	$(79/21)x$

Además se tiene que la temperatura del combustible en la entrada antes de la combustión será de 25°C y la temperatura deseada para la entrada del secador sea de 400°C. Por lo tanto, se tiene un cambio de temperatura de 375°C.

Se hará un balance de energía para determinar los kmoles de oxígeno en la entrada (x), y a partir de este, se calcularán los kmoles de los otros componentes de los gases de combustión que depende de x. Asumiendo un 15% de pérdidas de calor en la cámara de combustión, se tiene:

$$\text{Calor de combustión} * 0.85 = \sum m C_p \Delta T$$

Los valores de C_p para el intervalo de temperatura (25 – 400)°C se encuentran en la tabla A.4. Entonces si se sustituyen los valores correspondientes y resolviendo se obtiene:

$$x = 18.0114 \text{ Kmol } O_x \text{ entrando a la cámara de combustión}$$

Así, al tomar como base 1 Kmol de combustible quemado se tiene:

Compuesto	Kmoles	Porcentaje Molar	Peso (Kg)
O ₂	7.59	8.32 %	242.88
CO ₂	7.27	7.96 %	319.88
H ₂ O	8.65	9.48 %	155.70
N ₂	67.76	74.24 %	1897.28
Total	91.27	100.00 %	2615.74

Ya con esto se puede realizar el balance de masa correspondiente, para lo cual se tomará como base 1 kmol de gas entrante, entonces:

$$\text{Gas seco} = 1 - 0.0948 = 0.9052 \text{ Kmol}$$

El flujo correspondiente a los sólidos secos es de 1.05 tm/h de borato de zinc seco. El borato de zinc presenta las siguientes condiciones de humedad:

$$X_{\text{Entrada}} = \frac{45 \text{ tm/h H}_2\text{O}}{(100 - 45) \text{ tm/h ZnOB}_2\text{O}_3} = 0.8182$$

$$X_{\text{Salida}} = \frac{1 \text{ tm/h H}_2\text{O}}{(100 - 1) \text{ tm/h ZnOB}_2\text{O}_3} = 0.0101$$

La temperatura del borato de zinc en la entrada será de 80°C y la de salida será 115°C.

El peso molecular promedio del gas está dado por:

$$\text{Peso promedio del gas seco} = \frac{0.0832 * 32 + 0.0796 * 44 + 0.7424 * 28}{0.9052 \text{ Kmol}} = 29.77 \text{ Kg/Kmol}$$

El gas entrará al secador a 400°C y presenta la siguiente condición de humedad:

$$Y_{\text{Entrada}} = \frac{0.0948 * 18}{0.9052 * 29.77} = 0.06332 \text{ Kg de agua / Kg gas seco}$$

El balance de masa también se puede representar por medio del siguiente balance de humedad:

$$Ss (X_{\text{Entrada}} - X_{\text{Salida}}) = Gs (Y_{\text{Salida}} - Y_{\text{Entrada}})$$

donde Ss representa la masa de borato de zinc seco por hora y Gs la masa de gases de combustión secos por hora. Además se tiene que X corresponde a la masa de humedad por masa de borato de zinc seco en la entrada y en la salida respectivamente. De igual forma, Y corresponde a la masa de humedad por masa de gas seco.

Para determinar la humedad con que saldrá el gas, así como el flujo de gas necesario para el secado se va a desarrollar el balance de entalpía, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$Ss (H'_{S\text{Entrada}} - H'_{S\text{Salida}}) = Gs (H'_{G\text{Salida}} - H'_{G\text{Entrada}}) + Q$$

Aquí, H'_S se refiere a la entalpía del sólido y H'_G a la del aire. Las pérdidas caloríficas se representan por Q .

El gas seco entrará a una temperatura de 400°C y saldrá a 60°C. Entonces tomado como temperatura de referencia 0°C se tiene:

- El C_p promedio del gas seco en la entrada será 1.034 kJ/Kg °C y en la salida 0.977 kJ/Kg °C.
- El C_p del agua en la entrada será 2.000 kJ/Kg °C y en la salida 1.950 kJ/Kg °C.
- El calor latente del agua a 0°C es 2502.3 kJ/Kg.

Si se sustituyen los valores correspondientes se tiene:

$$\begin{aligned} H'_{G\text{Entrada}} &= (1.034 + 2.000 * 0.0533) (400) + 2502.3 * 0.0633 \\ &= 622.65 \text{ kJ/Kg de gas seco} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H'_{G\text{Salida}} &= (0.977 + 1.9500 * Y_{\text{Salida}}) (60) + 2502.3 Y_{\text{Salida}} \\ &= 58.62 + 2619.3 Y_{\text{Salida}} \end{aligned}$$

La capacidad calorífica del borato de zinc es 0.7648 kJ/Kg°C y la del agua es 4.187 kJ/Kg°C. Para los sólidos se tiene:

$$\begin{aligned} H'_{S\text{Entrada}} &= 0.7648 (80 - 0) + 0.8182 * 4.187 (80 - 0) \\ &= 335.25 \text{ kJ/Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H'_{S\text{Salida}} &= 0.7648 (115 - 0) + 0.0101 * 4.187 (115 - 0) \\ &= 92.82 \text{ kJ/Kg} \end{aligned}$$

Las pérdidas caloríficas se van a considerar como del 15% del calor en el gas entrante:

$$Q = 0.15 (688.68) G_S = 103.30 G_S$$

Al sustituir los valores correspondientes en el balance de humedad y el balance de entalpía se tiene:

- El balance de humedad será:

$$1050 (0.8182 - 0.010) = G_s (Y_{\text{Salida}} - 0.0633)$$

- El balance de entalpía será:

$$1050 (335.25 - 92.82) = G_s [513.62 + 2619.3 Y_{\text{Salida}} - 622.65] + 103.30 G_s$$

Entonces resolviendo simultáneamente estas ecuaciones se obtiene:

$$\text{Flujo de Gas seco} = G_s = 6671.46 \text{ kg/h} = 6.67 \text{ tm/h}$$

$$Y_{\text{Salida}} = 0.1905 \text{ Kg de agua / Kg gas seco}$$

Ya con esto se tiene que los flujos de gas en la entrada y en la salida del secador serán:

$$\begin{array}{l} \text{Gas de} \\ \text{entrada 1} \\ \text{(V)} \end{array} = \frac{6.67 \text{ tm gas}}{1 \text{ hora}} + \frac{6.67 \text{ tm gas}}{1 \text{ hora}} * \frac{0.0633 \text{ tm agua}}{1 \text{ tm gas seco}} = 7.09 \text{ tm/h gas}$$

$$\begin{array}{l} \text{Gas de} \\ \text{salida 1} \\ \text{(W)} \end{array} = \frac{6.66 \text{ tm gas}}{1 \text{ hora}} + \frac{6.66 \text{ tm gas}}{1 \text{ hora}} * \frac{0.2157 \text{ tm agua}}{1 \text{ tm gas seco}} = 7.94 \text{ tm/h gas}$$

Por último, se calcula el consumo de diesel necesario de la siguiente manera:

$$\text{Diesel} = \frac{6671.46 \text{ Kg gas seco}}{1 \text{ hora}} * \frac{99.8 \text{ Kg diesel}}{(2615.2 - 155.70) \text{ Kg gas seco}} * \frac{1 \text{ gal diesel}}{3.27 \text{ Kgl diesel}} = 82.77 \text{ gal/h diesel}$$

estas condiciones se tiene que el aire posee 2.7389 Kmoles de agua por cada 100 Kmoles de aire seco.

El aire necesario para la combustión y el empleado para la disminución de la temperatura, se calculan de la siguiente manera:

Compuesto	Kmoles en la entrada	Kmoles en la salida
C_3H_8	1	0
O_2	x	x - 5
CO_2	0	3
H_2O	$(2.7389/21)x$	$(2.7389/21)x + 4$
N_2	$(79/21)x$	$(79/21)x$

Además se tiene que la temperatura del combustible en la entrada antes de la combustión será de 25°C y la temperatura deseada para la entrada del secador sea de 600°C. Por lo tanto, se tiene un cambio de temperatura de 575°C.

Se hará un balance de energía para determinar los kmoles de oxígeno en la entrada (x), y a partir de éste, se calcularán los kmoles de los otros componentes de los gases de combustión que depende de x. Al asumir un 15% de pérdidas de calor en la cámara de combustión, se tiene:

$$\text{Calor de combustión} * 0.85 = \sum m C_p \Delta T$$

Los valores de C_p para el intervalo de temperatura (25 - 600)°C se encuentran en la tabla A.5. Entonces sustituyendo los valores correspondientes y al resolver se obtiene:

$$x = 1.9.54 \text{ Kmol } O_2 \text{ que entra a la cámara de combustión}$$

Entonces, al tomar como base 1 Kmol de combustible quemado se tiene la siguiente composición de los gases de combustión:

Compuesto	Kmoles	Porcentaje Molar	Peso (Kg)
O ₂	14.54	14.90%	465.28
CO ₂	3.00	3.07 %	132.00
H ₂ O	6.55	6.71 %	117.90
N ₂	73.51	75.32 %	2058.28
Total	97.60	100.00 %	2773.46

Ya con esto se puede realizar el balance de masa correspondiente, para lo cual se tomará como base 1 kmol de gas entrante, entonces:

$$\text{Gas seco} = 1 - 0.0671 = 0.9329 \text{ Kmol}$$

El flujo correspondiente a los sólidos secos es de 0.69 tm/h de tetraborato de sodio seco. El tetraborato de sodio presenta las siguientes condiciones de humedad:

$$X_{\text{Entrada}} = \frac{74.53 \text{ tm/h H}_2\text{O}}{(100 - 74.53) \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} = 2.9262$$

$$X_{\text{Salida}} = \frac{1 \text{ tm/h H}_2\text{O}}{(100 - 1) \text{ tm/h Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} = 0.0101$$

La temperatura del tetraborato de sodio en la entrada será de 80°C y la de salida será 115°C.

El peso molecular promedio del gas está dado por:

$$\text{Peso promedio del gas seco} = \frac{0.1490 \cdot 32 + 0.0307 \cdot 44 + 0.7532 \cdot 28}{0.9329 \text{ Kmol}} = 29.16 \text{ Kg/Kmol}$$

El gas entrará al secador a 600°C que presenta la siguiente condición de humedad:

$$Y_{\text{Entrada}} = \frac{0.0671 \cdot 18}{0.9329 \cdot 29.16} = 0.0444 \text{ Kg de agua / Kg gas seco}$$

El balance de masa también se puede representar por medio del siguiente balance de humedad:

$$S_s (X_{\text{Entrada}} - X_{\text{Salida}}) = G_s (Y_{\text{Salida}} - Y_{\text{Entrada}})$$

donde, S_s representa la masa de tetraborato de sodio seco por hora y G_s la masa de gases de combustión secos por hora. Además se tiene que X corresponde a la masa de humedad por masa de tetraborato de sodio seco en la entrada y en la salida respectivamente. De igual forma, Y corresponde a la masa de humedad por masa de gas seco.

Para determinar la humedad con que saldrá el gas, así como el flujo de gas necesario para el secado se va a desarrollar el balance de entalpía, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$S_s (H'_{S\text{Entrada}} - H'_{SS\text{Salida}}) = G_s (H'_{G\text{Salida}} - H'_{G\text{Entrada}}) + Q$$

Aquí, H'_s se refiere a la entalpía del sólido y H'_G a la del aire. Las pérdidas caloríficas se representan por Q .

El gas seco entrará a una temperatura de 600°C y saldrá a 76°C. Entonces tomado como temperatura de referencia 0°C se tiene:

- El C_p promedio del gas seco en la entrada será 1.1274 kJ/Kg °C y en la salida 1.0512 kJ/Kg °C.
- El C_p del agua en la entrada será 2.0328 kJ/Kg °C y en la salida 1.9517 kJ/Kg °C.
- El calor latente del agua a 0°C es 2502.3 kJ/Kg.

Al sustituir los valores correspondientes se tiene:

$$\begin{aligned} H'_{G\text{Entrada}} &= (1.1274 + 2.0328 * 0.0444) (600) + 2502.3 * 0.0444 \\ &= 841.70 \text{ kJ/Kg de gas seco} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H'_{G\text{Salida}} &= (1.0512 + 1.9517 * Y_{\text{Salida}}) (70) + 2502.3 Y_{\text{Salida}} \\ &= 73.58 + 2638.92 Y_{\text{Salida}} \end{aligned}$$

La capacidad calorífica del tetraóxido de sodio es 0.9939 kJ/Kg°C y la del agua es 4.187 kJ/Kg°C. Para los sólidos se tiene:

$$\begin{aligned} H'_{\text{Entrada}} &= 0.9939 (80 - 0) + 2.9262 * 4.187 (80 - 0) \\ &= 1059.67 \text{ kJ/Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H'_{\text{Salida}} &= 0.9939 (115 - 0) + 0.0101 * 4.187 (115 - 0) \\ &= 119.16 \text{ kJ/Kg} \end{aligned}$$

Las pérdidas caloríficas se van a considerar como del 15% del calor en el gas entrante:

$$Q = 0.15 (813.79) G_s = 122.07 G_s$$

Al sustituir los valores correspondientes en el balance de humedad y el balance de entalpía se tiene:

- El balance de humedad será:

$$680 (2.9262 - 0.0101) = G_s (Y_{\text{Salida}} - 0.0444)$$

- El balance de entalpía será:

$$680 (1059.67 - 119.16) = G_s [73.58 + 2638.92 Y_{\text{Salida}} - 841.70] + 122.07 G_s$$

Así, al resolver simultáneamente estas ecuaciones se obtiene:

$$\text{Flujo de Gas seco} = G_s = 8684.93 \text{ kg/h} = 8.68 \text{ tm/h}$$

$$Y_{\text{Salida}} = 0.2727 \text{ Kg de agua / Kg gas seco}$$

Ya con esto se tiene que los flujos de gas en la entrada y en la salida del spray dryer serán:

$$\begin{array}{l} \text{Gas de} \\ \text{entrada 2} \\ \text{(t)} \end{array} = \frac{8.68 \text{ tm gas}}{1 \text{ hora}} + \frac{8.68 \text{ tm gas}}{1 \text{ hora}} * \frac{0.0444 \text{ tm agua}}{1 \text{ tm gas seco}} = 9.06 \text{ tm/h} \\ \text{gas}$$

$$\text{Gas de salida} = \frac{8.62 \text{ tm gas}}{1 \text{ hora}} + \frac{8.62 \text{ tm gas}}{1 \text{ hora}} * \frac{0.2668 \text{ tm}}{1 \text{ tm gas seco}} = \frac{17.24 \text{ tm gas} + 2.28 \text{ tm agua}}{1 \text{ hora}} = 11.04 \text{ tm/h gas}$$

Por último, se tiene que el consumo de gas propano será:

$$\text{Gas propano} = \frac{8684.93 \text{ Kg}}{1 \text{ hora}} + \frac{1 \text{ kmol}}{(2773.46 - 117.90) \text{ Kg gas seco}} * \frac{44 \text{ Kg}}{1 \text{ kmol}} = 143.90 \text{ Kg/h propano}$$

ANEXO D

BALANCE DE ENERGÍA

A partir del siguiente balance de energía se deriva la cantidad de calor que se debe aplicar a cada una de las etapas del proceso.

1. Mezclado de las materias primas:

En esta etapa el balance de energía se desarrolla alrededor del tanque de mezclado, para el cual se tiene:

Calor de entrada			=	Calor de Salida		
Calor de la materia prima (1)	+	Calor del agua recirculada (2)	+	Calor aplicado (3)	=	Calor de la Mezcla Inicial (4)

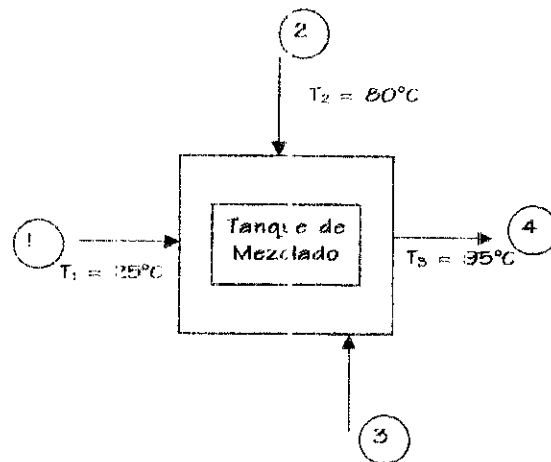


Figura D.1 Diagrama del Balance de Energía para la Etapa de Mezclado de las Materias Primas

Al despejar para el calor aplicado se tiene:

$$Q_{\text{aplicado}} (3) = Q_{\text{Mezcla Inicial}} (4) - Q_{\text{Materia Prima}} (1) - Q_{\text{Agua recirculada}} (2)$$

Se tomará como temperatura de referencia 25°C. Entonces, $Q_{\text{Materia Prima (1)}} = 0$ y se tendrá:

$$Q_{\text{aplicado (3)}} = Q_{\text{Mezcla inicial (4)}} - Q_{\text{Agua recirculada (2)}}$$

donde, el $Q_{\text{Mezcla inicial (4)}}$ está dado por $Q_{\text{Materia prima}} + Q_{\text{Agua recirculada}}$.

Si se sustituyen los valores se tiene:

$$Q_{\text{aplicado (3)}} =$$

$$\begin{aligned} & [2.79 * 1357.22 + 0.73 * 603.32 + 8.53 * 4187] * (95 - 25) \\ & + [10.94 * 4187] * (95 - 25) - [10.94 * 4187] * (95 - 80) \\ & = 276634.52 \text{ kJ/h} \end{aligned}$$

2. Reacción para obtener tetraborato de sodio:

En esta etapa el balance de energía se desarrolla alrededor del reactor 1, para el cual se tiene:

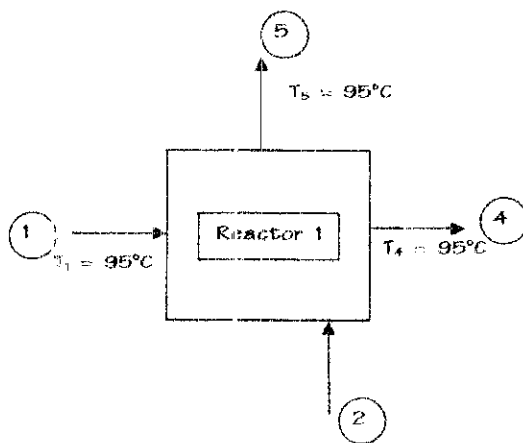


Figura D.2 Diagrama del Balance de Energía para la Etapa de Reacción para obtener Tetraborato de Sodio

Calor de entrada			=	Calor de Salida				
Calor de la mezcla inicial (1)	+	Calor aplicado (2)	+	Calor de reacción a 95°C (3)	=	Calor de la Suspensión de reacción 1 (4)	+	Calor del agua evaporada 1 (5)

Al despejar para el calor aplicado se tiene:

$$Q_{\text{aplicado}} (2) = Q_{\text{Suspensión de reacción 1}} (4) + Q_{\text{Agua evaporada}} (5) - Q_{\text{Mezcla inicial}} (1) - Q_{\text{Reacción a 95°C}} (3)$$

Se tomará como temperatura de referencia 95°C. Entonces, $Q_{\text{Suspensión de reacción 1}} (4) = Q_{\text{Agua evaporada}} (5) = Q_{\text{Mezcla inicial}} (1) = 0$ y se tendrá:

$$Q_{\text{aplicado}} (2) = - Q_{\text{Reacción a 95°C}} (3) = - (H_{\text{Productos}} + H_{\text{Reactivos}} + \Delta H^{\circ}_{25^{\circ}\text{C}})$$

El $\Delta H^{\circ}_{25^{\circ}\text{C}}$ para la reacción es -30.02 kJ/h. Si se sustituyen los valores correspondientes se tiene:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{aplicado}} (2) = & \\
 - & [1.73 * 993.942 + 0.14 * 1487.61 + 0.69 * 834.25] * (95 - 25) \\
 & [2.79 * 1357.22 + 0.73 * 603.321 + 0.03 * 4187] * (25 - 95) \\
 & - 30.02 = 129472.15 \text{ KJ/h}
 \end{aligned}$$

3. Neutralización de la solución clarificada:

En esta etapa el balance de energía se desarrolla alrededor del tanque de neutralización, para el cual se tiene:

Calor de entrada				=	Calor de Salida	
Calor de la solución clarificada	+	Calor del ácido bórico	+	Calor aplicado	+	Calor de neutralización a 95°
(1)		(2)		(3)		(4)
					=	Calor del licor de tetraborato de sodio
						+
						Calor del agua evaporada
						2
						(6)

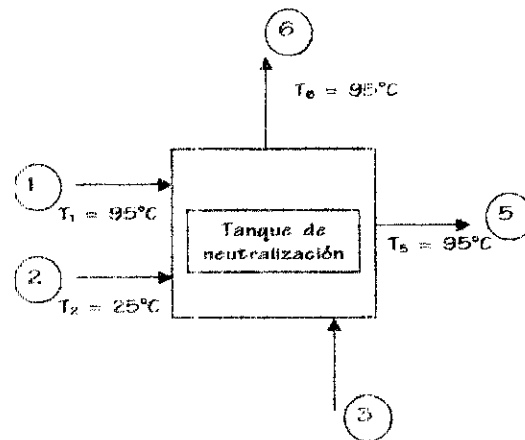


Figura D.3 Diagrama de Balance de Energía para la Etapa de Neutralización de la Solución Clarificada

Al despejar para el calor aplicado se tiene:

$$Q_{\text{aplicado}} (3) = Q_{\text{Licor de tetraborato de sodio}} (5) + Q_{\text{Agua evaporada}} (6) - Q_{\text{Solución clarificada}} (1) - Q_{\text{Ácido bórico}} (2) - Q_{\text{Neutralización a 95°C}} (4)$$

Se tomará como temperatura de referencia 95°C. Entonces, $Q_{\text{Licor de tetraborato de sodio}} (5) = Q_{\text{Agua evaporada}} (6) = Q_{\text{Solución clarificada}} (1) = 0$, y se tendrá:

$$\begin{aligned} Q_{\text{aplicado}} (3) &= - [Q_{\text{Ácido bórico}} (2) + Q_{\text{Neutralización a 95°C}} (4)] \\ &= - [Q_{\text{Ácido bórico}} (2) + H_{\text{Productos}} + H_{\text{Reactivos}} + \Delta H^{\circ}_{25^{\circ}\text{C}}] \end{aligned}$$

El $\Delta H^{\circ}_{25^{\circ}\text{C}}$ para la neutralización es -5528.65 kJ/h. Si se sustituyen los valores correspondientes se tiene:

$Q_{\text{Aplicado}} (3) =$

$$\begin{aligned}
 & - \{ [0.43 * 1392.47] * (25 - 95) + \\
 & [2.08 * 993.24 + 0.22 * 4187] * (95 - 25) + \\
 & [0.14 * 1487.61 + 1.73 * 993.94 + 0.43 * 1392.47] * (25 - 95) \\
 & - 5528.65 \} = 15102.60 \text{ kJ/h}
 \end{aligned}$$

4. Reacción para obtener borato de zinc:

En esta etapa el balance de energía se desarrolla alrededor del primer reactor de la batería en cascada, para el cual se tiene:

Calor de entrada				=	Calor de Salida			
Calor del licor de tetraborato de sodio (1)	+	Calor del sulfato de zinc (2)	+	Calor aplicado (3)	+	Calor de reacción 95°C (4)	=	Calor de la suspensión de reacción 2 (5)

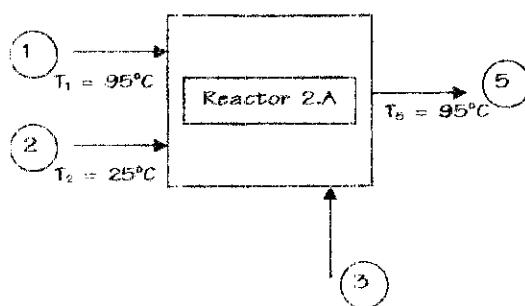


Figura D.4 Diagrama del Balance de Energía para la Etapa de Reacción para obtener Borato de Zinc

Si se despeja para el calor aplicado se tiene:

$$Q_{\text{aplicado}} (3) = Q_{\text{Suspensión de reacción 2}} (5) - Q_{\text{Licor de tetraborato de sodio}} (1) - \\ Q_{\text{Sulfato de zinc}} (2) - Q_{\text{Reacción a 95°C}} (4)$$

Se tomará como temperatura de referencia 95°C. Entonces, $Q_{\text{Suspensión de reacción 2}} (5) = Q_{\text{Licor de tetraborato de sodio}} (1) = 0$, y se tendrá:

$$Q_{\text{aplicado}} (3) = - [Q_{\text{Sulfato de zinc}} (2) + Q_{\text{Reacción a 95°C}} (4)] \\ = - [Q_{\text{Sulfato de zinc}} (2) + H_{\text{Productos}} + H_{\text{Reactivos}} + \Delta H^{\circ}_{25^{\circ}\text{C}}]$$

El $\Delta H^{\circ}_{25^{\circ}\text{C}}$ para la neutralización es -11.93 kJ/h . Si se sustituyen los valores correspondientes se tiene:

$$Q_{\text{aplicado}} (3) =$$

$$- \{ [2.00 * 344.95] * (25 - 95) + \\ [1.05 * 764.76 + 0.99 * 902.56 + 0.86 * 1392.47] * (95 - 25) + \\ [2.00 * 344.99 + 1.4 * 993.44 + 0.38 * 4187] * (25 - 95) \\ - 11.95 \} = -44980.68 \text{ kJ/h}$$

5. Obtención de borato de zinc

En esta etapa el balance de energía se desarrolla alrededor del secador rotatorio. Ver la sección correspondiente a esta etapa en el Anexo C. Las pérdidas caloríficas se consideran de la siguiente manera:

$$Q = 0.15 (688.68) 6671.46 = 689175.16 \text{ kJ/h}$$

⑥. Obtención de tetraborato de sodio

En esta etapa el balance de energía se desarrolla alrededor del spray dryer. Ver la sección correspondiente a esta etapa en el Anexo C. Las pérdidas caloríficas se consideran de la siguiente manera:

$$Q_l = 0.15 (813.79) 8684.93 = 1060156.38 \text{ kJ/h}$$

ANEXO E

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO

A partir del balance de masa (Anexo C) se procede a determinar la capacidad de los equipos involucrados, que es la base para su adecuado dimensionamiento.

1. Tanques:

En el proceso se usarán 6 tanques. El primer tanque sirve para mezclar las materias primas en el inicio del proceso. El segundo tanque es un reactor donde se llevará a cabo la reacción entre la ulexita y el carbonato de sodio. En el tercero se llevará a cabo la neutralización del hidróxido de sodio con ácido bórico. Por último, se tiene que los otros tres tanques formarán una batería de reactores en cascada, donde se llevará a cabo la reacción entre el tetraborato de sodio y el sulfato de zinc heptahidratado.

La capacidad de los tanques depende del flujo másico que reciben y el tiempo de residencia. Por lo tanto, la capacidad de operación se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Capacidad Tanque (m}^3\text{)} = \frac{\text{Tiempo de residencia (h)} * \text{Carga (tm/h)} * 1.2}{\text{Densidad de la carga (tm/m}^3\text{)}}$$

Se puede demostrar por medio de cálculo diferencial que para un cilindro de altura H y diámetro D con una plancha circular de fondo, las medidas que proporcionan el área superficial más pequeña (o sea la menor cantidad de material de construcción) son $H = (V/\pi)^{1/3}$ y $D = 2H$. Sin embargo, para obtener una buena agitación, la altura del líquido debe ser similar al diámetro del tanque entonces:

$$D = H$$

$$D = (4V/\pi)^{1/3}$$

donde V corresponde a la capacidad del tanque en m³.

Tabla E.1
Dimensionamiento de los tanques del proceso

	Tiempo de residencia (horas)	Carga (tm/h)	Densidad de la carga (tm/m ³)	Capacidad del tanque (m ³)	Altura del tanque (m)	Diámetro del tanque (m)
Tanque de Mezclado	0.5	22.99	1.12	12.32	2.50	2.50
Reactor 1	1.0	22.99	1.12	24.63	3.15	3.15
Tanque de Neutralización	0.5	11.63	1.06	6.58	2.03	2.03
Reactor 2.A	2.0	7.49	1.25	14.38	2.64	2.64
Reactor 2.B	2.0	7.49	1.25	14.38	2.64	2.64
Reactor 2.C	2.0	7.49	1.25	14.38	2.64	2.64

Los tanques deberán agitarse para obtener una buena mezcla de los componentes y evitar que las partículas suspendidas se asienten. Se recomienda usar para cada uno de los casos una turbina de 4 ó 6 aspas. Las proporciones típicas de diseño que se tienen para estos agitadores son:

$$\frac{D_{ei}}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{H}{D_t} = 1$$

$$\frac{E}{D_t} = 1$$

$$\frac{W}{D_s} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

donde:

D_a = Diámetro del rodete (m)

D_t = Diámetro del tanque (m)

H = Altura del líquido en el tanque (m)

J = Anchura de las placas deflectoras (m)

E = Altura del rodete sobre el fondo del tanque (m)

W = Anchura del rodete (m)

L = Largo del rodete (m)

Tabla E.2
Diseño y dimensionamiento de las turbinas de agitación
para cada uno de los tanques del proceso

	D_t (m)	H (m)	D_a (m)	J (m)	E (m)	W (m)	L (m)
Tanque de Mezclado	2.50	2.50	0.83	0.21	0.83	0.17	0.21
Reactor 1	3.15	3.15	1.05	0.26	1.05	0.21	0.26
Tanque de Neutralización	2.03	2.03	0.68	0.17	0.68	0.14	0.17
Reactor 2.A	2.64	2.64	0.88	0.22	0.88	0.18	0.22
Reactor 2.B	2.64	2.64	0.88	0.22	0.88	0.18	0.22
Reactor 2.C	2.64	2.64	0.88	0.22	0.88	0.18	0.22

Además se tiene que el consumo de potencia de la turbina está dado por:

$$P = \frac{N_p n^3 D_a^5 \rho}{g_c}$$

donde:

- P = Potencia (kW o HP)
- N_p = Número de potencia
- n = Velocidad de agitación (rev/s)
- D_a = Diámetro del rodete (m)
- ρ = Densidad (Kg/m^3)
- g_c = Factor de proporcionalidad de la ley de Newton

El número de potencia se obtiene a partir de las correlaciones existentes en la bibliografía entre este y el número de Reynolds. El número de Reynolds está dado por:

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 n \rho}{\mu}$$

donde:

- N_{Re} = Número de Reynolds
- μ = Viscosidad absoluta ($\text{Kg} / \text{m s}$)

Tabla E.3
Potencia requerida por las turbinas de agitación
para cada uno de los tanques del proceso

	D_a (m)	n (rev/s)	ρ (kg/m ³)	μ (Kg/m·s)	N_{Re}	N_p	P	
							kW	hP
Tanque de Mezclado	0.83	1.67	1120	$5.35 \cdot 10^{-4}$	$2.40 \cdot 10^6$	5.2	10.68	14.33
Reactor 1	1.05	1.25	1120	$5.35 \cdot 10^{-4}$	$2.88 \cdot 10^6$	5.2	14.52	19.46
Tanque de Neutralización	0.68	2.08	1060	$4.84 \cdot 10^{-4}$	$2.11 \cdot 10^6$	5.2	7.21	9.67
Reactor 2.A	0.88	1.25	1250	$4.89 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^6$	5.2	6.70	8.98
Reactor 2.B	0.88	1.25	1250	$4.89 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^6$	5.2	6.70	8.98
Reactor 2.C	0.88	1.25	1250	$4.89 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^6$	5.2	6.70	8.98

Además, se debe tomar en cuenta que para lograr obtener las velocidades de agitación será necesaria la instalación de motorreductores. A partir de datos encontrados en catálogos de esta clase de equipos se recomienda usar los siguientes parámetros:

Tabla E.4
Parámetros de los motorreductores de velocidad

	Velocidad de salida (rpm)	Velocidad de entrada (rpm)	Eficiencia	P	
				kW	hP
Tanque de Mezclado	100	1800	0.86	2.48	3.32
Reactor 1	75	1200	0.86	2.08	2.79
Tanque de Neutralización	125	1800	0.86	2.71	3.64
Reactor 2.A	75	1200	0.86	2.08	2.79
Reactor 2.B	75	1200	0.86	2.08	2.79
Reactor 2.C	75	1200	0.86	2.08	2.79

2. Bombas:

En el proceso se deben instalar bombas en lugares estratégicos. Las bombas centrífugas son una opción económica y confiable. La potencia de la bomba puede estimarse por medio de la siguiente ecuación:

$$P_{\text{Real}} = \frac{C Q \rho}{3.670 * 10^5 \eta}$$

donde;

- P_{Real} = Potencia (kW o hP)
- C = Carga total dinámica (m)
- Q = Capacidad (m^3/h)
- ρ = Densidad del líquido (Kg/m^3)
- η = Eficiencia de la bomba

La cabeza total dinámica se determina por medio de las curvas características para una bomba centrífuga presentadas en la literatura de acuerdo a la capacidad que se requiere. Además se asumirá que las bombas trabajan con un 65% de eficiencia.

Tabla E.5
Parámetros de diseño de las bombas del proceso

	Capacidad de operación (m^3/h)	Cabeza total dinámica (m)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Eficiencia	P_{Real}	
					kW	hP
Bomba 1	20.53	32.00	1120	65.0 %	3.08	4.14
Bomba 2	13.57	32.00	1120	65.0 %	2.04	2.73
Bomba 3	5.99	32.00	1250	65.0 %	1.00	1.35

3. Pan Filter:

Una de las características fundamentales para el diseño del equipo de separación es la determinación del área de filtración del mismo. El tamaño del filtro va a depender

fundamentalmente de la cantidad de sólidos en suspensión, así como de la presión a la que se opere.

A partir de los resultados experimentales de las gráficas B.5 y B.6 fue posible determinar la variación de la resistencia específica de la torta α respecto de la caída de presión, ΔP . Esto se representa por la siguiente ecuación:

$$\text{Log}_{10}\alpha = 0.6422 \text{Log}_{10}\Delta P + 8.0418$$

La pendiente de la recta representa el valor del coeficiente de compresibilidad de la torta, de lo cual se afirma que la torta es compresible.

El área de filtración se determina con base en la siguiente ecuación:

$$\frac{M_C}{A_T} = [2 c \Delta P^{1-s} g_c f n / \mu \alpha_0]^{1/2}$$

donde:

- M_C = Velocidad de producción de sólidos (Kg/h)
- A_T = Área total del filtro (m^2)
- C = Masa de sólido depositada en el filtro por unidad de volumen de filtrado (Kg/m^3)
- α_0 = Resistencia específica de la torta (m/Kg)
- ΔP = Caída total de presión a través del filtro (N/m^2)
- s = Coeficiente de compresibilidad
- g_c = Factor de proporcionalidad de la ley de Newton
- f = Fracción del ciclo de filtrado disponible para formación de la torta
- n = Velocidad de giro (rev/s)
- μ = Viscosidad ($\text{Kg}/\text{m s}$)

Además al área total de filtración se le sumará un 15% de factor de seguridad.

El área del pan filter se calcula por medio de la siguiente relación;

$$A = \pi (r^2 - r_1^2)$$

en donde r representa al radio externo y r_1 al radio interno. Si se le asigna al diámetro interno r_1 un valor de 0.46 m, entonces:

$$D_{\text{Pan filter}} = 2 * r = 2 * ((A_T/\pi) + (0.46)^2)^{1/2}$$

En la Tabla E. 5 se presentan los parámetros de diseño de los dos filtros que se utilizarán en el proceso.

Tabla E.6
Parámetros de diseño del equipo de filtración del proceso

	Pan filter 1	Pan Filter 2
Caída de presión	50805 N/m ² (15 pulgHg)	50805 N/m ² (20 pulgHg)
Masa de sólidos depositada por unidad de volumen filtrado, C	141.6 Kg/m ³	49.83 Kg/m ³
Coefficiente de compresibilidad, s	0.6422	0.6422
Resistencia específica de la torta, α_0	$1.10 * 10^8$ m/Kg	$1.10 * 10^8$ m/Kg
Fración del ciclo de filtrado para formación de la torta, f	1/3	1/3
Velocidad de giro, n	$1/30$ s ⁻¹	$1/30$ s ⁻¹
Viscosidad, μ	$5.35 * 10^{-5}$ Kg/ m s	$4.89 * 10^{-4}$ Kg/ m s
Velocidad de producción de sólidos, M_c	0.4583 Kg/s	0.1935 Kg/s
Área total de Filtrado, A_T	10.37 m ²	7.06 m ²
Diámetro del pan filter, $D_{\text{Pan filter}}$	3.75 m	3.13 m

4. Secador Rotatorio:

Se tomaron como base las dimensiones del secador rotatorio que se encuentra disponible en la Empresa "Sales, Ácidos y Solventes, S.A.", que tiene una longitud de 18.29 m y un diámetro de 1.83 m.

El tiempo de retención del sólido en el secador debe ser igual al tiempo requerido de secado para eliminar el porcentaje de humedad deseado.

La fracción volumétrica de sólido, ϕ_p , está definida como la fracción del volumen del secador ocupada por el sólido en cualquier instante. El tiempo de retención, θ , puede calcularse en función de esta fracción según la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{Z \phi_D \rho_s}{S_s}$$

donde:

- Z = Longitud del secador (m)
- ρ_s = Densidad del sólido (Kg/m^3)
- Ss = Flujo másico de sólidos secos ($\text{Kg/m}^2 \text{ s}$)

Friedman y Marshall encontraron que la fracción volumétrica de un gran número de sólidos bajo una gran variedad de condiciones de operación típicas puede ser expresado como:

$$\phi_D = \phi_{D_0} + KG$$

donde ϕ_{D_0} es la fracción volumétrica sin flujo de gas y KG es la corrección por la influencia de la velocidad de gas (K es una constante y G está dado en $\text{Kg/m}^2 \text{ s}$) y el signo más es debido a que la operación es en contracorriente.

La fracción volumétrica sin flujo de gas, ϕ_{D_0} , se puede encontrar por la siguiente ecuación:

$$\phi_{D_0} = \frac{0.3344 S_s}{\rho_s N^{0.9} T_D s}$$

donde:

- s = Inclinación del secador (m/m)
- N = Velocidad rotacional (rev/s)
- T_D = Diámetro del secador (m)

La constante K depende de las propiedades del sólido y puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{0.6085}{\rho_s d_p^{1/2}}$$

donde d_p es el diámetro de partícula en m.

Se recomienda para secadores rotatorios, velocidades periféricas entre 0.2 y 0.5 m/s. En este caso se sugiere que la velocidad periférica sea de 0.4 m/s. Por lo tanto la velocidad rotacional es:

$$N = \frac{0.4 \text{ rev/s}}{\pi T_D} * \frac{1 \text{ rev}}{\pi T_D} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$

Para calcular el tiempo de retención, se asumirá una inclinación de 0.05 m/m, el cual es un valor normalmente asumido para esta clase de secadores y las condiciones que se tienen. Ya con estas consideraciones, en la tabla E. 6 se presentan los parámetros de operación del secador rotatorio. Debido a que el secador con el que se cuenta en la planta es demasiado grande para los propósitos de este trabajo y por lo tanto requeriría un tiempo de retención del producto bastante alto, se diseñaron los parámetros de un secador rotatorio que tiene la relación de $L/D = 4$.

Tabla E.7
Parámetros de operación del secador rotatorio

Parámetro	L/D = 10 (Secador con el que cuenta la planta)	L/D = 4 (Secador que se recomienda)
Diámetro del secador, T_D	1.83 m	0.60 m
Longitud del secador, Z	18.29 m	2.40 m
Inclinación del secador, s	0.05 m/m	0.08 m/m
Flujo másico de borato de zinc seco, S _s	1050 Kg/h	1050 Kg/h
Flujo másico de gas, G _s	7940 Kg/h	7940 Kg/h
Densidad del sólido, ρ_s	2800 Kg/m ³	2800 Kg/m ³
Diámetro de partícula, d_p	$10 * 10^{-6}$ m	$10 * 10^{-6}$ m
Velocidad rotacional, N	4.17 rpm (0.07 rev/s)	15.92 rpm (0.2653 rev/s)
Constante K	0.0687	0.0687
Tiempo de retención, θ	6.3 horas	1 hora

5. Spray Dryer:

El primer paso en el diseño del spray dryer es la determinación del tamaño de la gota. Una estimación de ésto para una boquilla de aspersion puede hacerse a partir de la siguiente ecuación:

$$D_g = 9575 \Delta P^{-1/3}$$

donde, D_g es el diámetro de la gota en μm y ΔP es la presión a través de la boquilla en N/m^2 .

Para determinar el volumen de la cámara de secado, solo se necesita relacionar el flujo de gas que se necesita para el secado y el tiempo de secado de la gota. Esto se determina por la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen de la Cámara de secado} = \frac{\text{Flujo de gas (Kg/s)}}{\text{Densidad de gas (Kg/m}^3\text{)}} * \text{Tiempo de secado de la gota (s)}$$

Además al volumen de cámara se le sumará un 15% de factor de seguridad. Las proporciones típicas de diseño que se recomiendan para la cámara de secado son:

$$L_s = 2 D_s \qquad Z_s = 1.5 D_s \qquad J_s = 1/4 D_s$$

donde:

- L_s = Longitud de la cámara de secado (m)
- D_s = Diámetro de la cámara de secado (m)
- Z_s = Longitud del cono de salida del producto (m)
- J_s = Diámetro de la salida del producto (m)

Tabla E.8
Parámetros de diseño del spray dryer

Caída de presión, ΔP	$1.10 * 10^7 \text{ N/m}$
Diámetro de la gota, D_g	$43.01 \mu\text{m}$
Tiempo de secado de la gota, t_s	5 s
Flujo másico de gas, G	3.0667 Kg/ s
Densidad del gas, ρ_g	1.018 Kg/m^3
Volumen de la cámara de secado, V_s	17.32 m^3
Longitud de la cámara de secado, L_s	4.45 m
Diámetro de la cámara de secado, D_s	2.22 m
Longitud del cono de salida del producto, Z_s	3.33 m
Diámetro de la salida del producto, J_s	0.56 m

6. Ventiladores:

En el proceso se deben instalar ventiladores en lugares estratégicos. La potencia de los ventiladores puede estimarse por medio de la siguiente ecuación:

$$P_{\text{Real}} = \frac{2.72 * 10^{-5} Q P}{\eta}$$

donde;

P_{Real} = Potencia (kW o HP)

Q = Capacidad (m³/h)

P = Presión de operación del ventilador (cm H₂O)

η = Eficiencia del ventilador

La presión de operación se determina por medio de las curvas características para los ventiladores presentadas en la literatura de acuerdo a la capacidad que se requiere. Además se asumirá que estos trabajan con un 50% de eficiencia:

Tabla E.9
Parámetros de diseño de los ventiladores del proceso

	Capacidad de operación (m ³ /h)	Presión de operación (cm H ₂ O)	Eficiencia	P_{Real}	
				kW	HP
Ventilador 1	1075.31	25.40	65.0%	1.14	1.53
Ventilador 2	22400.25	15.24	65.0 %	14.28	19.16
Ventilador 3	7260.79	25.40	65.0 %	7.72	10.35
Ventilador 4	7544.8	25.40	65.0 %	8.02	10.75

ANEXO F

DETERMINACIÓN DE BORO

1. Descripción del método

El procedimiento consiste en determinar el boro presente en cualquier compuesto. Para esto es necesario tomar en cuenta que la muestra deberá estar libre de dióxido de carbono, aluminio, hierro y cualquier otra sustancia que no sea ácido bórico y que reaccione con el hidróxido de sodio. Si la solución es alcalina ésta se vuelve ligeramente ácida y se calienta para eliminar el dióxido de carbono. El ácido bórico se libera por el tratamiento con el ácido. El ácido libre presente en la muestra es cuidadosamente neutralizado en presencia de un indicador adecuado, tal y como lo es el rojo de metilo, naranja de metilo o rojo de sofrol No. 1. Con estos indicadores el punto final es un color amarillo. Un alcohol polihídrico se añade (manitol o glicerol generalmente) y se lleva a cabo la titulación del ácido bórico con una base estándar que usa fenolftaleína como indicador. En la presencia del glicerol se tiene la siguiente reacción:



Por lo tanto 1 mL de hidróxido de sodio 1N equivale a 0.03481g B_2O_3 .

2. Procedimiento del método

1. Pesar 1 g de muestra y disolver en 50 mL de agua.
2. Ajustar el pH de la solución ligeramente ácido con ácido clorhídrico 6N que usa rojo de metilo como indicador. Agregar una gota de ácido en exceso.
3. Tapar el beaker con un vidrio de reloj y calentar por 2 minutos para eliminar el dióxido de carbono.
4. Enfriar y ajustar el pH de la solución hasta el punto final amarillo del rojo de metilo con hidróxido de sodio 0.5N libre de carbonatos.
5. Añadir 25 mL de glicerol y 1 mL de fenolftaleína y luego titular con hidróxido de sodio 0.5N hasta que el color amarillo cambie a un rosado permanente.
6. Trabajar en triplicado.

ANEXO G

NOTACIÓN

- A** Área, m^2 o pie^2 ; A_T , área total del filtro continuo
- c** Masa de sólido depositada en el filtro por unidad de volumen de filtrado, Kg/m^3 o lb/pie^3 ; también concentración de sólidos en suspensión, Kg/m^3 o lb/pie^3 ; c_s , en la alimentación del filtro
- C** Carga total dinámica, m o pies
- C_p** Calor específico a presión constante, $J/g\text{-}^\circ C$ o $BTU/lb\text{-}^\circ F$
- d_p** Diámetro de partícula, m o pies
- D** Diámetro, m o pies; D_a , diámetro del rodete; D_t , diámetro del tanque; D_g , diámetro de la gota; D_s , diámetro de la cámara de secado
- E** Altura del rodete sobre el fondo del tanque, m o pies
- F** Fracción del ciclo de filtrado disponible para formación de la torta
- g_c** Factor de proporcionalidad de la ley de Newton
- G** Velocidad de masa del gas, $Kg/m_2\text{-}s$ o $lb/pie^2\text{-}s$
- G_s** Velocidad de masa del gas seco, $Kg/m_2\text{-}s$ o $lb/pie^2\text{-}s$
- H** Altura de líquido en el tanque, m o pies
- H'_G** Entalpía del gas húmedo por unidad de masa del gas seco, KJ/Kg
- H'_S** Entalpía del sólido húmedo por unidad de masa del gas seco, KJ/Kg
- J** Anchura de las placas deflectoras, m o pies
- J_s** Diámetro de la salida del producto en la cámara de secado, m o pies
- K** Constante
- L** Largo del rodete, m o pies
- L_s** Longitud de la cámara de secado, m o pies
- Mc** Velocidad de producción de sólidos, Kg/h o lb/h
- m** Masa, Kg o lb ; m_T , masa de la torta húmeda; m_c , masa de sólidos en la torta de filtración
- n** Velocidad de giro, rev/s o rpm
- N** Velocidad angular, rev/s o rpm
- N_p** Número de potencia
- N_{Re}** Número de Reynolds
- P** Potencia, KW o hp o $pies\text{-}lb_f/s$; P_{Real} , potencia real.

Q	Flux neto de la pérdida calor, IJ/s; También puede ser capacidad, m ³ /h o pie ³ /h
R_m	Resistencia del medio filtrante, m ⁻¹ o pie ⁻¹
r	Radio, m o pies
s	Coefficiente de compresibilidad; También puede ser pendiente del secador
S_s	Velocidad de masa del sólido seco, Kg/m ₂ -s o lb/pie ² -s
T	Temperatura, °C o °F
T_D	Diámetro del secador, m o pies
t	Tiempo, s o h
V	Volumen, m ³ o pie ³ ; también volumen de filtrado recogido en el tiempo t
W	Anchura del rodete, m o pies
X	Contenido de humedad del sólido, masa humedad / masa sólido seco
Y	Contenido de humedad del gas, masa humedad / masa gas seco
Z	Longitud del secador, m o pies
α	Resistencia específica de la torta, m/Kg o pie/lb; □ _o , constante
ρ	Densidad, Kg/m ³ o lb/pie ³
v	Viscosidad cinemática, m ² /s o pie ² /s
μ	Viscosidad, Kg/m-s o lb/pie-s
Δp	Caída total de presión a través del filtro, N/m ² o lb/pie ²
ΔT	Cambio de temperatura, °C o °F
η	Eficiencia
θ	Tiempo de retención en el secador, s o h
φ_D	Retención del sólido en un secador continuo, volumen sólido / volumen secador
φ_{D_o}	Retención del sólido cuando no hay flujo de gas

