

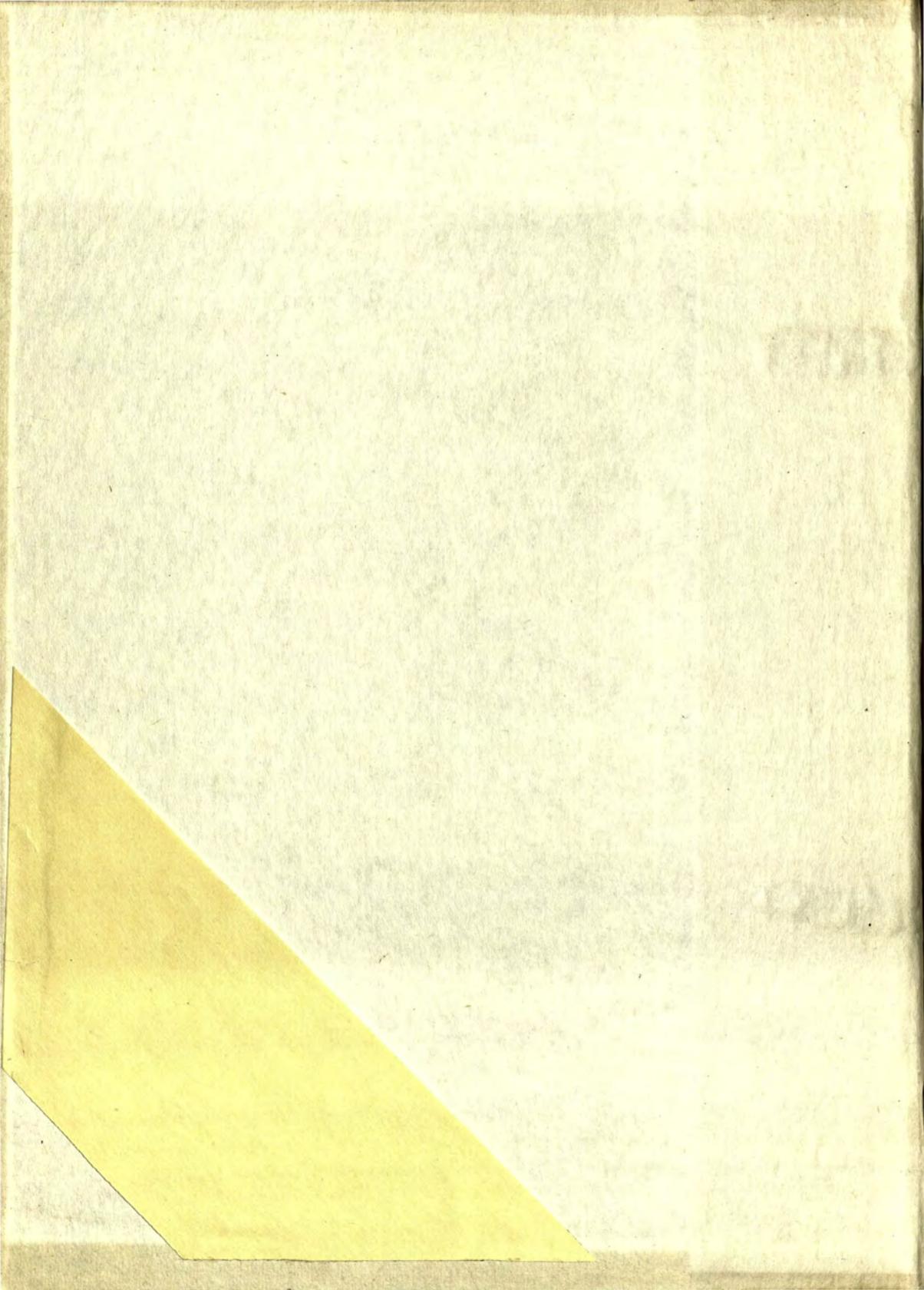
UNAM



36

TESIS-BCCT

89013  
5060

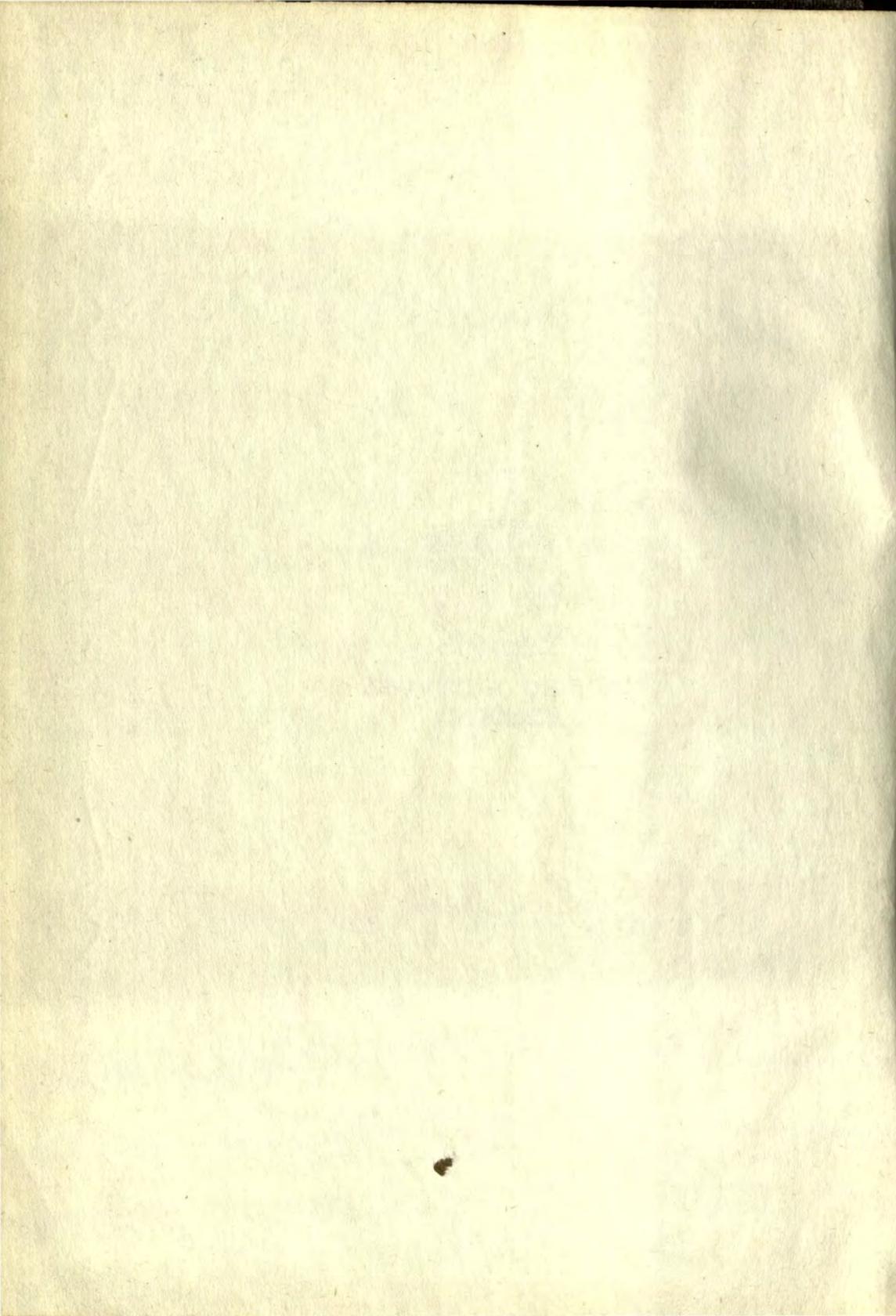




INSTITUTO DE GEOLOGIA  
BIBLIOTECA

I-67

36



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
ESCUELA NACIONAL DE QUIMICA

---

**Estudio Sobre la Posibilidad  
de Instalar en México una  
Planta de Caustificación**

Tesis

que presenta el alumno  
**Ramón Gómez Maza**  
para su examen profesional de  
Ingeniero Químico



MEXICO  
1939

70(300)  
06e

CLASIF. GMR1939E1  
ADQUIS. I.67  
FECHA .....  
PROCED. ....

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
ESCUELA NACIONAL DE QUIMICA

---

**Estudio Sobre la Posibilidad  
de Instalar en México una  
Planta de Caustificación**

Tesis

que presenta el alumno  
**Ramón Gómez Maza**  
para su examen profesional de  
Ingeniero Químico



MEXICO  
1959

36

INSTITUTO NACIONAL AUTÓNOMO DE MEXICO  
Escuela Nacional de Artes y Oficios  
Escuela Nacional de Artes y Oficios

Planta de Construcción  
de Instalación en México una  
Estudio sobre la Posibilidad

890(300)  
6069

Escia

Escuela Nacional de Artes y Oficios  
Escuela Nacional de Artes y Oficios  
Escuela Nacional de Artes y Oficios  
Escuela Nacional de Artes y Oficios

MEXICO  
1943

*A mis padres,*

*Sr. D. Eusebio Gómez de la Puente,*

*Sra. Dña. Carmen Maza de Gómez de la Puente,*

*con mi cariño y gratitud filial.*

En un poder

Yo, D. Cándido Gómez de la Fuente,  
Don Caimán Díaz de Gómez de la Fuente,  
con mi consentimiento y aprobación legal

A mi hermana,

Sra. Dña. Isabel Gómez de Lerch.

A la Srita.

Dolores Narciso Solana.

17  
The first number of the book

17  
The first number of the book

*A mis maestros,  
con gratitud y respeto.*

*A mis compañeros:*

*Ing. Raúl Guerrero Torres*

*Ing. César Falcón de Gypes*

*Ing. Juan G. Pérez Duarte*

*Ing. José Espinosa del H.*

*Ing. Carlos Salmerón E.*

*Ing. José de Jesús Volante.*

con gusto y respeto  
una vez más

En la capital

Sup. Juan de Dios  
Sup. Juan de Dios

## INTRODUCCION

*El punto que me he propuesto desarrollar en el transcurso del presente trabajo parece ser un tema demasiado estudiado, y podría pensarse que no constituye un verdadero problema desde los puntos de vista teórico e industrial*

*En la actualidad, los países que han logrado alcanzar un gran desarrollo industrial han resuelto ya el problema de la fabricación de la sosa cáustica, y en todos ellos se emplean dos procedimientos principales que son: Electrólisis del Cloruro de Sodio, y Caustificación del Carbonato de Sodio.*

*En México, desgraciadamente, el problema no ha sido aún resuelto satisfactoriamente, lo cual, si recordamos la afirmación de R. G. Williamson: "El adelanto industrial de un pueblo podría saberse conociendo su capacidad productora de  $H_2SO_4$  y  $NaOH$ ", llegaríamos a la conclusión de que una de las bases fundamentales para el desarrollo industrial de México es el producir, cuando menos, la Sosa Cáustica que consume.*

*No sería posible, por otro lado, incluir en este trabajo un estudio teórico completo, o resumir simplemente, las diversas consideraciones que pueden hacerse sobre todos los métodos conocidos para la fabricación de la sosa cáustica. Por lo tanto, sólo trataré de hacer un ensayo sobre el estudio teórico y económico del grupo de los procedimientos químicos o de caustificación, estableciendo cuáles son las materias primas más apropiadas actualmente en nuestro medio para la fabricación de la sosa cáustica por caustificación de las sales de sodio.*

*El desarrollo general que me propongo seguir es el siguiente:*

## S U M A R I O

### INTRODUCCION.

#### I.—CONSUMIDORES E IMPORTACION DE SOSA CAUSTICA EN MEXICO.

#### II.—CAUSTIFICACION.

- a) Teoría General.
- b) Experimentación.
- c) Consideraciones Económicas.

#### III.—CAUSTIFICACION DEL CARBONATO DE SODIO.

- a) Teoría.
- b) Experimentación.
- c) Consideraciones Económicas.
- d) Conclusión.

#### IV.—PROYECTO DE INSTALACION.

- a) Consideraciones Generales.
- b) Cálculo de Aparatos.
- c) Balance Económico.

#### V.—CONCLUSIONES.

A.—*Descripción somera de las aplicaciones industriales de la sosa cáustica, e investigación del consumo de esta materia prima en el país.*

B.—*Materias primas que pueden servir para la preparación del hidróxido sódico, y estudio teórico y económico comparando entre sí los diferentes métodos que resulten.*

C.—*Algunas consideraciones teóricas y económicas referentes al método que presente las mayores posibilidades de ser industrializado en nuestro medio.*

D.—*Anteproyecto para la instalación de una planta caustificadora, según la capacidad deducida de las consideraciones que se hagan con anterioridad.*

Incluiré además la descripción y los resultados de las experiencias hechas con el objeto de determinar algunas de las condiciones reales de trabajo de la planta proyectada.

Espero haber contribuido con el presente trabajo, a la resolución de parte de un problema tan fundamental para el desarrollo industrial de México, aunque los resultados a que llegue no puedan ser considerados definitivos, pues para ello sería necesario poseer mayores conocimientos y práctica de los que pueden suponerse al efectuar un trabajo de esta categoría.

Debo expresar mi reconocimiento a mi maestro el Sr. Ing. Quim., Rafael Illescas Frisbie, quien bondadosamente me permitió trabajar en su laboratorio particular, y a cuya dirección y atinados consejos debo el desarrollo de la parte experimental de este trabajo. He de agradecer igualmente las acertadas sugerencias de mis maestros los Sres. Ings. Alberto Urbina, Manuel Mascott L. y Salvador Soto Morales, así como del Ing. Antonio Guerrero Torres.

## S U M A R I O

### INTRODUCCION.

#### I.—CONSUMIDORES E IMPORTACION DE SOSA CAUSTICA EN MEXICO.

#### II.—CAUSTIFICACION.

- a) Teoría General.
- b) Experimentación.
- c) Consideraciones Económicas.

#### III.—CAUSTIFICACION DEL CARBONATO DE SODIO.

- a) Teoría.
- b) Experimentación.
- c) Consideraciones Económicas.
- d) Conclusión.

#### IV.—PROYECTO DE INSTALACION.

- a) Consideraciones Generales.
- b) Cálculo de Aparatos.
- c) Balance Económico.

#### V.—CONCLUSIONES.



## CAPITULO I.

# Consumidores e Importadores de Sosa Cáustica en México

He escogido como punto de este capítulo los datos sobre importación y no sobre consumo, porque, en primer lugar, es muy difícil, por no decir que imposible, el investigar con minuciosidad el monto de las cantidades de Sosa Cáustica producida en México, ya que la mayor parte de ésta es consumida por los mismos que la elaboran, y, en segundo lugar, porque los consumidores cuyo mercado es posible adquirir son, precisamente, aquellos cuyas industrias están necesitando, actualmente, de las cantidades que se importan.

Sería aventurado intentar hacer un estudio sobre la fabricación de cualquier producto sin investigar antes los usos y las aplicaciones que éste tiene, así como las posibilidades de su demanda. Por lo tanto, antes de iniciar el proyecto propiamente dicho para la instalación de una fábrica de sosa cáustica, dedicaré unos cuantos renglones a describir brevemente cuáles son las aplicaciones industriales de esta materia prima y las posibilidades de consumo que tiene en nuestro medio.

La sosa cáustica, como materia prima industrial, se distribuye, casi totalmente, entre las industrias siguientes:

- 1.—Fabricación de Jabones Sódicos.

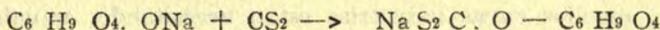
Es bien sabido que la fabricación de jabones sódicos consiste esencialmente en la hidrólisis de los glicéridos contenidos en determinados aceites y grasas. Esta operación queda representada por la reacción general:



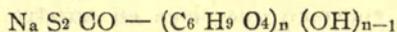
estando contenido el glicérido en la grasa o aceite y la glicerina en la lejía producto de la saponificación.

## 2.—Fabricación del papel y pulpa de papel.

Los usos para lo que está destinada la sosa cáustica en la fabricación del papel son, generalmente, los de limpieza o digestión de las materias primas, que consiste casi siempre en la cocción de la materia prima, la cual puede ser madera, paja, esparto o trapos, con una lejía de sosa cáustica; ésta es, a veces, recuperada, debido a que, con frecuencia casi toda se transforma en carbonato de sodio, verificándose su recuperación por caustificación. En la obtención de la celulosa la sosa cáustica puede usarse para el descortezado o desflemado de la madera o de la paja por medio de digestiones en lejías cáusticas o bien para la fabricación de la celulosa viscosa o el celofán por el procedimiento de Gross and Bevan, en el que la celulosa se trata con una solución mercerizante de NaOH y por medio de la adición de  $\text{CS}_2$  obteniéndose una sal de Sodio y Celulosa, soluble en agua, del ácido Xantogénico o tiocarbónico, según:



El xantogenato de celulosa y Sodio en Solución alcalina constituye la llamada viscosa o viscoïd. Con el tiempo la molécula del xantogenato se polimeriza y se vuelve cada vez más pobre en azufre porque se van separando los grupos complejos ( $\text{Na S}_2 \text{C}$ ), mientras se forman moléculas cada vez más condensadas de:



llegándose a obtener moléculas en las que "n" es igual a 4, al cabo de 6 a 7 días, y entonces la nueva viscosa ya no es solu-

ble en agua y es fácilmente coagulable por neutralización por ácidos diluidos.

#### 4.—Refinación del Petróleo.

El objeto de la refinación es extraer del petróleo crudo productos comerciales y esto comprende dos fases: La separación del petróleo crudo en sus partes constituyentes que son gasolina, kerosina y aceites lubricantes, y la purificación de cada uno de estos productos ya separados. La fracción gasolina es frecuentemente sometida a una segunda destilación por medio de la cual se divide en dos fracciones, gasolina propiamente dicha y nafta. La sosa cáustica se emplea para la purificación química de estos últimos productos, la cual consiste en un tratamiento con ácido sulfúrico, sosa cáustica y plumbito de Sodio, y una filtración posterior a la decoloración con tierra de Fuller.

#### 5.—Refinación de Grasas y Aceites.

Como las grasas y aceites son mezclas de triglicéridos, que contienen como impurezas sustancias tánicas, albuminoides y materias colorantes naturales, es necesario agregar a estas mezclas, en determinadas condiciones, sustancias deshidratantes u oxidantes, lo cual es la refinación propiamente dicha. Pero cuando se desea obtener grasas o aceites perfectamente neutros o se trata únicamente de reducir su acidez libre, se acostumbra efectuar la neutralización, hasta el grado deseado, agregando soluciones más o menos concentradas de sosa cáustica, lo cual constituye un tratamiento auxiliar a la refinación.

#### 6.—Textiles.

En la industria textil la sosa cáustica encuentra diversas aplicaciones como son:

- a.—Cocción del algodón crudo o lejiado.
- b.—Mercerización del algodón.
- c.—Como aditamento en el teñido con algunos colorantes sulfurosos, en las tintas de índigo y como disolvente del beta naftol y otros desarrolladores.
- d.—Como reductor en combinación con la glucosa.
- e.—Para el lavado y blanqueo de textiles.
- f.—Como ingrediente de la pasta oxidante del prusiato rojo.
- g.—En el teñido y estampado con colorantes indantrénicos.

h.—Para la obtención de efectos de crepón en los tejidos vegetales.

i.—En la precipitación de los óxidos de fierro y manganeso sobre las fibras de algodón.

j.—En la preparación de mordientes alcalinos.

k.—Preparación de masas de apresto.

7.—Productos del alquitrán.

La sosa cáustica se emplea en esta industria, como auxiliar para la separación de los fenoles, el carbasol y otros productos, lo cual se verifica por medio de lavados sucesivos con soluciones cáusticas y de ácido sulfúrico, de los aceites ligeros y pesados obtenidos de la primera destilación del alquitrán. Una vez lavados los productos son sometidos a destilaciones y lavados posteriores hasta lograr su separación completa.

8.—Regeneración del Caucho.

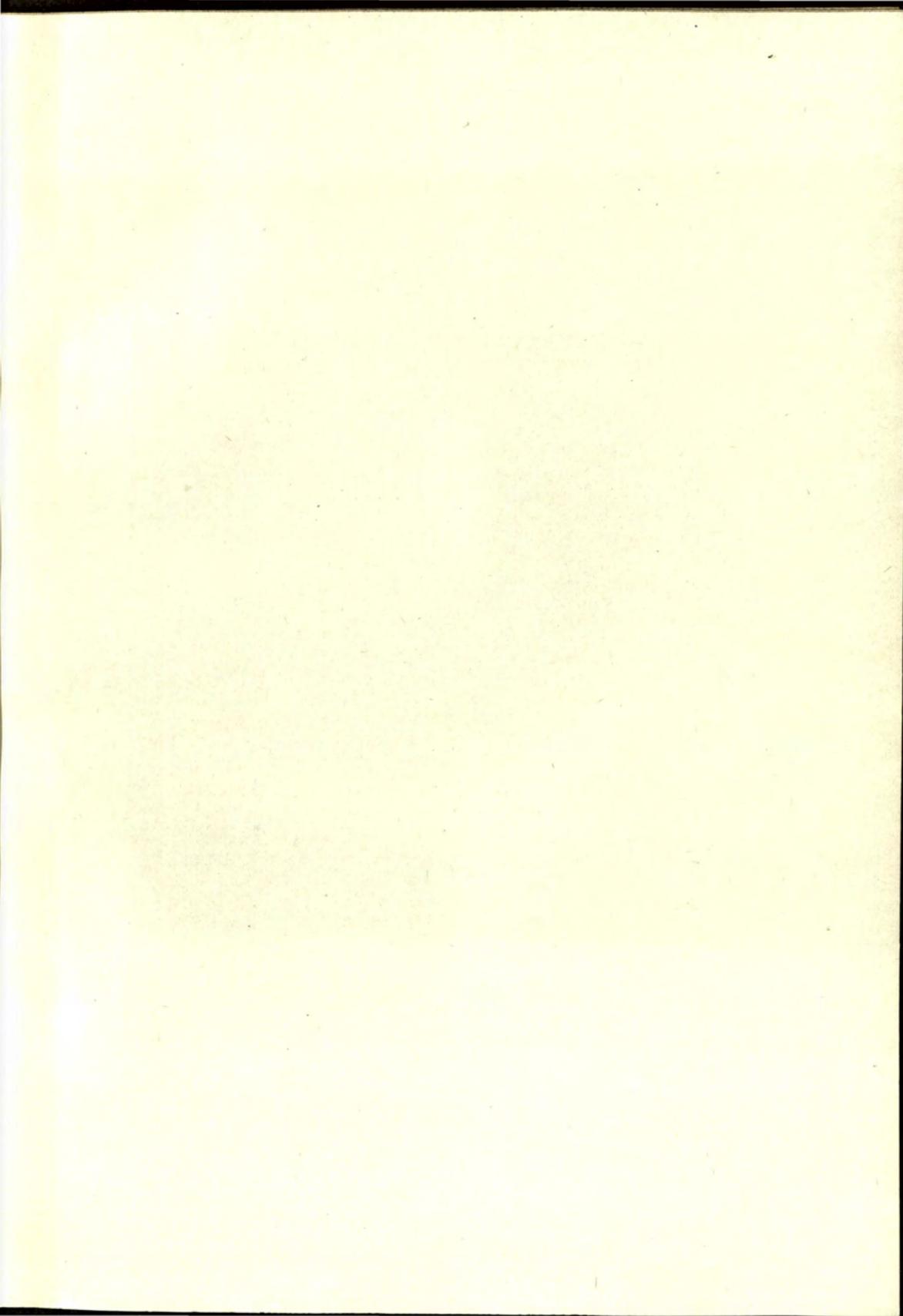
La recuperación del caucho se lleva a cabo por diferentes sistemas, según la clase de los desperdicios que se usen como materia prima. Según Molinari, generalmente, es suficiente tratarlos con ácido sulfúrico lavándolos después con lejías de sosa cáustica. El método que parece ha estado en mejor uso los últimos años es el de Marks; este método consiste en tratar los desperdicios con soluciones cáusticas en autoclave. En general puede decirse que la sosa cáustica se emplea para la eliminación de las impurezas orgánicas y como auxiliar en la desvulcanización del caucho.

9.—Productos Químicos en General.

Son tan numerosas las aplicaciones de la sosa cáustica en la preparación de productos químicos, que resultaría complicado describirlos con exactitud.

Casi todas las industrias mencionadas están ya establecidas en México, lo que garantiza el éxito de la instalación de una planta que fabrique la materia en que nos ocupamos. A continuación examinaremos algunos datos estadísticos que nos demostrarán por sí solos el constante desarrollo de las plantas consumidoras, y, por consiguiente, la garantía, cada vez mayor, que tendrán los productores de la sosa cáustica.

Según datos proporcionados por la Secretaría de Economía Nacional, se sabe que México ha importado de 1933 a 1937, inclusive, las siguientes cantidades de Sosa Cáustica:



GRAFICA N° 1

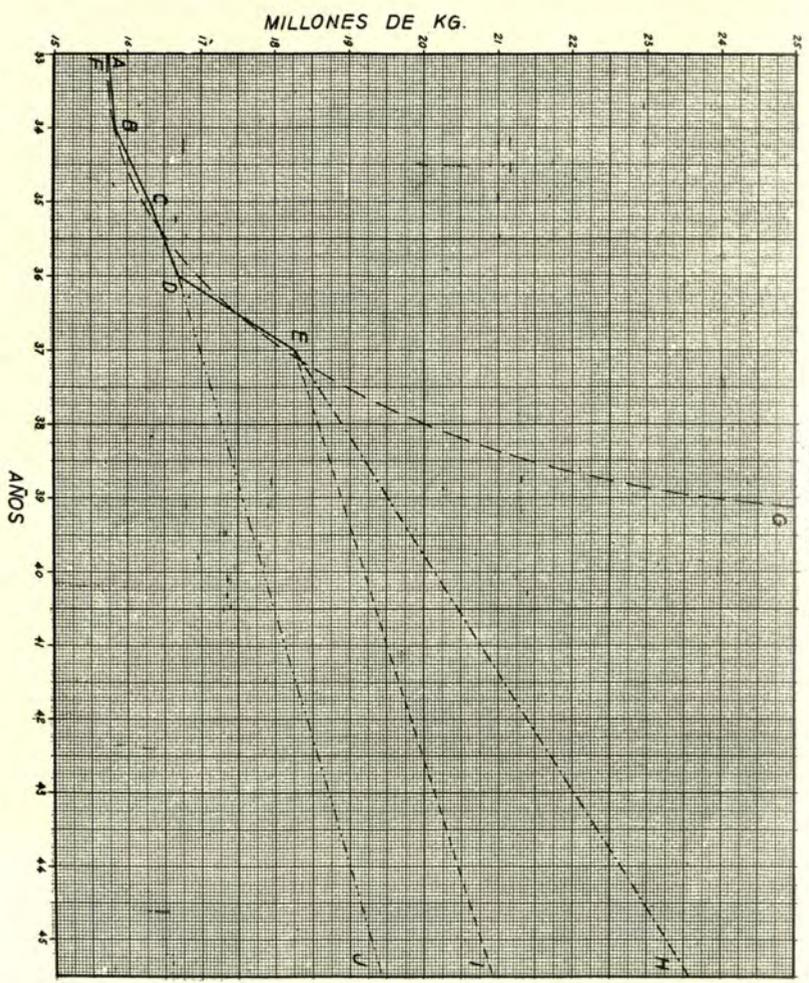


TABLA N° 1

Año.	Kilogramos
1933	15 735 420
1934	15 842 531
1935	16 299 569
1936	16 719 656
1937	18 257 861

Para mayor claridad y comprensión de los datos anteriores, graficaremos los valores correspondientes.

GRAFICA N° 1

Si seguimos la línea marcada por puntos A, B, C, D, E, nos resulta evidente la existencia de una tendencia hacia aumento de las importaciones.

De los datos registrados en la gráfica, se pueden deducir diversas posibilidades del consumo, por ejemplo, en el año 1945.

1º—La curva F G nos representa la que podríamos llamar la ley teórica que siguen las cifras de importación, según los datos de la tabla N° 1, representados respectivamente por los puntos A, B, C, D, y E. Desde luego resalta el hecho de que las importaciones no pueden seguir de ningún modo la ley que representa la curva F G. Por lo tanto, esta variación no sólo es la menos probable, sino que se puede afirmar, con toda seguridad, que es imposible, pues nos resultaría para el año de 1945 un consumo poco menos que infinito.

2º—La variación anual media deducida de las variaciones desde 1933 hasta 1937 resulta ser la pendiente de la línea E H que se ha representado en la misma gráfica 1, y de ahí se puede afirmar que una de las posibilidades es que en 1945 la importación de Sosa Cáustica alcance la cifra de 23 250 000 kilos.

3º—Si tenemos en cuenta la variación de 1936 a 1937 es inusitada o imprevista, comparada con la de los años anteriores, ocurre considerar como variación probable la media de las variaciones registradas desde 1933 hasta 1936. De este modo, construyendo la línea EI con una pendiente igual a la de las

pendientes de las líneas AB, BC, y CD, resultaría una importación probable de 20 760 000 Kg. para el año de 1945.

4º—Por último, para colocarse dentro de una posibilidad de seguridad, podemos suponer que el incremento tan grande registrado en 1936 a 1937 puede hacer que las importaciones se conserven constantes durante algunos años, o que el incremento de éstas sea menor en los años siguientes que en los anteriores. Atendiendo a estos razonamientos se puede suponer otra variación con la misma pendiente que la línea EI, partiendo del punto D, o sea, considerando que al cabo de algunos años se restablezcan la variación y monto normales de las importaciones, resultando así, para 1945, una importación igual a 19 502 000 Kg.

Desgraciadamente, son muy pocos los datos posibles de obtener y no se podría decir con certeza cuál de estas tres últimas posibilidades es la más probable, debido a que en las estadísticas están registradas las importaciones de NaOH, KOH,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , y resultaría poco aproximado el querer definir, siquiera desde 1918, cuáles han sido las cantidades de NaOH importadas anualmente.

Sin embargo, existe el hecho de que la importación tiende a aumentar día por día, y aún cuando permaneciera constante, quedaría plenamente justificado el instalar en México, una planta productora de Sosa Cáustica.

Examinaremos ahora cómo se ha distribuido en la República Mexicana, el monto total de la importación de Sosa Cáustica, pues es lógico pensar que la instalación de la factoría, tenga como primera posibilidad de éxito la de encontrarse localizada dentro de la zona de mayor consumo. A este respecto la Secretaría de la Economía Nacional me ha proporcionado la siguiente tabla de distribución:

TABLA N° 2.

Entidad.	Kgmos. en 1936.	Kgmos. en 1937.
Coahuila	551.701	918.886
Distrito Federal	6.860.104	7.461.844
Guanajuato	236.075	164.000
Jalisco	1.423.358	1.815.294

Michoacán	116.787	122.452
Nuevo León	1.270.416	1.657.088
Puebla	226.835	274.226
Sinaloa	342.622	411.033
Tabasco	88.117	102.348
Tamaulipas	2.277.965	1.885.801
Veracruz	2.349.164	2.730.658
Yucatán	202.531	249.232
Otras entidades	763.971	464.999

Una de las primeras conclusiones que se desprenden de la simple observación de los datos anteriores es que no todas las zonas son propicias para el desarrollo de las industrias cuya materia prima común es la sosa cáustica, pues sería inútil, por evidente, el decir que las zonas de Guanajuato y Tamaulipas, son propicias para la instalación y desarrollo de una planta caustificadora, puesto que el consumo de esas dos entidades presenta marcadas tendencias a disminuir.

Observamos por otra parte que los mejores centros de consumo en orden de importancia, se encuentran en el D. F., y en los estados de Veracruz, Jalisco, Nuevo León, etc., destacándose notablemente el D. F., cuyo consumo sobrepasa en 4.731.186 Kgs. al del estado de Veracruz que es el que le sigue en importancia, desde este punto de vista.

Uno de los problemas más interesantes en el desarrollo de un proyecto de esta naturaleza, es el que respecta a la localización de la planta. El lugar de instalación debe seleccionarse de acuerdo con métodos ya establecidos cuyas bases principales son: Existencia de la energía suficiente para llevar a cabo las diferentes transformaciones del proceso o bien, la existencia de una fuente de energía utilizable para transformarla en energía mecánica, energía eléctrica, o energía calorífica. Coste de mano de obra, lo cual es muy variable para cada región. Por último, los costos de transporte. Un balance económico global de estos importantes puntos nos indicará con bastante aproximación cuál es el sitio más adecuado para la instalación.

Las dificultades con que he tropezado al tratar de investigar estos costos, dificultades que posiblemente sean debidas a

la falta de datos estadísticos suficientes en las oficinas de Control y Estadística de los diversos departamentos, hacen muy difícil, por no decir imposible, el desarrollo de un punto de tan vital importancia en cualquier proyecto.

Sin embargo, los datos asentados en la tabla N° 2, nos llevan a la conclusión de que, por lo pronto, es una buena solución del problema que la instalación de la planta se lleva a cabo en el D. F., puesto que, durante los años de 1936 y 1937 el consumo de NaOH representa un 40.9% de la importación total; mientras, que en el estado de Veracruz, que es el que sigue en importancia, el consumo es de 14.99% de dicha importación total. Porcentaje el primero que representa la mitad de la importación total y, a su vez, la mayor posibilidad de desarrollo y éxito de la industria que nos ocupa.

Por otra parte, como ya he dicho, la marcada tendencia a aumentar considerablemente año por año las cifras de importación, constituye, por sí sola, una halagadora promesa y hace sentir la necesidad de resolver el problema en que nos ocupamos lo más pronto posible.

Vamos a tratar de fijar la capacidad que debe tener la planta caustificadora. Para esto debemos tener en cuenta que el Capital invertido, y por consiguiente los gastos de Instalación, los gastos fijos, etc., que influyen en el costo unitario de producción, dependen de la capacidad, la cual, por otro lado debe determinarse de acuerdo con la demanda del producto para evitar el peligro de la sobre producción.

Como ya hemos indicado, el problema por resolver en este trabajo es el que se refiere a la instalación de una planta caustificadora en el D. F., para esto debemos desde luego limitar la capacidad, basándose en el monto de la importación actual en el lugar mencionado, pues además de que resulta siempre aventurado el pretender adquirir de golpe el control total de un mercado, abasteciendo por completo a la República Mexicana, la capacidad de 7.500.00 Kgs. anuales correspondientes a la importación aproximada del D. F., en 1937 eleva la industria que nos proponemos, a la categoría de las grandes industrias, resultando así un costo unitario de producción económico. Además, partiendo de este dato, cuya importancia no resulta vital si consideramos que puede modificarse un proyecto de

esta categoría, por una simple corrección de los valores numéricos, será posible con el tiempo adquirir el control casi total del consumo que, por concepto de importación, existe actualmente en la República Mexicana.

Como conclusión de lo anterior, podemos decir que: 1º Existe la necesidad de instalar en México una planta productora de NaOH. 2º La instalación se puede llevar a cabo en el D. F., puesto que esta entidad presenta, además de un gran consumo, una tendencia a aumentarlo en años posteriores; y 3º La capacidad de la planta puede ser tal que permita cubrir totalmente la importación del D. F.

## CAPÍTULO II

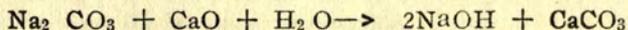
### Caracterización



## CAPITULO II.

### Cautificación

Desde el año 1853, los ingleses preparaban sosa cáustica, por vía Química, introduciendo cestos de cal en soluciones diluídas e hirvientes de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , obteniendo hidróxido sódico más carbonato de Calcio. La reacción, que tiene lugar, puede ser representada como sigue:

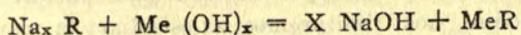


La transformación sufrida por el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  fué llamada desde entonces "Cautificación", debido a que el carbonato de Sodio se distingue en la terminología industrial con el nombre de Sosa calcinada, y el hidróxido de Sodio con el de Sosa Cáustica.

El mismo caso se nos presenta al tratar carbonato de potasio con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , obteniéndose como productos de la reacción  $\text{KOH}$  y  $\text{CaCO}_3$ .

Puede entonces definirse la cautificación como la transformación de una sal alcalina en hidróxido, por medio de una doble descomposición con un hidróxido apropiado.

La caustificación de las sales de Sodio puede representarse por medio de la ecuación general:



en la que:

R = radical ácido.

Me = metal.

La ecuación anterior nos pone en evidencia la gran variedad de sustancias que pueden llevar al objeto deseado. Podemos decir, por lo tanto, que dentro de la caustificación existen diferentes procedimientos cuya naturaleza depende únicamente de las sustancias que constituyen el 1º miembro de la igualdad citada.

En todo proceso industrial, como el presente, en el que se encuentran una serie de materias primas capaces de producir el fenómeno deseado, tiene vital importancia la selección de la materia prima, pues de sus condiciones y características depende la naturaleza del proceso de elaboración y, por consiguiente, el costo unitario de producción.

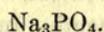
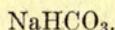
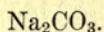
Supongamos ahora, que se desconocen por completo las ventajas y desventajas que presentan entre sí las diferentes materias primas que teóricamente, según la ecuación general de caustificación, pueden servir para la preparación de Sosa Cáustica. Es decir, se nos presenta el problema de seleccionar, de entre un grupo de reacciones químicas, aquella o aquellas que presentan el mayor número de ventajas. Se ocurre, desde luego, definir un sistema general que nos sirva de base para comparar entre sí todos los procedimientos que incluyamos dentro del proceso general de caustificación.

En estos casos debe analizarse, en primer lugar, lo referente al rendimiento obtenible en cada reacción, puesto que aquellas cuyos rendimientos teóricos sean más elevados, serán siempre las que presenten mayores probabilidades de éxito.

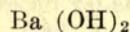
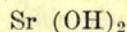
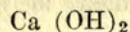
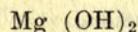
Hecho esto, deberá investigarse, desde el punto de vista económico, las características comerciales e industriales que puedan afectar a cada procedimiento, según las materias primas en cuestión, y, haciendo un balance comparativo, se po-

drá deducir cuál de los procedimientos propuestos es el más realizable en nuestro medio.

Como sería imposible por lo laborioso, incluir todas las sales de Sodio, nos limitaremos a estudiar la caustificación de las siguientes sales, que son las más comunes.



Como agentes caustificadores deben usarse los hidróxidos metálicos, los cuales según sus propiedades se dividen en dos grandes grupos; el de los hidróxidos alcalinos y alcalino-térreos y el de los hidróxidos de los metales pesados. Según Ephrain, estos últimos se diferencian de los hidróxidos alcalino y alcalino-térreos por su insolubilidad casi completa en el agua; por lo tanto, para efectuar la caustificación sólo podremos usar los hidróxidos alcalino-térreos o sean los de Be, Mg, Ca, Sr, Ba. De estos el Be  $(\text{OH})_2$  forma soluciones coloidales, por lo que su utilización sería sumamente complicada, además de que su solubilidad es muy pequeña. Por lo tanto, los únicos agentes caustificadores que consideraremos serán los siguientes:



Las reacciones que pueden plantearse teóricamente según la reacción general de caustificación son:

TABLA N° 1

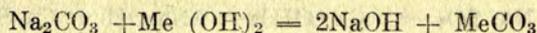
1	$\text{Na}_2 \text{CO}_3 + \text{Ca} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ca} \text{CO}_3$
2	$2\text{Na} \text{HCO}_3 + \text{Ca} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ca} (\text{HCO}_3)_2$
3	$2\text{Na} \text{Cl} + \text{Ca} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ca} \text{Cl}_2$
4	$\text{Na}_2 \text{SO}_4 + \text{Ca} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ca} \text{SO}_4$
5	$2\text{Na}_3 \text{PO}_4 + 3\text{Ca} (\text{OH})_2 = 6\text{Na} \text{OH} + \text{Ca}_3 (\text{PO}_4)_2$
6	$2\text{Na} \text{NO}_3 + \text{Ca} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ca} (\text{NO}_3)_2$
7	$\text{Na}_2 \text{CO}_3 + \text{Sr} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Sr} \text{CO}_3$
8	$2\text{Na} \text{HCO}_3 + \text{Sr} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Sr} (\text{HCO}_3)_2$
9	$2\text{Na} \text{Cl} + \text{Sr} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Sr} \text{Cl}_2$
10	$\text{Na}_2 \text{SO}_4 + \text{Sr} (\text{OH})_2 = \text{Na} \text{OH} + \text{Sr} \text{SO}_4$
11	$2\text{Na}_3 \text{PO}_4 + 3\text{Sr} (\text{OH})_2 = 6\text{Na} \text{OH} + \text{Sr}_3 (\text{PO}_4)_2$
12	$2\text{Na} \text{NO}_3 + \text{Sr} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Sr} (\text{NO}_3)_2$
13	$\text{Na}_2 \text{CO}_3 + \text{Ba} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ba} \text{CO}_3$
14	$2\text{Na} \text{HCO}_3 + \text{Ba} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ba} (\text{HCO}_3)_2$
15	$2\text{Na} \text{Cl} + \text{Ba} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ba} \text{Cl}_2$
16	$\text{Na}_2 \text{SO}_4 + \text{Ba} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ba} \text{SO}_4$
17	$2\text{Na}_3 \text{PO}_4 + 3\text{Ba} (\text{OH})_2 = 6\text{Na} \text{OH} + \text{Ba}_3 (\text{PO}_4)_2$
18	$2\text{Na} \text{NO}_3 + \text{Ba} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Ba} (\text{NO}_3)_2$
19	$\text{Na}_2 \text{CO}_3 + \text{Mg} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Mg} \text{CO}_3$
20	$2\text{Na} \text{HCO}_3 + \text{Mg} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Mg} (\text{HCO}_3)_2$
21	$2\text{Na} \text{Cl} + \text{Mg} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Mg} \text{Cl}_2$
22	$\text{Na}_2 \text{SO}_4 + \text{Mg} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Mg} \text{SO}_4$
23	$2\text{Na}_3 \text{PO}_4 + 3\text{Mg} (\text{OH})_2 = 6\text{Na} \text{OH} + \text{Mg}_3 (\text{PO}_4)_2$
24	$2\text{Na} \text{NO}_3 + \text{Mg} (\text{OH})_2 = 2\text{Na} \text{OH} + \text{Mg} (\text{NO}_3)_2$

Antes de iniciar el estudio Químico teórico de este grupo de reacciones, creo pertinente advertir que se trata solamente de hacer un ensayo del sistema que puede seguirse en la resolución de problemas análogos.

Para llevar a cabo la selección teórica de los diferentes procedimientos que se incluyen en un solo proceso químico basta emplear métodos comparativos, puesto que el calcular con alguna aproximación las condiciones reales de trabajo en cada procedimiento resulta hasta cierto punto inútil, debido a que, posteriormente a la selección puramente teórica, deberán hacerse algunas consideraciones relativas al costo, pureza, etc. de las materias primas y una vez seleccionado el procedimiento que resulte mejor, desde el punto de vista industrial se pro-

curará calcular, con el mayor cuidado, las condiciones reales de trabajo en la planta, así como los costos, rendimientos, etc.

La fórmula general que nos representa las caustificaciones que se llevan a cabo con el  $\text{Na}_2 \text{CO}_3$  es:



en la que Me es un metal alcalino-térreo.

La constante de equilibrio de esta reacción será:

$$K = \frac{[\text{NaOH}]^2 [\text{MeCO}_3]}{[\text{Na}_2\text{CO}_3] [\text{Me}(\text{OH})_2]} \quad (1)$$

Como la solubilidad de los carbonatos de Ca, Sr, Ba, Mg. es muy pequeña de modo que pueden considerarse prácticamente insolubles, o al menos, presentes en cantidades constantes, resultará:

$$K = \frac{[\text{NaOH}]^2 M}{[\text{Na}_2\text{CO}_3] [\text{Me}(\text{OH})_2]} \quad (2)$$

siendo M la concentración del  $\text{MeCO}_3$  y por tanto, podríamos incluir en la constante de equilibrio el valor de M.:

$$K_1 = \frac{K}{M} = \frac{[\text{NaOH}]^2}{[\text{Na}_2\text{CO}_3] [\text{Me}(\text{OH})_2]} \quad (3)$$

Lo primero que podemos deducir de la ecuación anterior es que, a mayores valores de  $K_1$  corresponde una producción mayor de NaOH. Para que  $K_1$  sea lo mayor posible se requiere que, en equilibrio, las concentraciones de  $\text{Me}(\text{OH})_2$  y  $\text{Na}_2 \text{CO}_3$  sean muy bajas, lo cual, aparentemente, parece difícil puesto que el  $\text{Na}_2 \text{CO}_3$  es muy soluble. Sin embargo analicemos la constante de disociación del  $\text{Me}(\text{OH})_2$  que es:

$$k = \frac{[\text{Me}^{++}] [\text{OH}^-]^2}{[\text{Me}(\text{OH})_2]} \quad (4)$$

Los hidróxidos alcalino-térreos son poco solubles y por lo tanto podemos suponer, que, en la solución siempre se encuentra el  $\text{Me}(\text{OH})_2$  completamente disociado.

Al iniciarse la reacción la concentración de iones OH es relativamente baja, pero a medida que el fenómeno progresa el número de iones OH va creciendo y como K permanece constante el número de iones  $(\text{Me}^{++})$  disminuirá progresivamente con la reacción. Esta disminución de iones  $(\text{Me}^{++})$  no es más que un abatimiento de la solubilidad del  $\text{Me}(\text{OH})_2$  el cual tiende a precipitarse.

La reacción alcanzará su estado de equilibrio cuando la solubilidad del  $\text{Me}(\text{OH})_2$  sea igual a la del  $\text{MeCO}_3$ .

Si el  $\text{Me}(\text{OH})_2$  es muy poco soluble, bastará un ligero abatimiento de su solubilidad para que cese aparentemente la reacción, alcanzando su equilibrio, y entonces la concentración del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  será muy elevada.

Si por el contrario el  $\text{Me}(\text{OH})_2$  es muy soluble, se necesitará que la solubilidad decaiga mucho para que la reacción quede en equilibrio, lo cual se logrará hasta que se haya producido mucho NaOH y se obtendrán concentraciones bajas de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para el estado de equilibrio.

Si consideramos la fórmula (1) se comprenderá desde luego, que a menor concentración de  $\text{MeCO}_3$  y un mismo valor de la constante  $K_1$  corresponde una formación mayor de NaOH.

En resumen, las concentraciones del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Me}(\text{OH})_2$  en el estado de equilibrio, serán menores y por lo tanto la obtención del NaOH será mayor a medida que el hidróxido alcalino-térreo sea más soluble y el carbonato alcalino-térreo resultante sea menos soluble.

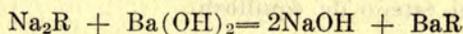
Con los datos de solubilidad que proporcionan Hodgman and Lange en el Hand book of Chemistry and Physics, edición 1938, referentes a los hidróxidos y carbonatos alcalinos-térreos, se puede hacer la siguiente tabla:

TABLA N° 2

Substancia	Solubilidad 20° C Mol. gr. por litro de agua)
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.00015
Ca(OH) <sub>2</sub>	0.02051
Sr(OH) <sub>2</sub>	0.03521
Ba(OH) <sub>2</sub>	1.55310
MgCO <sub>3</sub>	0.00126
CaCO <sub>3</sub>	0.00065
SrCO <sub>3</sub>	0.00001
BaCO <sub>3</sub>	0.00011

De esta tabla se deduce, desde luego, que el mayor caustificador es el Ba(OH)<sub>2</sub> pudiéndose clasificar como regulares los hidróxidos de Sr. Ca, y quedando desde luego descartado el de Mg, puesto que la solubilidad del MgCO<sub>3</sub> es mayor que la del Mg(OH)<sub>2</sub>, lo cual haría que la reacción se verificara de preferencia de derecha a izquierda, es decir, partiendo de MgCO<sub>3</sub> y 2 NaOH se obtendrá un rendimiento de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y Mg(OH)<sub>2</sub> mayor del 50%.

Haciendo un razonamiento análogo plantearémos ahora la siguiente fórmula:



en la que R es un radical ácido divalente cualquiera.

Escogemos para este caso el Ba(OH)<sub>2</sub> porque es el hidróxido alcalino-térreo que mejor satisface las condiciones deducidas con anterioridad.

La constante de equilibrio en este caso sería:

$$K_2 = \frac{[\text{NaOH}]^2[\text{BaR}]}{[\text{Na}_2\text{R}][\text{Ba}(\text{OH})_2]} \quad (5)$$

Según las consideraciones hechas con anterioridad y teniendo en cuenta que tanto el Ba(OH)<sub>2</sub> como el Na(OH) son bastante solubles se puede concluir que la reacción depende

ahora de las solubilidades de la Sal Sódica y la correspondiente que resulte del Bario, o sea, que la producción de NaOH será mayor a medida que la Sal de Sodio sea más soluble y la correspondiente del Bario sea menos soluble.

Como en el caso anterior se calculó la tabla siguiente:

TABLA N° 3.

Substancia	Solubilidad a 20° C (Mol. gr. por litro de agua)
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.39258
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.88104
NaHCO <sub>3</sub>	1.04749
NaCl	4.34710
NaNO <sub>3</sub>	11.64300
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.03889
BaCO <sub>3</sub>	0.00011
BaSO <sub>4</sub>	0.00001
Ba(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—
BaCl <sub>2</sub>	1.78893
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.40552
Ba <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Insoluble

De los datos anteriores puede concluirse que: la Sal de Sodio que presenta mayores ventajas es el Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, pues siendo el Ba<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> completamente insoluble la lejía cáustica resultante tendrá una impureza menos y teóricamente el rendimiento de la reacción será igual al 100%, es decir, el fostato de Sodio se transformará íntegramente.

El nitrato de Sodio tiene la ventaja de ser muy soluble, pero siendo también elevada la solubilidad del Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, resultará la Sosa Cáustica impurificada con cantidades muy apreciables de Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, lo cual representa un serio inconveniente, debido a que la lejía se tendrá que someter a una cristalización fraccionada para eliminar el Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

En cuanto al cloruro de Sodio, basta decir que el BaCl<sub>2</sub> es muy soluble, para considerarlo como una materia prima conveniente en el proceso de caustificación. Además el margen

de solubilidad no es tan apreciable como en el caso del  $\text{NaNO}_3$  y otros.

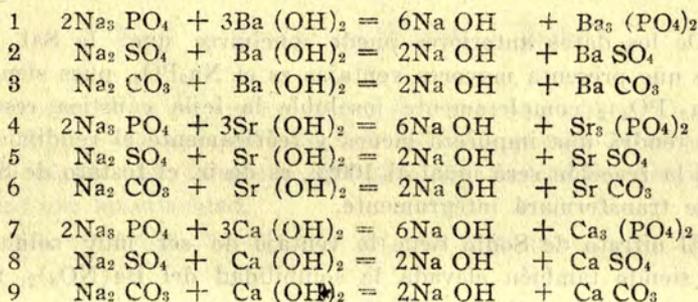
Puede considerarse que el Bicarbonato de Sodio tiene las mismas características que el carbonato, como materia prima, pero desde el punto de vista químico se comprende que el mismo peso de bicarbonato produce cantidades menores de  $\text{NaOH}$  y por lo tanto es siempre preferible usar sales neutras que sales ácidas.

Tanto el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  como el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se pueden considerar como materias primas muy apropiadas para la caustificación puesto que presentan las condiciones de alta solubilidad y las sales de Ba. correspondientes son muy poco solubles.

Debe notarse que la solubilidad del  $\text{BaSO}_4$  es diez veces menor que la del  $\text{BaCO}_3$ , y en cambio, la del  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  es solamente la mitad que la del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , por lo que el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  resulta ser una materia prima mejor que el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

De acuerdo con las deducciones hechas con ayuda de los valores que se incluyen en las tablas (2) y (3) creo conveniente clasificar por orden de importancia las reacciones que presentan mayores ventajas:

TABLA N° 4.



El orden en que aparecen las ecuaciones anteriores no es riguroso, pues solamente se ha tenido en cuenta, para ordenarlas, que la mejor sal sódica es, según se deduce de las consideraciones preliminares hechas con anterioridad, el  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , siguiendo en importancia el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y por último el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Establecido esto, se han escrito las ecuaciones teóricas que re-

sultan tratando cada una de estas sales con los hidróxidos de Ca, Sr, y Ba, de los cuales el  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  es el mejor, siguiendo en orden de importancia los hidróxidos de Sr y Ca.

Para rectificar el orden establecido en el cuadro anterior, pero sin pretender por lo pronto calcular los rendimientos reales de cada reacción, emplearé algunos métodos comparativos, para lo cual haré las siguientes consideraciones:

El producto de solubilidad de un hidróxido alcalino-térreo de la fórmula general  $\text{Me}(\text{OH})_2$  es:

$$P = [\text{Me}^{++}] [(\text{OH})^-]^2 \quad (6)$$

Como se producen dos iones  $(\text{OH}^-)$  por cada ion  $(\text{Me}^{++})$ , la concentración de  $(\text{OH})^-$  en iones gramo por unidad de volumen es el doble de la concentración de los iones  $(\text{Me}^{++})$ , o sea que:

$$[(\text{OH})^-] = 2 [\text{Me}^{++}] \quad (7)$$

$$[\text{Me}^{++}] = \frac{[(\text{OH})^-]}{2} \quad (8)$$

y por lo tanto podemos expresar el producto de solubilidad en la forma siguiente:

$$P = [\text{Me}^{++}] \times 4 [\text{Me}^{++}]^2 \quad (9)$$

$$P = 4 [\text{Me}^{++}]^3 \quad (10)$$

Si se supone que todo el  $\text{Me}(\text{OH})_2$  disuelto está dissociado, la concentración en iones gramo de  $(\text{Me}^{++})$  será igual a la solubilidad  $S$  del  $\text{Me}(\text{OH})_2$  expresada en moléculas gramo por unidad de volumen, puesto que cada molécula gramo de  $\text{Me}(\text{OH})_2$  dá solamente un ion gramo de  $(\text{Me}^{++})$ . Por lo tanto:

$$P = 4 S^3 \quad (11)$$

Pero si el factor de ionización del  $\text{Me}(\text{OH})_2$  es  $f$ , el producto de solubilidad será:

$$P = 4 f^3 S^3 \quad (12)$$

Por la definición misma de Producto-de-Solubilidad, se comprende que esto es aplicable solamente a soluciones saturadas de  $\text{Me}(\text{OH})_2$ .

También se puede expresar el producto de solubilidad en función de la concentración de los iones  $(\text{OH})^-$ , lo cual se deriva de las ecuaciones (6) y (8):

$$P = \frac{[(\text{OH})^-]^2}{2} \quad (13)$$

$$P = \frac{[(\text{OH})^-]^3}{2} \quad (14)$$

De las ecuaciones (10) y (14) resulta entonces:

$$4 [\text{Me}^{++}]^3 = \frac{[(\text{OH})^-]^3}{2} \quad (15)$$

o sea:

$$[\text{Me}^{++}]^3 = \frac{[(\text{OH})^-]^3}{8} \quad (16)$$

y sacando raíz cúbica en ambos miembros:

$$[\text{Me}^{++}] = \frac{[(\text{OH})^-]}{2} \quad (17)$$

que es exactamente lo expresado por la ecuación (8).

Supongamos ahora que a una solución saturada de  $\text{Me}(\text{OH})_2$ , se le agrega una cantidad X de un electrolito muy soluble que produce AX iones gramo de  $(\text{OH})^-$

Resulta entonces, según la ecuación (6), que al aumentar la concentración de los iones  $(\text{OH})^-$  la concentración de los iones  $(\text{Me}^{++})$  tendrá que disminuir para que P permanezca constante.

La nueva concentración de los iones  $(\text{OH})^-$  en la solución sería:

$$[(\text{OH})^-]_i + \text{AX} = 2f_s + \text{AX} \quad (18)$$

en la que  $[(\text{OH})^-]_i$  es la concentración inicial de los iones  $(\text{OH})^-$ .

Esta ecuación se deduce de acuerdo con los razonamientos hechos para obtener las ecuaciones (11) y (12), y teniendo en cuenta que inicialmente se tenían dos iones  $(\text{OH})^-$  por cada molécula disociada.

Pero resulta que la concentración final de iones  $(\text{OH})^-$  debida al  $\text{Me}(\text{OH})_2$  disociado, ya no es igual a la inicial, puesto que la solubilidad del  $\text{Me}(\text{OH})_2$  ha disminuido, y, por consiguiente, la concentración final de los iones  $(\text{OH})^-$  será igual a la suma de las concentraciones producidas por el  $\text{Me}(\text{OH})_2$  desociado en las condiciones finales y por el nuevo electrolito agregado.

Por lo que la ecuación (18) representa una concentración final en el caso de que la solución no fuera saturada. Como en nuestro caso, estamos suponiendo que las soluciones están siempre saturadas con  $\text{Me}(\text{OH})_2$  la concentración final de los iones  $(\text{OH})^-$  será:

$$[(\text{OH})^-]_f = 2f_1 S_1 + \text{AX} \quad (19)$$

La concentración de los iones  $(\text{Me}^{++})$ , tendrá que abatirse proporcionalmente a lo establecido por las ecuaciones (8) y (17). Por lo que la nueva concentración de los iones  $(\text{Me}^{++})$  será:

$$[\text{Me}^{++}]_f = f_1 S_1 = [\text{Me}^{++}]_i - \frac{\text{AX}}{2} \quad (20)$$

en la que  $f_1$  y  $S_1$  son el factor de ionización y la solubilidad finales del  $\text{Me}(\text{OH})_2$ , y  $[\text{Me}^{++}]_i$  es la concentración inicial de iones ( $\text{Me}^{++}$ ).

Ahora bien, sabemos que la concentración inicial de los iones ( $\text{Me}^{++}$ ) es:

$$[\text{Me}^{++}]_i = fS \quad (21)$$

y substituyendo este valor en la ecuación (20) se tiene:

$$[\text{Me}^{++}]_f = fS - \frac{AX}{2} \quad (22)$$

Substituyendo los valores de las nuevas concentraciones que indican las ecuaciones (19) y (20) en la ecuación (6), se tiene:

$$P = f_1 S_1 (2 f_1 S_1 + AX)^2 \quad (23)$$

e igualando las ecuaciones (12) y (23):

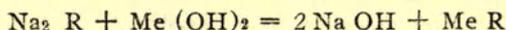
$$4 f^3 S^3 = f_1 S_1 (2 f_1 S_1 + AX)^2 \quad (24)$$

o también:

$$2 (fS)^{1.5} = 2 (f_1 S_1)^{1.5} + (f_1 S_1)^{0.5} AX \quad (25)$$

Hechas estas consideraciones, trataremos ahora de aplicarlas, para investigar de un modo comparativo, cuál de las reacciones que figuran en la tabla 3 es la mejor, y el orden de importancia de las restantes.

Consideremos la reacción general que nos representa el fenómeno del que las nueve reacciones mencionadas son casos particulares:



Ya hemos dicho que la reacción se verificará hasta que la solubilidad del  $\text{Me}(\text{OH})_2$  se iguale con la del  $\text{MeR}$ .

Es evidente, por otro lado, que los iones ( $R^-$ ) producidos por el  $Na_2R$  en solución, y los iones  $Me^{++}$  que resultan por la disociación de  $Me(OH)_2$ , abaten la solubilidad del  $MeR$ .

De esto resulta que el rendimiento de la reacción se incrementa puesto que la solubilidad del  $MeR$  se abate en presencia de los iones ( $R^-$ ) y ( $Me^{++}$ ).

Sin embargo, supongamos, por el momento, que la solubilidad del  $MeR$  no se altera, y que, por lo tanto, la reacción se llevará a cabo hasta que la solubilidad del  $Me(OH)_2$  se abata hasta igualarse con la del  $MeR$ .

Entonces, si con la ayuda de la ecuación (12) calculamos el producto de solubilidad del  $Me(OH)_2$ , y este valor lo sustituimos en la (24) considerando que  $f_1 = 1$ , puesto que la concentración es muy pequeña, y haciendo  $S_1 =$  solubilidad del  $MeR$ , o sea la solubilidad final del  $Me(OH)_2$ ; podremos calcular la cantidad de  $Na(OH)$  que es necesaria para que la solubilidad del  $Me(OH)_2$  disminuya hasta igualarse con la del  $MeR$ . Es decir, calcular la cantidad de sosa que se producirá en cada reacción, puesto que esa cantidad determinará el estado de equilibrio, o sea la cantidad de  $Na(OH)$  necesaria para igualar las solubilidades del  $Me(OH)_2$  y del  $MeR$ , sin tener en cuenta, por lo pronto, la influencia que puedan tener las otras sustancias presentes en la solución.

De esta manera podemos ya calcular el rendimiento aparente de cada reacción y determinar de un modo comparativo el mayor o menor grado de conversión de las reacciones citadas.

En la tabla siguiente aparecen los resultados calculados con la ayuda de la ecuación (24). En estos cálculos se han tomado como bases comparativas las siguientes:

- a) El volumen de reacción es igual a un litro.
- b) Las cantidades de materias reaccionantes son las correspondientes a una molécula gramo de  $Me(OH)_2$ , es decir, en el caso de las reacciones con el  $Na_3PO_4$  se han tomado las dos terceras partes de una molécula gramo, habiéndose reducido proporcionalmente las solubilidades de los fosfatos resultantes.
- c) Las temperaturas inicial y de equilibrio se consideran iguales a  $20^\circ C$ .
- d) Por carencia de mejores datos, se ha supuesto que el  $NaOH$  se disocia siempre un 73%, o sea que  $A = 0.73$ .

e) Todos los datos relativos a solubilidades y factores de disociación fueron tomados del Hand-book of Chemistry and Phisics de Hodgman & Lange, edición de 1938.

TABLA N° 5

Me(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> R	f	S	f <sub>i</sub>	S <sub>1</sub>	A	X	% de Transf. de las Mat. R
Ba(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.92	1.55310	—	insoluble	0.73	∞	100.00
Ba(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.92	1.55310	1	0.00001	0.73	173.96	100.00
Ba(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.92	1.55310	1	0.00011	0.73	39.37	100.00
Sr(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.93	0.03521	—	insoluble	0.73	∞	100.00
Sr(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.93	0.03521	1	0.00062	0.73	0.5831	29.15
Sr(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.93	0.03521	1	0.00007	0.73	1.7391	86.95
Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.90	0.02051	1	0.00006	0.73	0.8869	44.34
Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.90	0.02051	1	0.00131	0.73	0.1863	9.31
Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.90	0.02051	1	0.00065	0.73	0.2686	13.41

Los resultados que aparecen en la columna X no pueden tener significado absoluto, pues se comprende que el límite del número de moléculas gramo de NaOH que pueden agregarse a la solución está fijado por su solubilidad y por lo tanto su valor es solamente comparativo. En la columna correspondiente al porciento de transformación de las materias reaccionantes queda establecido el rendimiento teórico de cada reacción, suponiendo, como ya se ha dicho, que las demás substancias presentes no afectan en ningún sentido la solubilidad del Na<sub>2</sub>R.

Sin embargo, los datos numéricos de la columna X nos sirven para determinar un orden más racional de las 9 reacciones que forman la tabla N° 4. En la tabla siguiente aparecen clasificadas por orden de importancia las reacciones mencionadas, según los datos de la tabla N° 5.

TABLA N<sup>o</sup> 6

SUBSTANCIAS REACCIONANTES		% de Transformación.
Me(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> R	
Ba(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	100.00
Sr(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	100.00
Ba(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100.00
Ba(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	100.00
Sr(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	86.95
Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	44.34
Sr(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	29.15
Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	13.41
Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9.31

De los resultados que quedan asentados en las tablas 5 y 6, podemos sacar, las siguientes conclusiones:

1<sup>o</sup>—La mejor sal sódica de las consideradas es sin duda el Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, pues a pesar de no haberse considerado la influencia que tienen el Me(OH)<sub>2</sub> y la misma sal sobre la solubilidad de los fosfatos resultantes, en los tres casos es la que da los altos rendimientos.

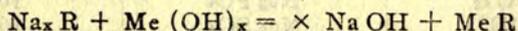
2<sup>o</sup>—En el caso del Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> podemos ver que, cuando se tratan con Ba(OH)<sub>2</sub>, el resultado es más efectivo, teóricamente, cuando se emplea Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Pero si tenemos en cuenta que en ambos casos el rendimiento es igual al 100%, resulta que, prácticamente, el resultado es igual. En cambio cuando estas mismas sales se tratan con Sr(OH)<sub>2</sub> o Ca(OH)<sub>2</sub>, el resultado es más satisfactorio cuando se emplea Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, por lo que puede decirse que, en general, es más conveniente el empleo del Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> que el de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Esto destruye la suposición hecha con anterioridad al analizar superficialmente los valores de las solubilidades que figuran en la tabla N<sup>o</sup> 3.

3<sup>o</sup>—Por último se puede concluir que el mejor hidróxido alcalino-térreo es el Ba(OH)<sub>2</sub>, siguiendo por orden de importancia el Sr(OH)<sub>2</sub> y el Ca(OH)<sub>2</sub>, pues todos los valores que figuran en la columna X de la tabla N<sup>o</sup> 5, considerando cada sal por separado, nos llevan inmediatamente a esa conclusión. Es-

to viene a afirmar una de las conclusiones deducidas, al considerar las solubilidades de la tabla N<sup>o</sup> 2.

Estas conclusiones pueden ser rectificadas o raeficadas si nos valemos de otro método comparativo que, basándose en principios distintos nos pueda dar una idea de la efectividad de las reacciones anteriores.

La constante de equilibrio de la reacción general:



es:

$$K = \frac{[\text{Na OH}]^x [\text{Me R}]}{[\text{Na}_x \text{R}] [\text{Me} (\text{OH})_x]} \quad (26)$$

De esto se deduce que a valores mayores de K corresponde una mayor producción de NaOH, y, por lo tanto, un rendimiento mayor de la reacción.

Ahora bien, la expresión termodinámica que nos liga la energía libre de una reacción con la constante de equilibrio es:

$$\Delta F = - RT \text{Log } K \quad (27)$$

en la que  $\Delta F$  es la variación de la energía libre, y tanto R como  $\Delta F$  se expresan en calorías.

Por otro lado, la ecuación de Gibbs-Helmholtz establece que:

$$\Delta F - \Delta H = T \left( \frac{\partial (\Delta F)}{\partial T} \right)_p \quad (28)$$

siendo  $\Delta H$  el calor de reacción a presión constante, T la temperatura absoluta, y  $\partial(\Delta F)/\partial T$  la velocidad de cambio de la energía libre por unidad de temperatura.

Para emplear esta ecuación en el cálculo de  $\Delta F$ , y poder posteriormente calcular el valor real de K con la ayuda de la ecuación (27), sería menester llevar a cabo numerosos experimentos en aparatos sumamente exactos.

Pero siendo nuestro propósito únicamente comparativo, po-

demostramos suponer que la temperatura, durante la reacción, permanece invariable, resultando de esto que:

$$T \left( \frac{\delta (\Delta F)}{\delta T} \right)_p = 0 \quad (29)$$

y la ecuación (28) se nos transformaría en:

$$\Delta F = \Delta H \quad (30)$$

De este modo, y con ayuda de los calores de formación podemos calcular los calores de reacción en los diferentes casos, y empleando la ecuación (27) se pueden deducir valores numéricos de K cuyo significado sería solamente comparativo.

Siguiendo este camino, se calcularon los diferentes valores de K suponiendo a T constante e igual a 20°C, o sea 193 absolutos. Además, por comodidad, se transformó la ecuación (27) en la siguiente forma:

$$\log_{10} K = - \frac{\Delta F}{2.3 RT} \quad (31)$$

Los resultados obtenidos quedan resumidos en la siguiente tabla:

T A B L A N ° 7

Substancias Reaccionantes		$\Delta H$ ó $\Delta F$ (Cal—Kg)	$\log_{10} K$	K
Me (OH)x	Na <sub>x</sub> R			
Ba(OH)2	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	—260.5	0.19328	1.5606
Sr(OH)2	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	—220.0	0.16326	1.4563
Ba(OH)2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	— 77.5	0.05750	1.1416
Ba(OH)2	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	— 75.3	0.05587	1.1373
Sr(OH)2	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	— 64.8	0.04808	1.1171
*Ca(OH)2	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	—149.0	0.11055	1.2899
Sr(OH)2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	— 61.3	0.04548	1.1104
Ca(OH)2	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	— 43.1	0.03198	1.0765
Ca(OH)2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	+ 21.8	1.98383	0.9634

En esta tabla se tabularon los cálculos de acuerdo con el orden de la tabla N° 6, y, como podemos apreciar, solamente en

el caso del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  con  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  no están de acuerdo las tablas 6 y 7. Sin embargo, las conclusiones que podemos deducir, referentes a la efectividad de los hidróxidos alcalinos entre sí, y de las diferentes sales, son exactamente las mismas; pues en ambos casos resulta que el mejor hidróxido es el  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  siguiendo en importancia el  $\text{Sr}(\text{OH})_2$  y el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , así como la superioridad del  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  sobre las otras dos sales. Además, en el caso del  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , resulta también que al tratarse con  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , los resultados serán mejores teóricamente con el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , y en cambio, al tratarlos con  $\text{Sr}(\text{OH})_2$  o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el carbonato es superior al sulfato.

Por lo tanto, podemos decir que la diferencia que resulta comparando las tablas 6 y 7 entre si no es fundamental, si tenemos en cuenta que, por carencia de datos, no se tomaron en consideración los calores de solución en los cálculos que se resumen en la tabla 7.

## EXPERIMENTACION

Basado en el hecho de que ningún proceso puede llegar a industrializarse partiendo de una base puramente teórica, y para rectificar con ayuda de datos más reales el orden de importancia de las reacciones que nos ocupan, se procedió a llevar a cabo todas ellas en el laboratorio, y en las mismas condiciones de temperatura, presión y concentración molecular, a fin de que esta experimentación pudiera proporcionararnos datos comparativos.

Las condiciones generales fijadas para el desarrollo de este trabajo experimental son las siguientes, haciendo uso siempre de sustancias químicamente puras.

a) Se calcularon para cada caso las cantidades teóricas de cada sal que se requieren para reaccionar con una molécula gramo de  $\text{Me}(\text{OH})_2$ . Es decir, las necesarias para obtener 2 moléculas gramo de  $\text{NaOH}$ .

b) Se disolvió en 500 cc. de agua destilada la cantidad calculada de sal.

c) Se agregó a una molécula gramo del óxido alcalino-terreo la cantidad necesaria de agua para transformarlo en hidróxido.

d) Hecho esto, se dejaron reposar las soluciones de las sales sódicas y los hidróxidos alcalino-térreos formados, hasta que su temperatura fuera de 20°C.

e) Logrado lo anterior, se agregó en cada caso, poco a poco y agitando, la solución de la sal sódica al hidróxido correspondiente, y se agitó intensamente durante 15 m., mediante un agitador mecánico, procurando mantener la temperatura constante (20° C.).

f) Para evitar en lo posible algún error de manipulación, se lavó repetidas veces el vaso que contenía la solución de sal, hasta que el volumen total de agua de lavado fuera de 200 cc.

g) A continuación se filtraron las soluciones, lavándose el precipitado con 300 cc. de agua destilada.

h) El volumen de filtrado obtenido se aforó a un litro, y se determinó su alcalinidad haciendo uso de los métodos químicos más usuales.

i) De las cantidades de NaOH encontradas en los diferentes filtrados obtenidos, se calculó el rendimiento de cada reacción tomando como base que el 100% de rendimiento debía corresponder en todos los casos a una producción de 2 moléculas gramo de sosa (80 gr.).

Los resultados de esta experimentación preliminar quedan resumidos en la tabla siguiente:

T A B L A N° 8

SUBSTANCIAS REACCIONANTES				Na OH (gr.)		Rendimientos %
SAL SODICA		OXIDO		Teórica	Obtenida	
Fórmula	Gramos	Fórmula	Gramos			
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	109.4	Ba O	153.4	80.0	78.64	98.3
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142.0	Ba O	153.4	80.0	73.20	91.5
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106.0	Ba O	153.4	80.0	72.56	90.7
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	109.4	Sr O	103.6	80.0	76.56	95.7
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142.0	Sr O	103.6	80.0	64.48	80.6
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106.0	Sr O	103.6	80.0	69.76	87.2
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	109.4	Ca O	56.0	80.0	66.40	83.0
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142.0	Ca O	56.0	80.0	60.80	76.0
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106.0	Ca O	56.0	80.0	63.20	79.3

Las conclusiones generales que podríamos deducir de los datos anteriores son completamente análogas a las que ya se dedujeron de la tabla N<sup>o</sup> 6.

Puede apreciarse, sin embargo, que los rendimientos de cada reacción, en particular, no concuerdan con los que se calcularon teóricamente haciendo uso de las solubilidades, lo cual es lógico si recordamos que en el caso de la tabla N<sup>o</sup> 6 no se tomó en cuenta la influencia de todas las sustancias presentes, sobre las solubilidades del  $\text{Me}(\text{OH})_2$  y el  $\text{MeR}$ .

Debe notarse también que ninguna de las reacciones verificadas en el laboratorio dió un rendimiento de 100%. Esto queda perfectamente explicado si tenemos en cuenta que ninguna de estas reacciones se puede verificar instantáneamente. Y como no existen datos relativos a las diferentes velocidades de reacción, además de que su cálculo resultaría complicado, debemos anotar una vez más que todo lo que hemos asentado no puede tener un significado absoluto, sino solamente comparativo.

## CONSIDERACIONES ECONOMICAS

En el transcurso de este capítulo nos hemos dado ya una idea bastante clara sobre lo referente a la efectividad de las diferentes sustancias que pueden servir para la preparación de Sosa Cáustica, y durante todo su desarrollo nos hemos ocupado solamente de la parte química del proceso, sin tener en cuenta la parte económica, cuyo papel es tan definitivo en cualquier procedimiento de fabricación.

Sabemos que una materia prima, para ser utilizable industrialmente, debe tener las siguientes características:

1<sup>o</sup>—**Abundancia:** Esto es, que la sustancia exista en el mercado en cantidades tales que permitan llevar a cabo la elaboración durante bastante tiempo; cuando menos el necesario para amortizar el capital invertido en la instalación, a fin de no exponerse a la considerable pérdida que ocasionaría una paralización completa de las actividades.

2<sup>o</sup>—**Calidad:** O sea, que la sustancia se encuentre libre de impurezas, o al menos que éstas existan en una proporción tal que evite en lo posible tratamientos previos de purificación,

los cuales ocasionan generalmente gastos excesivos, además de constantes pérdidas de materia prima.

Es asimismo de capital importancia que la materia prima pueda adquirirse de una calidad constante, pues fácilmente se comprenderá que de variar la pureza tendrán que modificarse los métodos de purificación y elaboración, y cambiarán los gastos de transformación, los que, a su vez, hacen variar el costo unitario de producción.

**3º—Precio:** Esta es una de las condiciones fundamentales para la industrialización de un proceso cualquiera.

El costo de producción de todo producto elaborado puede considerarse como la suma de tres factores:

- a) Costo de la materia prima por unidad de producto.
- b) Costo unitario de transformación, o sea el gasto requerido para la transformación de la materia prima, por unidad de producto, cuyo valor depende directamente del proceso y de la perfección del trabajo durante el ciclo de transformación.
- c) Utilidades mínimas que deberán justificar la instalación de la planta.

Puede entonces afirmarse que, si el costo de la materia prima necesaria para obtener la unidad de producto es superior al precio de venta, el proceso es incosteable, y debe existir un margen entre estos valores cuyo monto queda fijado por los factores (b) y (c).

Además, el proceso resultaría mejor, desde el punto de vista económico, a medida que (a) y (b) sean menores.

Teniendo en cuenta lo anterior, analicemos ahora cada una de las condiciones mencionadas, y tratemos de seleccionar el hidróxido y la sal sódica más conveniente económicamente para la fabricación de la sosa cáustica, en nuestro medio.

Haremos en primer lugar algunas consideraciones relativas a los hidróxidos alcalino-térreos. Como generalmente éstos se producen en el sitio donde se utilizan partiendo del óxido correspondiente, nos limitaremos a considerarlos como óxidos.

El único óxido alcalino-térreo verdaderamente abundante es el  $\text{CaO}$ . Se produce en diferentes sitios de la República, siendo uno de los mejores el que se obtiene en Apasco, y su calidad oscila entre el 77 y 80% de pureza.

En cambio, los óxidos de Ba y Sr, son muy escasos, y sobre

todo el Sr. razón por la cual alcanzan precios enteramente prohibitivos para su empleo en la caustificación. En la lista siguiente nos podemos dar una idea preliminar sobre la enorme diferencia de precios que existe entre los óxidos:

Oxido	Precio por 100Kg. Dlls.
BaO	315.00
SrO	800.00
CaO (80%)	0.42

Como la sosa cáustica tiene un precio actual menor de 9 dólares por 100 Kg. resulta que el único óxido que actualmente presenta posibilidades industriales es el CaO. Sin embargo, debe tenerse presente que si se llegan a obtener posteriormente grandes cantidades de BaO o SrO, de modo que puedan emplearse, debe tratarse inmediatamente de usarlos en lugar del CaO debido a su superioridad como agentes caustificadores.

De las tres sales de sodio que nos ocupan, puede decirse que las tres son abundantes, y por lo tanto su precio no parece ser muy elevado, cuando menos con relación al de los óxidos de Sr y Ba. Las tres pueden adquirirse en cantidades apreciables, y su pureza es bastante constante.

Para darnos una idea de la sal que presenta mejores posibilidades económicas, se calculó la tabla siguiente, suponiendo que la transformación en todos los casos es igual al 100%, en la cual se incluyen los datos relativos a los óxidos de Ba y Sr, para reafirmar sus pocas posibilidades de ser usados por lo pronto debido a su elevadísimo precio.

TABLA Nº 9.

MATERIAS PRIMAS	Precio de 100 Kg. de Mat. Prima (Dólares)	Kg. Necesarios para producir 100 Kg. de NaOH de 99%	Costo de la Mat. prima por cada 110 Kg Na OH de 99% (Dólares)
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	19.00	10.383	19.73
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (99%)	4.21	132.50	5.58
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10H <sub>2</sub> O (96%)	6.20	318.64	17.79
Ba O	315.00	145.73	459.05
Sr O	800.00	98.42	787.36
Ca O (80%)	0.42	66.50	0.28

Como el precio actual de los 100 Kgs. de NaOH de 99% es 8.32 Dlls. los óxidos de Ba y Sr resultan inmediatamente descartados como agentes caustificantes industriales, pues para poder ser usados como tales sería necesario una disminución casi imposible de su precio. En cambio, el CaO presenta un valor bastante bajo, y esto lo coloca en un sitio tal que por ahora se le puede considerar como un agente único desde el punto de vista industrial.

Resulta así que, si sumamos el precio de las diferentes sales que se necesitan para producir 100 Kgs. de NaOH de 99% con el precio de CaO necesario, obtenemos las cifras siguientes:

Materias Primas	Costo Total
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> y CaO	Dlls. 20.01
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y CaO	5.86
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y CaO	20.03

Destácase desde luego el costo de las materias primas que se tiene actualmente empleando Na<sub>2</sub> CO<sub>3</sub> y CaO. La diferencia entre este costo y el precio actual de la sosa cáustica de 99% es de 2.46 Dlls. por cada 100 Kgs. de producto. Es decir, esos 2.46 Dlls. nos limitan el costo de transformación y las utilidades que debe percibir tanto el industrial como el distribuidor.

En el caso del Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, el costo de las materias primas es excesivo. Como ambas materias son importadas, la única posibilidad que tienen para poder ser utilizables industrialmente, sería que fueran producidas en la República Mexicana a un costo menor, lo cual no es imposible, si al efecto, se explotan las salinas de Viesca en el estado de Coahuila, de manera de obtener la sal de Glauber (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. 10H<sub>2</sub>O), es posible que su costo resultara lo suficientemente bajo para poder ser empleada en la caustificación. En este caso es menester anotar que el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, debería usarse al caustificar con el hidróxido de Bario, pues como ya hemos anotado anteriormente, esta sal, al ser tratada con Ca(OH)<sub>2</sub> y Sr(OH)<sub>2</sub> su efectividad es inferior de la del Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

Sin embargo, no es posible todavía afirmar con certeza que la caustificación del carbonato de sodio pueda llevarse a cabo,

con éxito económico en México, sobre todo si ésto se hace en gran escala, pues como el carbonato no se produce todavía en cantidades suficientes en México, habría necesidad de importarlo. Esto podría originar una política proteccionista de parte de los países productores de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaOH}$ , elevando de tal modo el precio del carbonato, que haría imposible su empleo en la caustificación.

Además, si analizamos cuidadosamente las variaciones de los precios del carbonato y la sosa cáustica en el mercado durante los últimos años, notaremos que existe una marcada tendencia a disminuir la diferencia que existe entre los precios de ambos productos. Esto quedará confirmado en el curso del siguiente capítulo.

Se puede concluir, finalmente, que la sal y el hidróxido que presentan actualmente posibilidades económicas, son el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Hemos visto, por otro lado, que estas dos substancias son aparentemente casi las menos apropiadas, atendiendo a los resultados de la tabla N° 6.

En el capítulo siguiente trataremos más a fondo, desde los puntos de vista teórico, práctico y económico, las posibilidades de éxito que presenta en nuestro medio la caustificación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

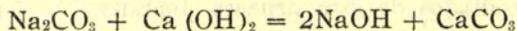
### CAPITULO III.

## Cautificación del Carbonato de Sodio

En el capítulo anterior hemos llegado a la conclusión de que las materias primas que presentan alguna posibilidad de ser empleadas industrialmente, en nuestro medio, para la fabricación de la sosa cáustica son el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Hemos visto también, con la ayuda de métodos comparativos, que de las diferentes reacciones químicas que pueden servir para el objeto, la planteada entre el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es una de las menos eficientes desde el punto de vista puramente químico.

Ahora bien, si los resultados que aparecen en la tabla N<sup>o</sup> 6 del capítulo anterior, tuviesen un significado absoluto, llegaríamos a la conclusión de que, el costo del carbonato de sodio y la cal necesaria para obtener una cantidad cualquiera de  $\text{NaOH}$ , sería superior al precio de la sosa cáustica producida, y por lo tanto no se tendría en la actualidad ninguna posibilidad de industrializar ninguno de los métodos planteados, pues además del bajo rendimiento de la reacción:



la sosa cáustica resultante tendría un alto porcentaje de impurezas, principalmente de carbonato de sodio.

Afortunadamente se ha observado ya que la presencia de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en la solución, afectan directamente la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , y como éste se vuelve menos soluble, resulta que la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tendrá que abatirse en una proporción mayor para alcanzar el equilibrio. Es decir, será necesaria una mayor producción de  $\text{NaOH}$  para abatir la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hasta igualarla con la del  $\text{CaCO}_3$ .

A continuación presento un ensayo sobre las diferentes consideraciones teóricas que pueden hacerse, relativas al cálculo del rendimiento de la reacción que se verifica entre el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Además, en el curso del presente capítulo describiré algunas experiencias llevadas a cabo en el laboratorio, y finalmente se harán algunas consideraciones de carácter económico.

## TEORIA

Al tratar de calcular el rendimiento de la reacción que nos ocupa, se ocurre investigar en primer lugar las variaciones del rendimiento con la temperatura.

Con el objeto de hacer una investigación preliminar sobre este punto, se ha hecho uso del método empleado en el capítulo anterior, es decir, se ha empleado nuevamente un método puramente comparativo.

En el cálculo de las variaciones del rendimiento con la temperatura se usó la fórmula N<sup>o</sup> 24 del capítulo anterior, y se establecieron las siguientes bases:

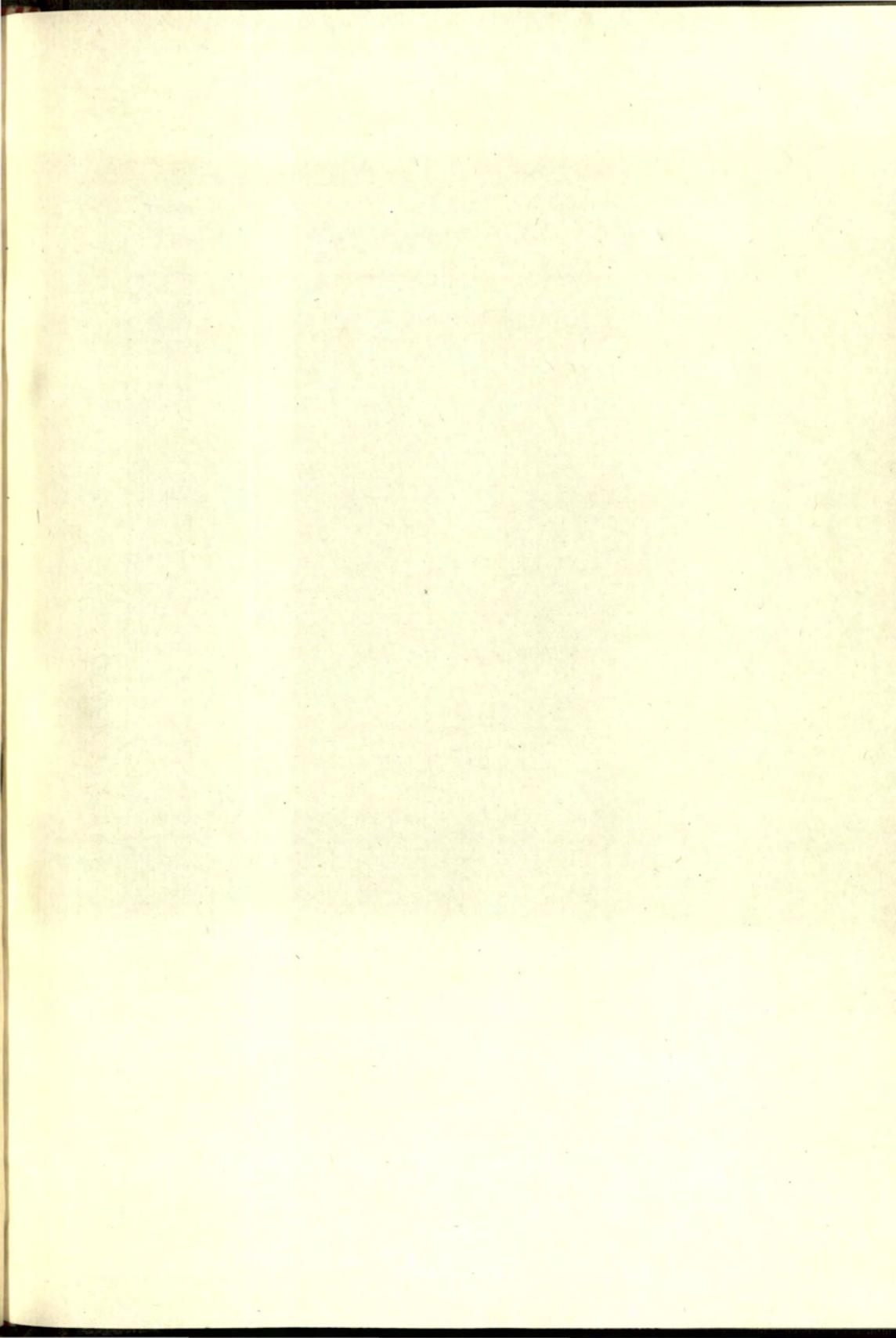
1<sup>o</sup>—Concentración, 1 Mol-gr de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  por litro de agua.

2<sup>o</sup>—Factor de ionización del  $\text{NaOH}$ , constante e igual a 0.73.

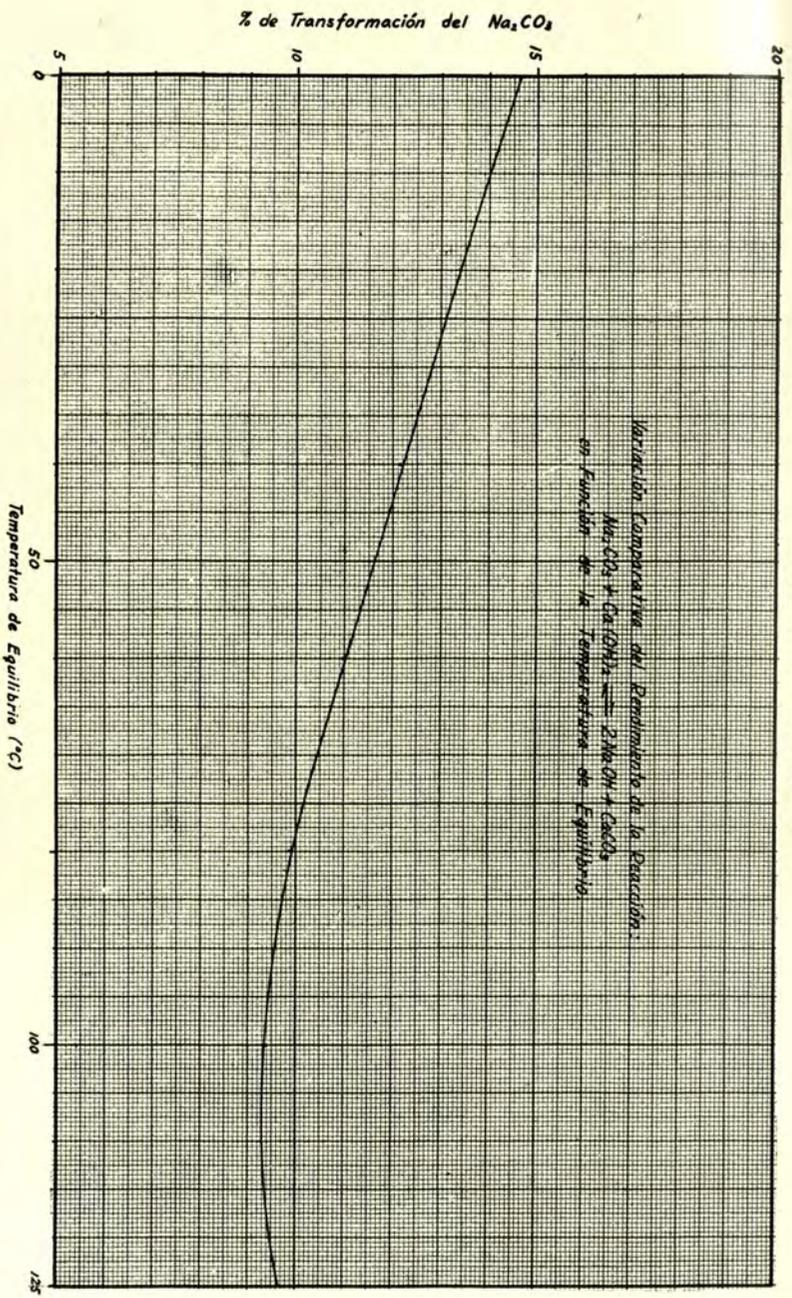
3<sup>o</sup>—Factor inicial de ionización del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , constante e igual a 0.90.

4<sup>o</sup>—Factor final de ionización del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , constante e igual a 1.00.

Los resultados de esta primera tentativa hecha para tener una idea sobre la ventaja que presentaría una mayor temperatura inicial y de equilibrio, quedan resumidos en la tabla siguiente:



# GRAFICA Nº 1 BIS



T A B L A N ° 1

Temperatura de Equilibrio °C	Mols-gr. de Na OH Producidas	% de Transformación del Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
0	0.29810	14.655
10	0.27808	13.904
20	0.26820	13.410
30	0.25662	12.831
40	0.24256	12.128
50	0.23012	11.506
60	0.21983	10.991
70	0.21006	10.503
80	0.19672	9.836
90	0.19025	9.512
100	0.18675	9.337
110	0.18506	9.253
120	0.18853	9.426

Como se puede apreciar, los rendimientos decrecen a medida que aumenta la temperatura, llegando a alcanzar un mínimo. Para darnos una idea mejor de estas variaciones, se construyó la siguiente gráfica.

GRAFICA No. 1 Bis

Los resultados de esta investigación preliminar nos llevan a la conclusión de que, lo más conveniente, es que la temperatura de equilibrio sea lo más baja posible, pero no nos da ninguna idea todavía sobre cuál puede ser el rendimiento real de la reacción que nos ocupa, ni nos señala un camino definitivo, desde el punto de vista teórico, para atacar nuestro problema.

Nos falta recurrir, usando el método comparativo que hasta aquí hemos empleado, al cálculo de los rendimientos, variando la concentración y manteniendo constante la temperatura inicial y de equilibrio.

En la tabla y gráfica siguientes se encuentran los resultados obtenidos al variar la concentración de las substancias reaccionantes, desde 1 Mol-gr de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> por litro, hasta 1 Mol-gr de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> por 10 litros:

TABLA N° 2

Volumen de Agua (Lts.)	Mols-gr. de NaOH requeridas para abatir la solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$	% de Trans-formación del $\text{Na}_2\text{CO}_3$
1	0.26513	13.256
2	0.52920	26.460
3	0.79366	39.183
4	1.03392	51.696
5	1.32302	66.151
6	1.58808	79.404
7	1.86066	93.033
8	2.11685	105.842
9	2.38144	119.072
10	2.64590	132.295

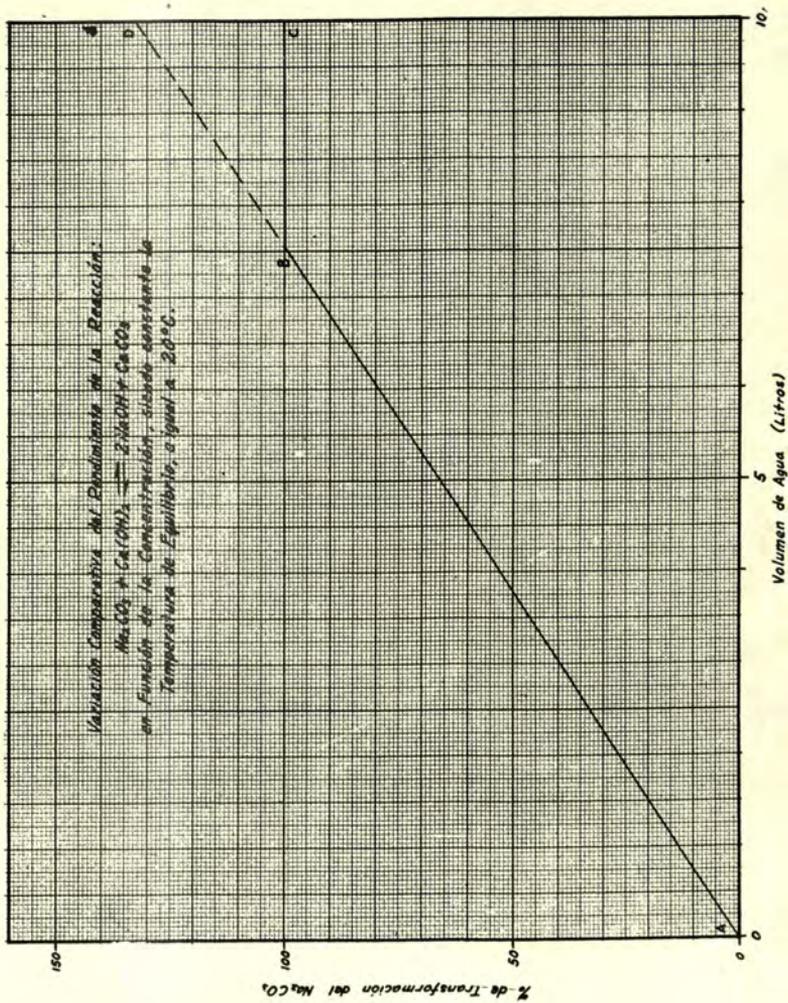
GRAFICA NUMERO 2

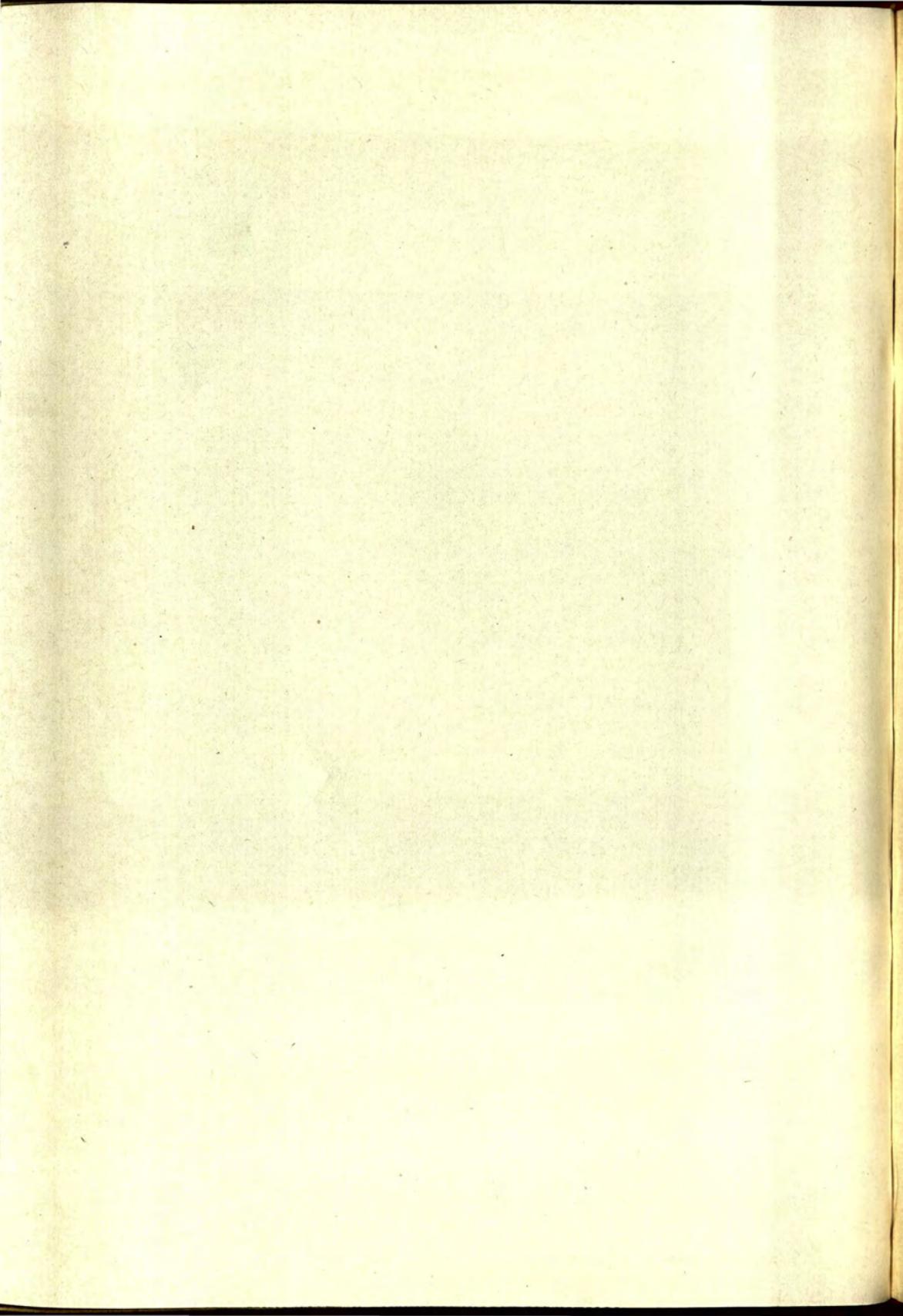
Podemos observar que a partir de Mol-gr de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  por 7.60 litros, las moléculas gramo de NaOH que se necesitan agregar a la solución para alcanzar el estado de equilibrio son más de 2, lo cual tiene un significado puramente matemático, pues se ha partido también de la base de que las moléculas gramo de NaOH que se pueden producir en la reacción, no pasarán nunca de 2, debido a que solamente se han puesto a reaccionar las cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  necesarias para la formación de 2 Mol-gr de NaOH.

Por lo tanto, la interpretación gráfica que se puede dar a los resultados de la tabla 2 es la que nos representa la línea ABC, siendo la línea ABC la que nos representa el resultado puramente matemático.

De esta segunda tentativa hecha con el objeto de conocer los rendimientos reales que se obtendrían en el laboratorio a partir de sustancias puras, podemos afirmar con certeza que, trabajando con soluciones cuya concentración inicial sea inferior a 1 Mol-gr de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  por 7.60 litros de agua, el rendimiento que se obtiene al tratarla con 1 Mol-gr de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es siempre igual a 100%.

## GRAFICA Nº 2





Esto se deduce de los resultados asentados en la tabla 2 y representados en la gráfica 2.

Pues es evidente, que si la reacción que nos ocupa se verifica a una concentración tal, que su rendimiento es igual al 100%, no se necesita tomar en cuenta la influencia de los iones ( $\text{CO}_3^-$ ) y ( $\text{Ca}^{++}$ ), que se producen a expensas del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{CaCO}_3$ , puesto que, en equilibrio, no existen ya las materias primas, y por lo tanto se podrán calcular las condiciones de equilibrio a partir de los datos de solubilidad en agua pura del  $\text{CaCO}_3$ , sin recurrir a métodos más complicados.

En el capítulo anterior hemos dicho ya, que el método de cálculo que hasta ahora hemos seguido con fines puramente comparativos, se basa en el cálculo de las cantidades de  $\text{NaOH}$  que se requieren para abatir la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hasta que ésta sea igual a la del  $\text{CaCO}_3$ , o sea, hasta que se alcance el equilibrio. En la tabla 2 vemos que, para las reacciones que se verifican a concentraciones menores de 1 Mol-gr de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  por 7.60 litros de agua, las cantidades de  $\text{NaOH}$  que se requieren para abatir la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  son siempre superiores a 2 Mol-gr. Esto nos demuestra que la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  no llega a abatirse nunca, en las condiciones mencionadas de concentración, hasta igualarse con la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ .

Por lo tanto, la línea BC de la gráfica 2 nos representa el rendimiento real, puesto que ya no se tiene ninguna substancia que influya sobre la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , y la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  no llega a abatirse hasta igualarse con la del  $\text{CaCO}_3$ .

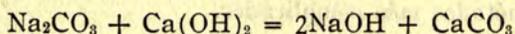
Si nos limitásemos a considerar el problema desde el punto de vista puramente teórico, podríamos conformarnos con haber llegado a encontrar el límite desde el cual el rendimiento es siempre igual al 100%. Pero al tratar de industrializar el proceso en cuestión, se llegaría a la conclusión de que las soluciones cáusticas resultantes son tan diluidas (10.5 gr. por lt. aproximadamente), que el costo de producción de lejías cáusticas concentradas o sosa cáustica sólida se elevaría considerablemente, debido a las cantidades de agua que sería necesario evaporar.

Por lo tanto, trataremos ahora de deducir teóricamente los rendimientos reales de la reacción que nos ocupa, tomando como base concentraciones iniciales mayores a 1 Mol-gr de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

en menos de 7.60 litros de agua. Para ésto, será indispensable el calcular la influencia que ejercen, en las condiciones de equilibrio, los iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{CO}_3^{--}$  producidos por el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , sobre la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ ; o sea, sobre la solubilidad de equilibrio del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

En seguida, se presenta un ensayo sobre el cálculo de las condiciones reales de equilibrio en las concentraciones mencionadas.

Hemos visto ya que el equilibrio de la reacción



está representado por la ecuación:

$$K_e = \frac{[\text{Na OH}]^2 [\text{CaCO}_3]}{[\text{Ca}(\text{OH})_2] [\text{Na}_2\text{CO}_3]} \quad (1)$$

Se ha deducido también que, para una producción mayor de  $\text{NaOH}$ , es menester que las cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  presentes en la solución, sean mayores, a medida que el  $\text{CaCO}_3$  disminuya. Es decir, hablando en términos de la solubilidad se dice que, mientras más solubles sean el carbonato de sodio y el hidróxido de calcio, y menor sea la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  la producción de sosa cáustica será mayor.

Consideremos nuevamente el producto de solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :

$$P = [\text{Ca}^{++}] [\text{OH}^-]^2 \quad (2)$$

Sabemos que si  $S$  es la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $f$  su factor de ionización, el producto de solubilidad será:

$$P = 4 (fS)^3 \quad (3)$$

Con la ayuda de esta ecuación se puede calcular el producto de solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y partiendo de este valor, según la ecuación (24) del capítulo anterior, se puede calcular la cantidad de  $\text{NaOH}$  que se podría agregar a una solución concentrada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , para que su solubilidad alcance un valor dado.

Según se ha dicho anteriormente, la reacción alcanza el equilibrio cuando la solubilidad del  $\text{Ca(OH)}_2$  disminuye hasta igualarse con la del  $\text{CaCO}_3$ . Esto puede aceptarse como exacto si tenemos en cuenta lo siguiente:

- a) El rendimiento actual de la reacción no es igual al 100%
- b) Por lo tanto, existen iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{CO}_3^{--}$  debidos al  $\text{Ca(OH)}_2$  y al  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  presentes en la solución.
- c) De ésto se deduce que durante la reacción obran dos fuerzas o tendencias contrarias, a saber:

A mayores cantidades de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Ca(OH)}_2$  presentes, corresponde una solubilidad menor del  $\text{CaCO}_3$ , o sea, una tendencia a abatir más la solubilidad del  $\text{Ca(OH)}_2$ .

A mayores rendimientos, los iones de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{CO}_3^{--}$  disminuyen, y por lo tanto, la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  es mayor, lo cual se traduce en un abatimiento menor de la solubilidad inicial del  $\text{Ca(OH)}_2$ .

De lo que se deduce que, a medida que la reacción avanza, el  $\text{CaCO}_3$  se hace más soluble, y la solubilidad del  $\text{Ca(OH)}_2$  tiende a abatirse en una proporción menor.

El problema, como se puede apreciar, parece complicado, y en partes algo confuso. Sin embargo, valiéndonos de un método indirecto, trataremos de calcular el rendimiento teórico de las reacciones a diferentes concentraciones.

El camino que me propongo seguir es el siguiente:

1º—La ecuación (24) del capítulo anterior puede transformarse en:

$$P = 4 (f_1 S_1)^3 + 4 (f_1 S_1)^2 KX + (f_1 S_1) (KX)^2 \quad (4)$$

en la que P es el producto de solubilidad del  $\text{Ca(OH)}_2$ . Siendo  $f_1$  y  $S_1$  la solubilidad y factor de ionización finales del  $\text{Ca(OH)}_2$ , y KX el número de iones gramo  $\text{OH}^-$  que son necesarios para abatir la solubilidad del  $\text{Ca(OH)}_2$  desde S hasta  $S_1$ .

Con esta ecuación podemos calcular el valor de la solubilidad del  $\text{Ca(OH)}_2$  cuando a una solución saturada se le agreguen, dos moléculas gramo de  $\text{NaOH}$ , o sean 1.46 iones gramo de  $\text{OH}^-$ , si se supone que el factor de ionización del  $\text{NaOH}$  (K) es

constante e igual a 0.73. La ecuación (4) según esto, se nos transformaría en:

$$P = 4 (f_1 S_1)^3 + 5.84 (f_1 S_1)^2 + 2.1316 (f_1 S_1) \quad (5)$$

pero si suponemos que en el estado final la ionización del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es total, debido a la concentración tan baja, podemos usar la ecuación en la forma siguiente:

$$P = 4 S_1^3 + 5.84 S_1^2 + 2.1316 S_1 \quad (6)$$

2º—Una vez calculada, con la ecuación anterior, la solubilidad final del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  al agregársele a una solución saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dos moléculas gramo de  $\text{NaOH}$ , lo cual equivale a calcular la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en una solución que contiene 1.46 iones gramo de  $\text{OH}^-$  habremos concluido que, para producir 2 Mol-gramo de  $\text{NaOH}$ , partiendo de una solución que se satura constantemente de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y a la cual se agrega  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , es necesario abatir la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  desde los valores que tenga  $S$  hasta los que resulten para  $S_1$ , según la concentración a que se trabaje.

Los cálculos llevados a cabo según lo anterior, nos dan los resultados siguientes:

TABLA N° 3.

Solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en volúmenes diferentes de agua, conteniendo siempre 1.46 iones gramo  $(\text{OH})^-$ , o sea, dos mols-gr. de  $\text{NaOH}$ .

Volúmenes de Agua (V Litros)	Solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en Agua Pura $S = \frac{\text{Mols-gr.}}{V}$	Solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en Agua conteniendo $\text{NaOH}$ $S_1 = \frac{\text{Mols-gr.}}{V + \text{NaOH}}$
0.333	0.006838	0.0000001
0.666	0.013676	0.0000025
1.000	0.020515	0.0000130
2.000	0.041030	0.0000950
3.000	0.061545	0.0003230
4.000	0.082060	0.0007200
5.000	0.102575	0.0014990
6.000	0.123090	0.0025200
7.000	0.143605	0.0039800
8.000	0.164120	0.0059800
9.000	0.184635	0.0083000
10.000	0.205150	0.0113800

3º—Los resultados que aparecen en la tabla anterior nos indican, en primer lugar, que para que la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  disminuya desde  $S$  hasta  $S_1$  es indispensable que la solubilidad de equilibrio del  $\text{CaCO}_3$  sea también igual a  $S_1$ , puesto que hemos partido de la suposición de que el equilibrio se obtiene cuando las solubilidades del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el  $\text{CaCO}_3$  son iguales.

En segundo lugar, el haber calculado los valores de  $S_1$  suponiendo que la solución se satura constantemente con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nos limita el problema, y nos lleva a establecer que, en equilibrio, se encuentran  $S_1$  moléculas gramo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presentes.

Como uno de los factores que hace disminuir la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  son los iones  $\text{Ca}^{++}$  debido al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  disuelto, podemos calcular cuál es el abatimiento de la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , que se debe a esta causa. Consideremos, para ello, el producto de solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ :

$$P_1 = [\text{Ca}^{++}] [\text{CO}_3^-] \quad (7)$$

Si la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  es  $C$ , podemos transformar la ecuación anterior en:

$$P_1 = C^2 \quad (8)$$

$C$  es la solubilidad inicial del  $\text{CaCO}_3$ , pero si representamos por  $C_1$  la solubilidad final del  $\text{CaCO}_3$  que resultaría por la presencia de  $S_1$  iones gramo de  $\text{Ca}^{++}$  debidos a las  $S_1$  moléculas gramo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se tendría:

$$P_1 = (C_1 + S_1) C_1 \quad (9)$$

siendo  $(C+S_1)$  la concentración de los iones  $\text{Ca}^{++}$  en equilibrio, y  $C_1$  la concentración de los iones  $\text{CO}_3^-$  en el mismo instante. Igualando las ecuaciones (8) y (9) resulta:

$$C^2 = (C_1 + S_1) C_1 \quad (10)$$

$$C_1^2 + S_1 C_1 - C^2 = 0 \quad (11)$$

de esta ecuación, en cada caso, se conocen  $S_1$  y  $C$ , y por lo tanto substituyendo los valores de estas literales según la concentración, podemos calcular los valores de  $C_1$  correspondientes:

En la siguiente tabla se especifican los resultados obtenidos para cada caso.

T A B L A N<sup>o</sup> 4

Abatimientos de las Solubilidades del  $\text{CaCO}_3$ , debidos a  $\text{S}_1$  Moléculas-gramo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presentes en el Estado de Equilibrio.

Volumen de Agua (Litros)	Solubilidad del $\text{CaCO}_3$ en Equilibrio ( $\text{S}_1$ )	Solubilidad del $\text{CaCO}_3$ en Agua Pura (C)	Solubilidad del $\text{CaCO}_3$ en Agua conteniendo $\text{S}_1$ Mols-gr. de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ( $\text{C}_1$ )
0.333	0.0000001	0.000217	0.0002169
0.666	0.0000025	0.000434	0.0004269
1.000	0.0000130	0.000640	0.0006360
2.000	0.0000950	0.001300	0.0012530
3.000	0.0003230	0.001950	0.0017950
4.000	0.0007200	0.002600	0.0022650
5.000	0.0014990	0.003250	0.0025860
6.000	0.0025200	0.003900	0.0028350
7.000	0.0039800	0.004550	0.0029790
8.000	0.0059800	0.005200	0.0030830

De los resultados anteriores se deduce que, el abatimiento de la solubilidad producido por la presencia de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en la concentración de equilibrio, no es suficiente para obtener 2 moléculas gramo de  $\text{NaOH}$ , y por lo tanto es necesaria la presencia de otra sal que abata la solubilidad hasta el valor deseado.

4<sup>o</sup>—Hasta aquí hemos supuesto que sólo se ha empleado 1 Mol-gr. de  $\text{NaCO}_3$ , y que esta ha sido consumida totalmente en la reacción. También se ha supuesto que las cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  empleadas son las máximas empleables, o sea:  $(1+\text{S}_1)$  Mol-gr, habiéndose consumido en la reacción 1 Mol-gr, y quedado  $\text{S}_1$  saturando por completo la solución.

Nos resta ahora suponer que se emplean  $(1+y)$  Mol-gr de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , siendo  $Y$  las moléculas de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que se requieren para abatir la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , o sea la solubilidad final del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  desde  $\text{C}_1$  hasta  $\text{S}_1$ .

Si consideramos nuevamente el producto de solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , pero teniendo en cuenta que se trata de abatir ahora la solubilidad  $\text{C}_1$  y no  $\text{C}$ , es decir, un producto de solubilidad

en el que el solvente no es agua, sino una solución de  $S_1$  Mol-gr de  $\text{Ca(OH)}_2$  en agua, se tendría:

$$P_2 = C_1^2 \quad (12)$$

en la que  $P_2$  es el producto de las concentraciones de los iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{CO}_3^{--}$  que están en equilibrio con el  $\text{CaCO}_3$  sólido, en una solución acuosa de  $\text{Ca(OH)}_2$ , y  $C_1$  es la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  en el solvente en cuestión.

Si este nuevo producto de solubilidad lo ponemos en función de las concentraciones finales de los iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{CO}_3^{--}$  en la solución, tendremos:

$$P_2 = S_1 (Y + S_1) \quad (13)$$

en la que  $S_1$  es la concentración final de los iones  $\text{Ca}^{++}$ , porque los  $S_1$  iones gramo de  $\text{Ca}^{++}$  debidos al  $\text{Ca(OH)}_2$  se consideran como formando parte del solvente, debiéndose considerar solamente los  $S_1$  iones gramo de  $\text{Ca}^{++}$  producidos por el  $\text{CaCO}_3$ .  $(Y + S_1)$  es la concentración final de los iones  $\text{CO}_3^{--}$ . Sustituyendo el valor de  $P_2$  nos resultaría:

$$C_1^2 = S_1 (Y + S_1) \quad (14)$$

y despejando a Y:

$$Y = \frac{C_1^2}{S_1} - S_1 \quad (15)$$

con la cual podemos calcular las cantidades de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que se requieren en exceso para producir el abatimiento deseado de la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , si suponemos que todo el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que quede en la solución está disociado. Los resultados de los cálculos llevados a cabo con la ayuda de la ecuación (15) quedan asentados en la tabla siguiente:

T A B L A N° 5

Mols-gr. de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  requeridas en exceso para abatir la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  desde  $C_1$  hasta  $S_1$

Volumen de Agua según Tabla N° 4 (Litros)	Mols-gr. de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ necesarias en exceso (Y)
0.333	0.47043
0.666	0.07290
1.000	0.03110
2.000	0.01643
3.000	0.00965
4.000	0.00641
5.000	0.00296
6.000	0.00067
7.000	- 0.00175

Tenemos ya, en las tablas (3) y (5) las cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que deben quedar en solución y en equilibrio, para que la reacción produzca 2 Mol-gr de  $\text{NaOH}$ .

Con estos datos podemos calcular ya los rendimientos reales, pues en cada caso, las cantidades reaccionantes de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  serán  $(1 + S_1)$  y  $(1 + Y)$  respectivamente.

Para calcular el rendimiento, podemos tomar como base las cantidades de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  usadas y calcular la fracción del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  total transformada en  $\text{NaOH}$ . También podemos calcular suponiendo que siempre se usan cantidades equivalentes de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , lo cual nos hará tener en cuenta siempre que, para las soluciones más diluidas, quedará una fracción del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sin disolverse, y en cambio, en las soluciones más concentradas quedará una cantidad de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en solución, mayor que la necesaria para el abatimiento requerido de la solución del  $\text{CaCO}_3$ . Lo cual se traduce realmente en una transformación más completa de ambas materias primas hasta que el rendimiento es 100%.

En la tabla siguiente figuran los rendimientos calculados de las dos maneras:

TABLA N° 6

Cantidades Totales de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  necesarias para producir 2 Mols. gr. de  $\text{NaOH}$  en las cantidades de Agua que figuran en las tablas anteriores.—Rendimientos calculados según estos datos.

Volumen de Agua (Litros)	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ Total (1 + Y)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ Total (1 + S <sub>1</sub> )	% de Transformación del $\text{Na}_2\text{CO}_3$ Total	% de Transformación usando cantidades equivalentes
0.333	1.47043	1.0000001	68.12	68.12
0.666	1.07290	1.0000025	94.21	94.21
1.000	1.03110	1.0000130	96.98	96.98
2.000	1.01643	1.0000950	98.48	98.48
3.000	1.00965	1.0003230	99.04	99.04
4.000	1.00641	1.0007200	99.36	99.36
5.000	1.00296	1.0014990	99.70	99.70
6.000	1.00067	1.0025200	99.90	+ 99.75
7.000	*1.00000	1.0039800	*100.00	+ 99.60

Los resultados marcados con \* serán reales si se tiene en cuenta que, debido a que el valor numérico obtenido para Y, según la tabla N° 5 es negativo, lo cual nos muestra que no se requiere  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en exceso para abatir la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , y que las S<sub>1</sub> moléculas gramo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presentes disminuyen la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  más de lo deseado. Por lo tanto, debe considerarse que se empleó una molécula gramo de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y que ésta se transformó totalmente en  $\text{NaOH}$ .

En cuanto los rendimientos calculados suponiendo que se emplean cantidades equivalentes de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  debe aclararse lo siguiente: a partir de los datos correspondientes a los 6 litros de agua, los rendimientos son menores que los de la columna anterior. El significado de los resultados marcados con + es puramente matemático; pues, si analizamos bien los datos, veremos que, a partir de los 6 litros de agua las cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  necesarias para obtener 2 Mol-gr. de  $\text{NaOH}$ , son mayores que las de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , y como se supone que se emplean cantidades equivalentes habrá mayor  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que el necesario, parte del cual abate más la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , y parte se transformará en sosa cáustica. El rendimiento corres-

pondiente a los 6 litros de agua tendrá entonces un valor contenido entre 99.75 y 99.90, y el correspondiente a los 7 litros será mayor que el anterior y menor de 100, hasta que, al llegar a los 755 litros el rendimiento será de 100%, según hemos deducido de la gráfica N° 2.

Con el objeto de comprobar los resultados de la tabla N° 6 y la tabla N° 2, se calcularon los volúmenes de agua que nos darían las mismas concentraciones que aparecen en la tabla N° 6, suponiendo que siempre se empleó una Mol-gr. de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dando los resultados que aparecen a continuación:

c.c. de Agua correspondientes a 1 Mol-gr. de $\text{Na}_2\text{CO}_3$	% de Transformación del $\text{Na}_2\text{CO}_3$ según la Tabla N° 6
226	68.12
621	94.21
968	96.98
1968	98.48
2971	99.04
3974	99.36
4985	99.70
5996	99.90
7000	100.00

Transformados así los volúmenes de agua, se registraron gráficamente junto con los datos de la tabla 2, según aparece en la gráfica N° 3.

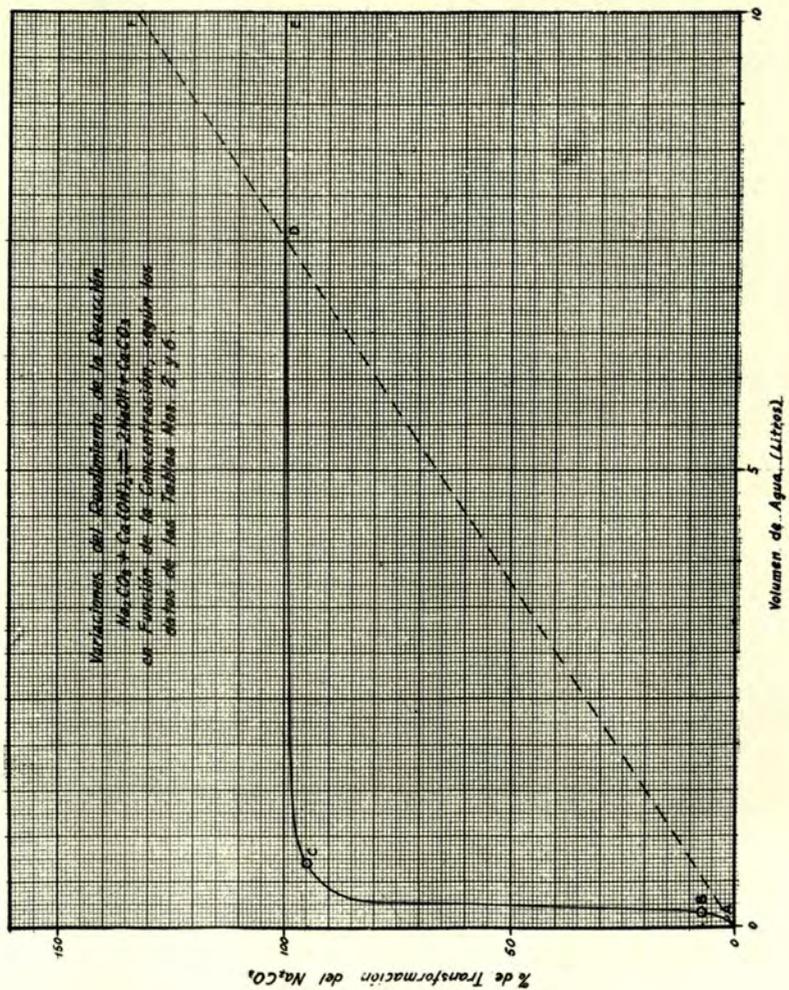
### GRAFICA N° 3.

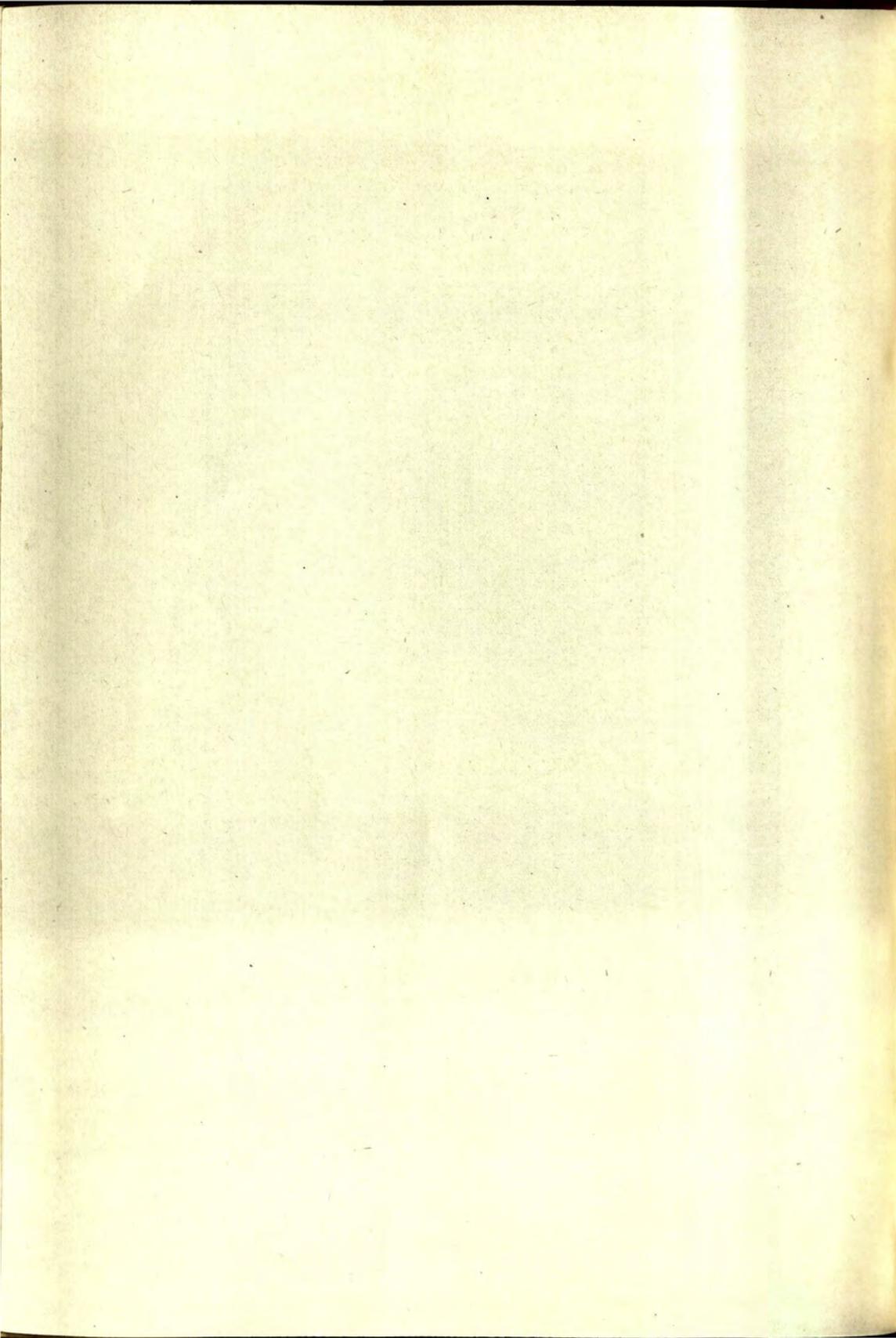
La línea punteada es la que nos representa la variación teórica del rendimiento, calculado al principio de este capítulo, o sea, cuando no se consideró la influencia del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  presentes en la solución.

La línea ABCDE nos representa la variación del rendimiento teórico real de la reacción. La trayectoria que se ha trazado parece ser la más probable, pues es claro que en soluciones muy

# GRAFICA N° 3

Variaciones del Rendimiento de la Reacción  
 $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons 2\text{NaOH} + \text{CaCO}_3$   
 en Función de la Concentración, según los  
 datos de las Tablas Nos. 2 y 6.





concentradas las solubilidades sean tan pequeñas, que el factor que controle la reacción sea simplemente la solubilidad del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , debido a que las cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{CaCO}_3$  presentes son muy pequeñas. Además, al principio, en el tramo AB, la solución estará saturada con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y una pequeña producción de  $\text{NaOH}$  será suficiente para igualar las solubilidades del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el  $\text{CaCO}_3$ . Al llegar la concentración a un límite tal, en un punto cercano a B, todo el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  estará disuelto, y el agua será capaz de disolver cada vez mayores cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{NaOH}$ , incrementándose el rendimiento de la reacción rápidamente (tramo BC) hasta alcanzar un límite cercano al punto C, desde el cual el rendimiento ya cercano a 100%, se aproxima más lentamente al límite máximo de la reacción, el cual se alcanza en el punto D.

Los resultados de este ensayo no pueden ser más prometedores, como se aprecia al definir que solamente partiendo de soluciones muy concentradas el rendimiento es bajo, y será posible entonces trabajar económicamente, casi a cualquier concentración, dependiendo ésta de la pureza que deba tener el producto, y pudiéndose afirmar que, a medida que se desee lograr mayor pureza deberá trabajarse a concentraciones menores, resultando mayor el costo de producción debido a la cantidad de agua que se necesita evaporar y a las dimensiones del equipo.

Con el objeto de tener a la mano datos más directamente aprovechables, se transformaron las concentraciones hasta ahora usadas, en porcientos en peso de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dando los resultados que aparecen en la tabla N<sup>o</sup> 7 y éstos se registraron en la gráfica N<sup>o</sup> 4.

#### GRAFICA N<sup>o</sup> 4.

Como puede apreciarse, en la tabla 7 figuran dos concentraciones correspondientes al 100% de rendimiento. Esto se hizo con el único objeto de marcar, en el caso del rendimiento correspondiente a los 7000 gramos de agua, el valor numérico resultante al considerar el % de transformación de las  $1 + Y$  moléculas gramo de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , habiéndose marcado inmediatamente después el valor real de la concentración en la que,

según las gráficas 2 y 3, se alcanza el 100% de transformación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

T A B L A N° 7

Porciento de Transformación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al Caustificar Soluciones de Carbonato de diferentes concentraciones.

Gramos de Agua	Mols. gr. de $\text{Na}_2\text{CO}_3$	Gramos de $\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ % en la Solución	% de Transformación del $\text{Na}_2\text{CO}_3$
333	1.47043	155.86	35.505	68.12
666	1.07290	113.73	14.603	94.21
1000	1.03110	109.30	9.882	96.98
2000	1.01643	107.74	5.116	98.48
3000	1.00965	107.02	3.445	99.04
4000	1.00641	106.68	2.598	99.36
5000	1.00291	106.31	2.082	99.70
6000	1.00067	106.07	1.737	99.90
7000	*1.00000	106.00	1.492	*100.00
7550	1.00000	106.00	1.384	100.00

#### EXPERIMENTACION

Describo brevemente a continuación, dos series de experiencias llevadas a cabo en el laboratorio.

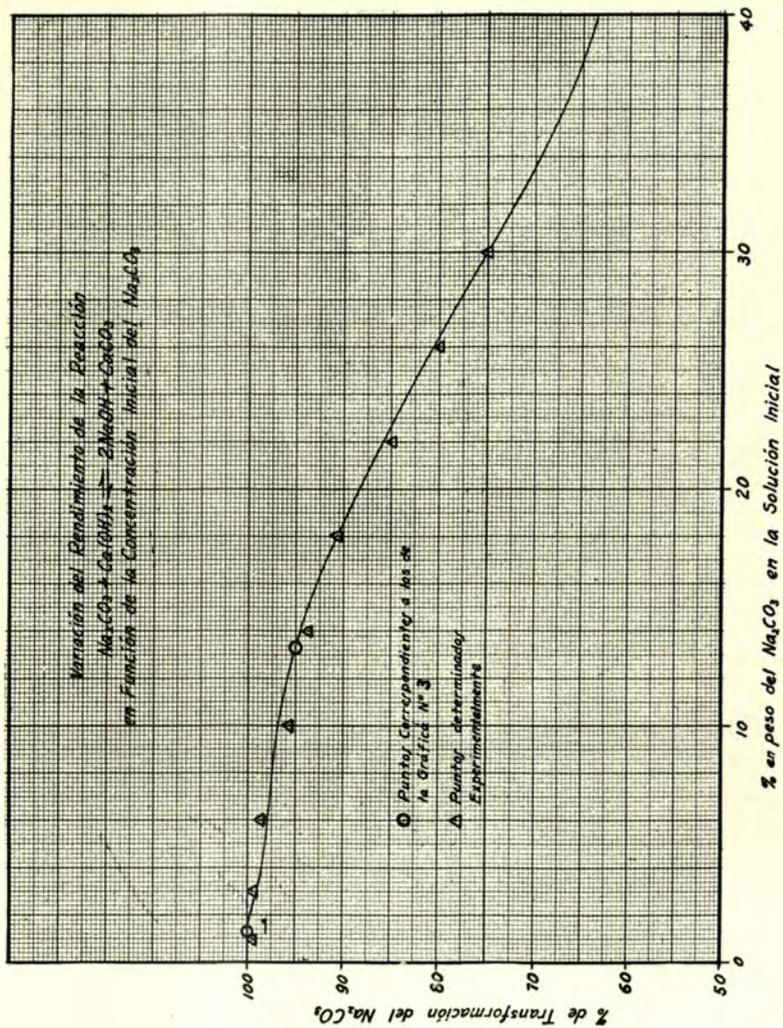
#### SECCION 1.

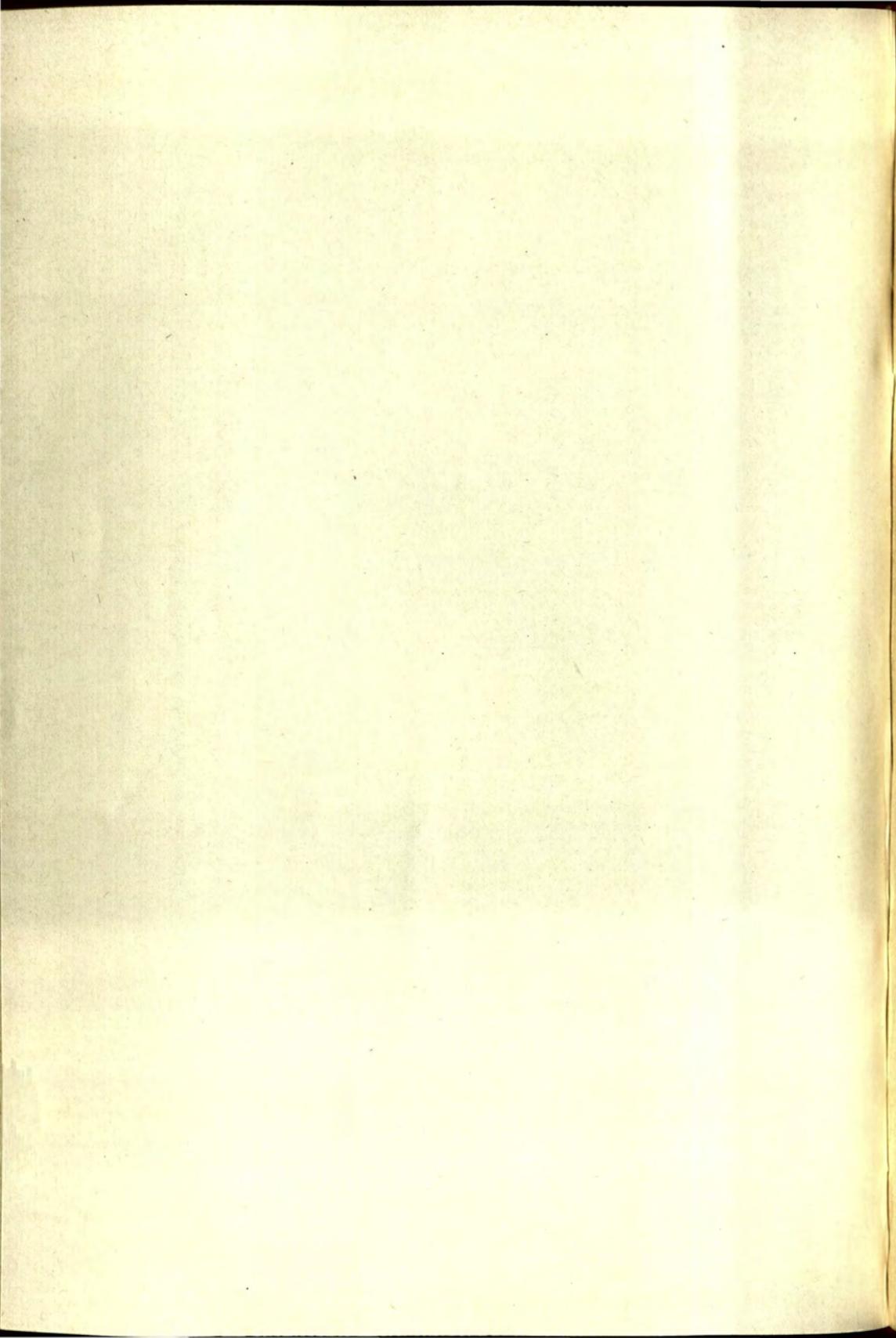
#### Observación de la variación del rendimiento en función de la concentración

Esta serie de experiencias tuvo por objeto el comprobar experimentalmente los resultados teóricos que se describen en la primera parte de este capítulo. El aparato usado en las experiencias que se describen consta esencialmente de un calentador regulado por un termóstato, un vaso de 2000 cc. en el que se coloca la solución y que descansa sobre un pequeño calentador conectado con una resistencia variable; un agitador que funciona a velocidad variable gracias a un juego de poleas.

En todas las experiencias se usaron sustancias químicamente puras, para que los resultados experimentales pudieran ser comparados con los deducidos teóricamente. El sistema se-

# GRAFICA N° 4





guido en cada experiencia puede resumirse del modo siguiente:

a) Se calcularon las cantidades de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{CaO}$  necesarias para efectuar la reacción en un litro de agua, según los datos de la tabla N° 7 de modo que, en equilibrio, se obtuviera una solución concentrada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , es decir, según los datos que aparecen en la columna 3 de la tabla 6.

b) Una vez pesadas las cantidades de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{CaO}$ , se agregó al  $\text{CaO}$  la cantidad necesaria para formar el hidrato, y a éste se le agregaron 300 cc. de agua, agitándose violentamente durante 15 minutos a  $20^\circ\text{C}$ . para tener la seguridad de obtener una solución saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

c) Al mismo tiempo se disolvió el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  correspondiente en 600 cc. de agua y sin interrumpir la agitación de la suspensión de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se agregó lentamente a ésta la solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , calentando hasta  $60-70^\circ\text{C}$ . y usándose 100 cc. de agua para lavar el recipiente que contenía la solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , agregándose esta agua de lavado a la mezcla obtenida.

d) Una vez agotado el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se enfrió la mezcla hasta  $20^\circ\text{C}$ , sin suspender la agitación, y continuándose ésta por 60 minutos más.

e) Hecho ésto, se filtró la mezcla, lavándose perfectamente el precipitado de  $\text{CaCO}_3$ , el cual se secó y pesó. Se titularon en el filtrado  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaOH}$ , siguiendo los métodos usuales para estos casos.

Los resultados de estas experiencias se resumen en la tabla siguiente:

T A B L A N° 8

Determinación Experimental del Rendimiento de la Reacción:  
 $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = 2\text{Na}(\text{OH}) + \text{CaCO}_3$  caustificando soluciones de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  de concentraciones diferentes.

Concentración inicial de la Solución de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (% en peso)	% del $\text{Na}_2\text{CO}_3$ transformado en $\text{NaOH}$
1	99.50
3	99.35
6	98.70
10	95.92
14	93.85
18	90.75
22	85.00
26	80.03
30	75.00

Para establecer una comparación más clara entre estos resultados y los teóricos, se registraron gráficamente los valores observados junto con los deducidos teóricamente y se marcaron en la gráfica N<sup>o</sup> 4.

La discordancia entre los resultados experimentales y los teóricos puede ser debida a alguna deficiencia del método experimental; sin embargo, puede afirmarse ya que la trayectoria que sigue la variación del rendimiento, es, según los trabajos hasta aquí descritos, la prevista teóricamente.

## SECCION 2.

La segunda serie de experiencias llevadas a cabo se aparta ya un poco de lo que pudiéramos llamar el punto de vista ideal de la reacción, es decir, el objeto que se ha perseguido en esta sección es la observación de la influencia de algunos factores de índole industrial sobre la caustificación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Todas las experiencias se llevaron a cabo a una misma concentración, la cual fué fijada de acuerdo con las proporciones que industrialmente se usan en la caustificación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . La concentración mencionada debe ser, por regla general, de 690-700cc. de agua por molécula gramo de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  o sea, un punto muy cercano al punto C de la gráfica N<sup>o</sup> 3. Como puede observarse, es precisamente el punto C el límite teórico de los rendimientos mayores de 95% y por lo tanto, debe ser la concentración a la que corresponda la mayor economía del proceso, pues su rendimiento es lo más elevado que puede obtenerse en soluciones concentradas y el agua, que será necesario evaporar, es mínima.

Ahora bien, uno de los factores que intervienen directamente en el costo de un proceso es el capital invertido en el equipo, el cual es función, a su vez, de las dimensiones del mismo. Al efectuarse la caustificación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se obtiene un licor cáustico y un precipitado de  $\text{CaCO}_3$ , los cuales será preciso separar. El método que se recomienda siempre para la separación de sólidos y líquidos, cuando los sólidos presentes son abundantes, es la decantación, pues la filtración sería sumamente costosa. Sabemos también que, cuando se trata de separar material sólido, suspendido en un fluido, usando la

decantación, debe procurarse obtener la mayor velocidad de asentamiento, pues para una misma capacidad, a mayores velocidades de asentamiento, corresponden menor consumo de energía y tiempo, se requieren recipientes de menor tamaño y por lo tanto, se disminuye el costo de operación.

Por lo anterior, todas las experiencias que a continuación se describen se han limitado a la observación de la influencia de diversos factores sobre la velocidad de asentamiento del  $\text{CaCO}_3$ , obtenido durante la reacción, y se ha procurado acercarse lo más posible a las condiciones reales del proceso.

Según Anthony Anable los factores que pueden tener mayor influencia sobre la velocidad de asentamiento son los siguientes:

A.—Calidad de la Cal.

B.—Método de Apagado de la Cal.

C.—Método de Caustificación.

En esta serie de experiencias se usó el mismo aparato, que el utilizado en la serie anterior.

En todas las pruebas se usó un mismo carbonato de sodio industrial, el cual se secó cuidadosamente antes de ser usado y se determinó su pureza, que resultó ser de 95%.

En la mayoría de las pruebas se usaron 200 gr. de carbonato y 1300 cc. de agua.

### EXPERIENCIA 1.

Se usaron 118.5 gr. de cal, que corresponden al 3% de exceso sobre la cantidad teórica requerida para transformar todo el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en  $\text{NaOH}$ . La cal se apagó en 500 cc. de agua a  $85^\circ \text{C}$ , y se agitó durante 15 minutos, al cabo de los cuales se agregó el carbonato disuelto en 800 cc. de agua, continuándose la agitación por 30 minutos más.

La velocidad media de asentamiento encontrada en 4 pruebas llevadas a cabo en las mismas condiciones, fué de 0.046 m. por hora.

Algunos investigadores han demostrado que la cantidad de agua usada en apagar la cal ejerce una influencia notable sobre la velocidad de asentamiento. Por lo que se repitieron las pruebas anteriores apagando la cal con la cantidad de agua ne-

cesaria para transformar el  $\text{CaO}$  en  $\text{Ca(OH)}_2$ . Al hidróxido seco así formado se agregaron 550 cc. de agua y se agitó durante 30 minutos más. La velocidad media de asentamiento observada en este caso fué de 0.471 m. por hora, la cual es 10.22 veces mayor que la observada al apagar la cal con un gran exceso de agua.

Todas las pruebas descritas se verificaron con otras dos cales de distinta calidad y procedencia, encontrándose los valores siguientes:

T A B L A N° 9

Cal N°	Velocidad de Asent. Apagando la Cal con Exceso de Agua	Velocidad de Asent. Apagando la Cal con el Agua Necesaria
1	0.046 m/hora	0.471 m/hora
2	0.053 m/hora	0.512 m/hora
3	0.060 m/hora	1.253 m/hora

La velocidad media de asentamiento para las 3 cales, según estos datos, fué aumentada 14 veces al reducirse el agua usada en el apagado.

Habiendo llegado a la conclusión de que otras cales presentan el mismo comportamiento general que la escogida originalmente, se continuaron las experiencias con la cal original.

## EXPERIENCIA 2

Determinación del efecto del exceso de cal sobre la velocidad de asentamiento.

Para esto, se apagó la cal inmediatamente antes de la prueba, agregándosele lentamente 100 cc. de agua caliente, y una vez frío el hidrato así formado, se le agregó una solución de 200 grs. de carbonato en 1350 cc. de agua a  $85^{\circ}\text{C}$  y se agitó la mezcla durante media hora, manteniéndose la temperatura constante.

Los resultados de 4 pruebas y las condiciones de las mismas se anotan en la tabla siguiente:

TABLA N° 10

Gramos de CaO	% del Teórico	Causticidad %	Velocidad de Asentamiento
100	87	79.5	0.93 m/hr.
115	100	88.2	0.94 m/hr.
130	113	92.0	0.89 m/hr.
150	150	94.5	0.69 m/hr.

de lo que puede concluirse que, dentro de ciertos límites, el exceso de cal tiene poca influencia sobre la velocidad de asentamiento, pudiendo deberse el bajo valor de la velocidad en las pruebas 3 y 4 a un estorbamiento de las partículas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y las  $\text{CaCO}_3$ .

Este comportamiento puede explicarse si tenemos en cuenta que la velocidad de formación de los cristales de  $\text{CaCO}_3$ , y por lo tanto su tamaño, está controlado por la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , la cual no puede ser variada por cantidades más o menos excesivas del hidrato, pues ya hemos visto en la parte teórica de este capítulo que la solubilidad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  disminuye a medida que avanza la reacción, llegando a tener un valor mínimo cuando se alcanza el equilibrio, resultando por consecuencia, más bien perjudicial la presencia de cantidades excesivas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , no sólo en lo que se refiere a la velocidad de asentamiento, sino también en el costo de la materia prima.

### EXPERIENCIA 3.

Observación de la influencia del tiempo de agitación.

En cada una de estas pruebas se emplearon 125 grs. de cal, que fueron apagados con 100 cc. de agua caliente y después se agregaron a una solución de 200 grs. de carbonato en 1350 cc. de agua. La agitación se hizo a 180 y 420 r. p. m. y los resultados obtenidos se resumen en la tabla siguiente:

T A B L A N° 11

Tiempo de Agitación (minutos)	180 R. P. M.		420 R. P. M.	
	Causticidad	Veloc. de Asentamiento (m/hora)	Causticidad	Veloc. de Asentamiento (m/hora)
30	94.1	0.77	95.0	0.52
60	95.0	0.61	95.3	0.45
90	95.1	0.54	95.9	0.39
120	95.2	0.50	96.2	0.31

De estos resultados se desprende que aumentando el grado de agitación disminuye considerablemente la velocidad de asentamiento, y en cambio se aumenta la velocidad de caustificación.

#### EXPERIENCIA 4.

##### Hidratación con soluciones cáusticas.

Cuando la separación del  $\text{CaCO}_3$  se lleva a cabo por decantación y los lodos son lavados por un sistema a contra-corriente, se acostumbra apagar la cal con las aguas de lavado, lo cual tiene por objeto el incrementar la recuperación de la sosa cáustica producida. Por lo que se hicieron algunas pruebas para determinar el efecto que produce sobre la velocidad de asentamiento el hidratar la cal con una solución cáustica. Para el efecto, se usaron 125 grs. de  $\text{CaO}$ , se colocaron en un vaso, y se les agregaron 47 cc. de una solución cáustica de  $14.8^\circ$  Bé. preparada en una de las pruebas anteriores. La cal fué agregada a la solución caliente de sosa cáustica, y se agitó durante 90 minutos, agregándose después la solución de carbonato y agítándose durante 30, 60 y 90 minutos en diferentes pruebas. Los resultados aparecen en la tabla siguiente:

TABLA N° 12

Tiempo de Agitación (minutos)	Causticidad %	Velocidad de Asentamiento (m/hora)
30	99.3	2.40
60	92.5	2.07
90	94.4	1.75

De estos datos se deduce que la preparación del hidrato con soluciones cáusticas incrementa considerablemente la velocidad de asentamiento, y se comprueba que el tiempo de agitación la disminuye.

EXPERIENCIA 5.

Con el objeto de observar el comportamiento general de diferentes cales, se hicieron pruebas con 8 cales diferentes. En cada caso se usó una cantidad de cal equivalente al 105% de la requerida teóricamente para transformar en NaOH todo el carbonato empleado. El apagado se hizo con 45-50 cc. de agua, y se agregaron 200 grs. de carbonato disueltos en 1350 cc. de agua.

La mezcla fué agitada durante una hora a 180 r. p. m. Los resultados obtenidos figuran en la

TABLA N° 13

Ca I N°	Causticidad %	Velocidad de Asentamiento (m/hora)
1	95.3	0.48
2	95.5	0.42
3	94.8	0.53
4	93.1	0.62
5	93.2	0.60
6	92.6	0.89
7	92.8	0.93
8	95.4	0.45

Puede decirse, en general, que el comportamiento de las diferentes cales es bastante uniforme, pudiéndose observar que a las mayores causticidades corresponden las menores velocidades de asentamiento, lo cual parece ser regla general, de acuerdo con los resultados encontrados por otros investigadores.

Los resultados experimentales obtenidos en esta sección, nos hacen llegar a la conclusión de que, para obtener una mayor velocidad de asentamiento debe procurarse en primer lugar, apagar la cal con las aguas de lavado de los lodos, o sea con soluciones cáusticas; que en este apagado se utilicen las menores cantidades de agua posible, y finalmente, que la agitación no sea muy rápida. Asimismo, queda comprobado que, dentro de ciertos límites, no tiene gran importancia desde este punto de vista la calidad de la cal que se use.

### CONSIDERACIONES ECONOMICAS

En esta parte trataré de analizar, aunque superficialmente, el aspecto comercial del proceso que nos ocupa.

Ya hemos visto que existe actualmente una diferencia entre los precios del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  comercial y la sosa cáustica, y en el capítulo anterior se ha calculado la diferencia de precios que se obtiene entre las cantidades equivalentes de estas dos materias.

También nos hemos dado cuenta de que, la diferencia de precios mencionada, para que el proceso sea económico, debe tener un valor mínimo igual a la suma del costo de transformación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y las utilidades mínimas que deban percibirse. Esto será cierto, si dentro del costo de transformación se incluyen los gastos fijos y los de operación, como debe hacerse en todo balance económico.

Ahora bien, si el éxito económico de una industria tal, se hace depender únicamente de una diferencia de precios, es conveniente investigar las tendencias actuales que presente esa diferencia a aumentar o disminuir.

En nuestro caso, se han investigado los precios medios mensuales durante los últimos 10 años, de ambas materias, habiéndose obtenido las cifras siguientes:



GRAFICA Nº 5

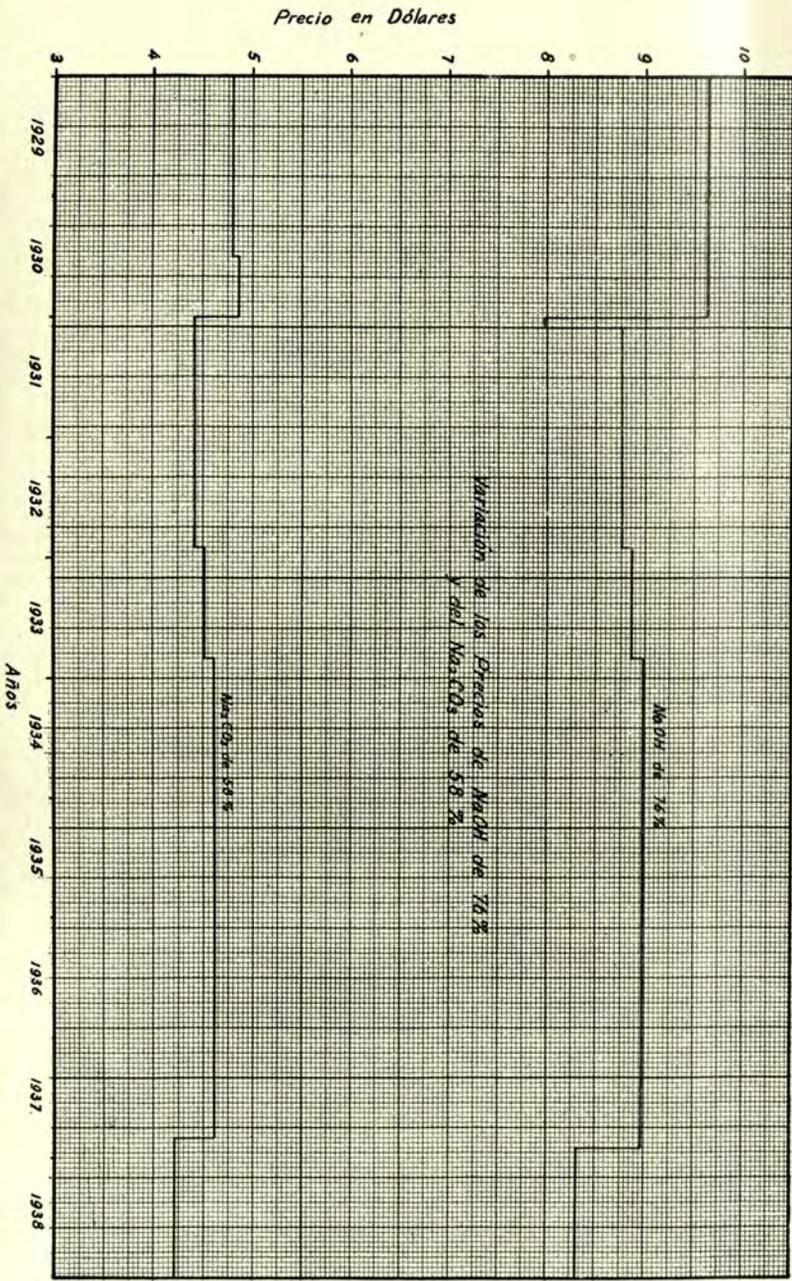


TABLA N° 14.

Precios en Dolares de 100 Kg. de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  de 58%  $\text{Na}_2\text{O}$  y de 100 Kg. de  $\text{NaOH}$  de 76%  $\text{Na}_2\text{O}$  desde 1929 hasta 1938.

MESES	1929		1930		1931		1932		1933	
	Na OH	$\text{Na}_2\text{CO}_3$								
Enero	9.638	4.803	9.638	4.803	7.985	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Febrero	9.638	4.803	9.638	4.803	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Marzo	9.638	4.803	9.638	4.803	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Abril	9.638	4.803	9.638	4.803	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Mayo	9.638	4.803	9.638	4.803	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Junio	9.638	4.803	9.638	4.803	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Julio	9.638	4.803	9.638	4.858	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Agosto	9.638	4.803	9.638	4.858	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Sepbre.	9.638	4.803	9.638	4.858	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Octubre	9.638	4.803	9.638	4.858	8.756	4.428	8.756	4.428	8.867	4.538
Novbre.	9.638	4.803	9.638	4.858	8.756	4.428	8.756	4.428	8.977	4.605
Dicbre.	9.638	3.803	9.638	4.858	8.756	4.428	8.867	4.538	8.977	4.605

MESES	1934		1935		1936		1937		1938	
	Na OH	$\text{Na}_2\text{CO}_3$								
Enero	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Febrero	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Marzo	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Abril	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Mayo	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Junio	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Julio	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Agosto	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Sepbre.	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Octubre	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208
Novbre.	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.208	8.316	4.208
Dicbre.	8.977	4.605	8.977	4.605	8.977	4.605	8.316	4.208	8.316	4.208

Para una mayor claridad de los datos que aparecen en la tabla anterior, se construyó la gráfica 5.

Como puede apreciarse en la gráfica, la diferencia de precios entre las dos sustancias, tiende actualmente a disminuir, y por lo tanto, el porvenir de una industria de caustificación

no es muy halagador, si lo consideramos desde este único punto de vista.

Afortunadamente, existe en México, en la actualidad, una posibilidad de éxito, cuyas condiciones no pueden ser más favorables para el futuro industrial del país, y en particular, de la industria que nos ocupa.

Se ha venido estudiando durante varios años el aprovechamiento de las sales contenidas en las aguas del Lago de Texcoco, siguiendo un sistema análogo al desarrollado en el Lago Searles de California.

Según los datos obtenidos en la Secretaría de la Economía Nacional, la composición media de las sales del Lago de Texcoco es:

$\text{Na}_2\text{CO}_3$	40 a 45%
$\text{NaCl}$	40 a 45%
$\text{KCl}$	6 a 20%
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	1 a 10%
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	5 a 10%
$\text{KNO}_3$	1 a 2%
$\text{Na}_3\text{PO}_4$	1 a 2%

estando referidos los porcentajes anteriores al peso total de las sales, cuya proporción media en las aguas del lago oscila entre 22 y 23 gr. por litro.

Como resultado de los estudios hechos hasta ahora, se ha construido una planta experimental para el beneficio de las aguas del lago, aprovechándose el calor solar para concentrarlas, y se han instalado unos cristalizadores en los que, también con la energía solar, y haciendo uso del método de cristalización fraccionada, se obtiene un promedio de 8 toneladas diarias de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . El costo de producción de este carbonato, según se me informó, resulta ser mucho menor al precio actual de éste en el mercado, no siendo posible todavía obtener un dato preciso sobre el particular. De todos modos, es evidente que si se ha logrado aprovechar la energía solar para la concentración de las aguas y la cristalización, el costo de producción tendrá que ser mínimo.

Existe además un proyecto, cuya realización ya se ha iniciado, consiste en producir 100.000 toneladas anuales de sales, o sea 40.000 toneladas anuales de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Por lo anterior, podemos decir que la solución de este aspecto económico del proceso que nos ocupa, está ya prácticamente resuelto, y para colocarnos dentro de un margen de seguridad, debemos limitar, desde luego, la capacidad de la planta caustificadora que se proyecte, de acuerdo con la producción actual de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que se obtenga beneficiando las aguas madres del Lago de Texcoco.

### CONCLUSION

De las consideraciones anteriores, y de las experiencias llevadas a cabo, puede afirmarse que la caustificación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  presenta suficientes posibilidades para ser industrializada en México.

Podría pensarse ya en iniciar la elaboración de un proyecto para instalar una planta caustificadora cuya capacidad baste para llenar las necesidades actuales de consumo en el país o cuando menos las del D. F., como habíamos pensado en el capítulo I. Pero debido a que la diferencia de precios entre la sosa cáustica y el carbonato de sodio importados muestra tendencias a disminuir, debemos colocarnos en las mayores condiciones de seguridad, y debemos fijar una capacidad de producción de 5 toneladas diarias de  $\text{NaOH}$ , lo que equivale a consumir aproximadamente 7.4 toneladas de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  de 95% de pureza, y suponiendo que el rendimiento de la reacción será también de 95%. Esto nos hace quedar en condiciones de depender de la producción actual de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  obtenido en Texcoco, y no del importado.

Por otro lado, en una planta de esta capacidad, pueden obtenerse todos los datos necesarios para proyectar, con mucha mayor seguridad, otra que sea capaz de consumir todo el carbonato de sodio que se proyecta producir beneficiando las aguas de Texcoco.

Fijaremos, por último, cuáles son las condiciones fundamentales de operación que deben tenerse en la planta que se va a proyectar.

1.—El apagado de la cal deberá hacerse usando las aguas de lavado de los lodos de  $\text{Ca}_2\text{CO}_3$  producidas en un ciclo anterior, de manera de obtener primero un hidrato seco, el cual será suspendido después en una cantidad tal de agua, que corresponda a las condiciones fijadas en la experiencia N° 1 de la sección dos. Con esto se logrará aumentar la velocidad de asentamiento por el hecho de apagar la cal con soluciones cáusticas, y por usar en un principio solamente el agua necesaria para obtener un hidrato seco. Además, la recuperación de  $\text{NaOH}$  se incrementará al lavarse el precipitado de  $\text{CaCO}_3$  producido.

2.—El carbonato de sodio deberá producirse en una cantidad de agua tal, que sumada con la usada para suspender el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , nos dé una concentración inicial del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  igual al 12.5% en peso. Esta concentración es la que, según muchos investigadores, corresponde al mayor rendimiento que puede obtenerse evaporando cantidades mínimas de  $\text{H}_2\text{O}$  de la lejía resultante, correspondiendo a un rendimiento teórico de 95.7% según la gráfica N° 4. La concentración y rendimientos mencionados nos marcan un punto muy cercano al punto C de las gráficas 3 y 4, el cual es el límite teórico de los rendimientos mayores al 95%, o sea, la concentración más económica desde el punto de vista de la evaporación, que corresponde a los rendimientos de 95%.

El capítulo siguiente se dedicará a formular el proyecto de instalación de la planta de caustificación, según la capacidad y condiciones establecidas.

## CAPITULO IV

### Proyecto.

#### A.—CONSIDERACIONES GENERALES.

En el presente capítulo trataré de formular un anteproyecto para la instalación de una planta caustificadora que produzca 5 toneladas de NaOH sólida. Como esta capacidad corresponde a una escala semi-industrial, será posible observar en una instalación tal, todas las variables y datos necesarios para formular posteriormente un proyecto para la instalación de una planta de gran capacidad.

Con el objeto de facilitar los cálculos de las cantidades de materia prima, volúmenes, aparatos, etc., incluyo a continuación un esquema del proceso completo, y una descripción de las diferentes transformaciones que se verifican durante él.

#### FIGURA N° 1.

#### Explicación del Diagrama.

El proceso propuesto para la elaboración de sosa cáustica incluye las operaciones siguientes:

- a) Trituración de la cal.

- b) Apagado de la cal.
- c) Suspensión del hidrato de calcio.
- d) Disolución del carbonato de sodio.
- e) Caustificación del carbonato de sodio.
- f) Separación mecánica del precipitado de  $\text{CaCO}_3$  y la lejía de  $\text{NaOH}$  por asentamiento.
- g) Lavado de los lodos de  $\text{CaCO}_3$ .
- h) Concentración de la lejía cáustica.
- i) Cristalización de la sosa cáustica.

**a) Trituración de la cal.**

La operación se lleva a cabo generalmente en quebradoras giratorias o rotativas, y debe procurarse que el tamaño de los trozos obtenidos oscile entre 4'' y 6''. En el esquema figura la quebradora con el N° 2.

**b) Apagado de la cal.**

Una vez triturada la cal, es pasada al apagador rotativo marcado con el N° 3, en el que se le agrega la cantidad necesaria de una solución cáustica diluida, hasta obtener un hidrato lo más seco posible. De este modo se cumplen las dos condiciones fundamentales que se establecen en la parte experimental del capítulo anterior, para obtener una mayor velocidad de asentamiento del precipitado de  $\text{CaCO}_3$ .

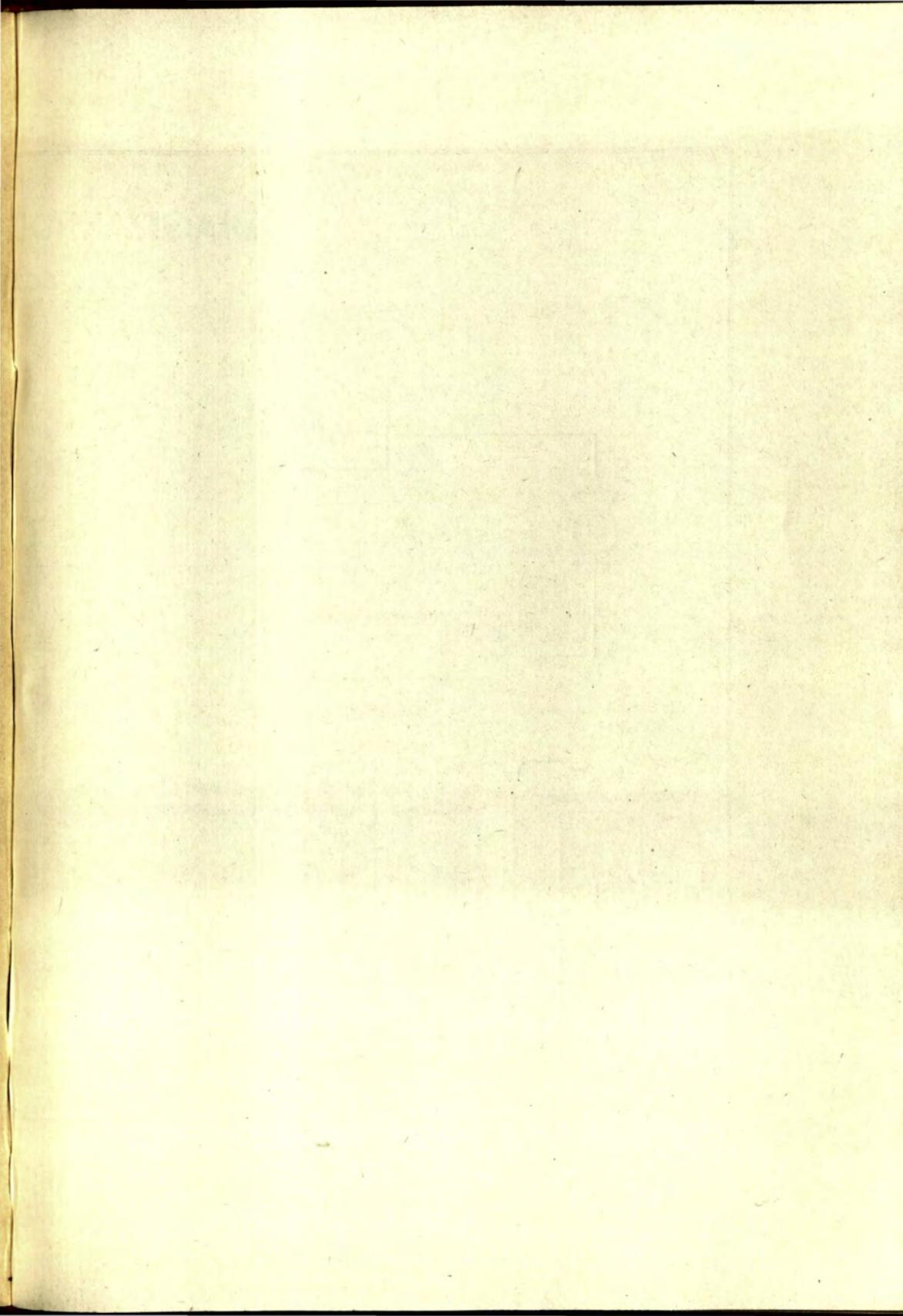
**c) Suspensión del hidrato de calcio.**

Formado el hidrato seco en el apagador, se descarga en el agitador N° 4, donde se descarga más licor cáustico diluido, y se agita hasta obtener una suspensión que contenga 250 gr. de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por litro, según aconseja T. P. Hou.

**d) Disolución del carbonato de sodio.**

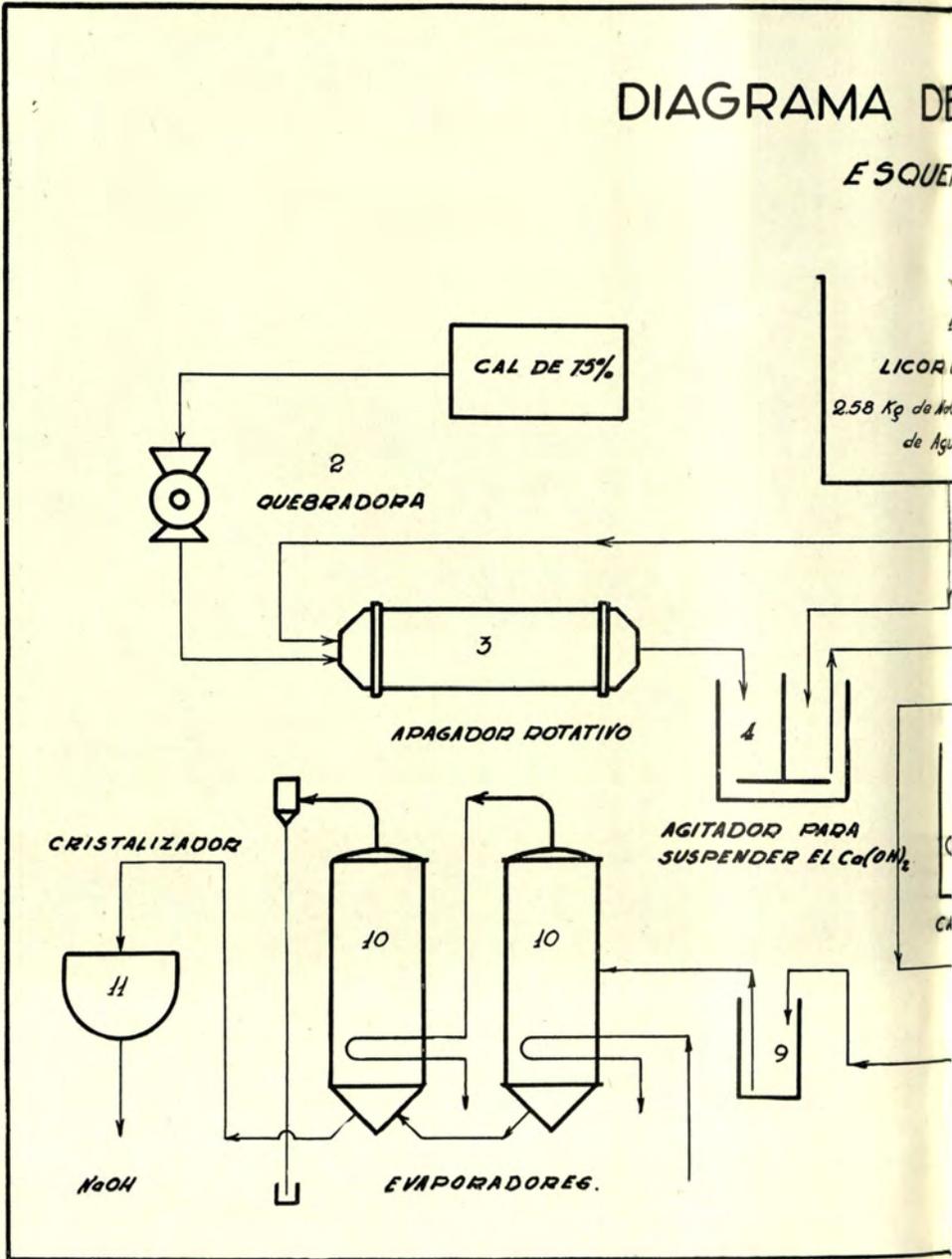
El carbonato de sodio necesario es disuelto en el agitador N° 5, usándose para ello el mismo licor cáustico que se emplea para el apagado de la cal y suspender el hidrato.

**e) Caustificación del carbonato de sodio.**



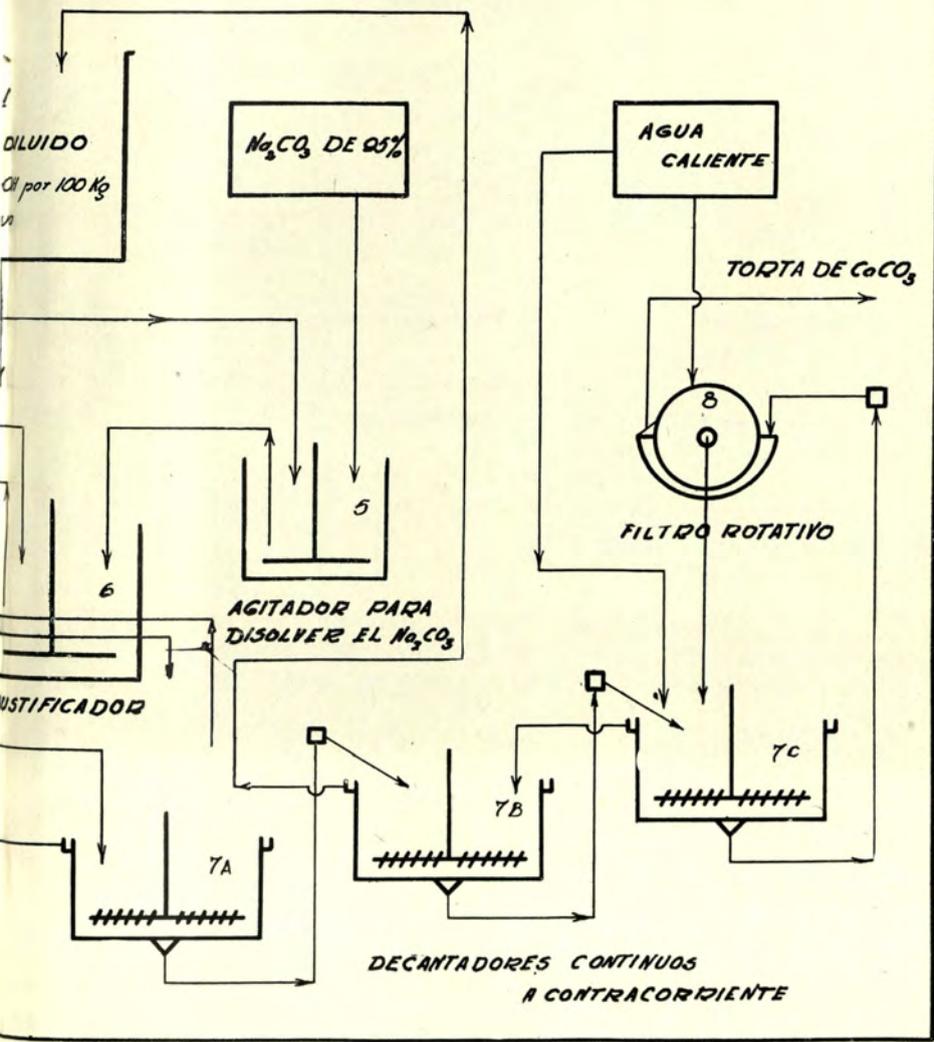
# DIAGRAMA DE

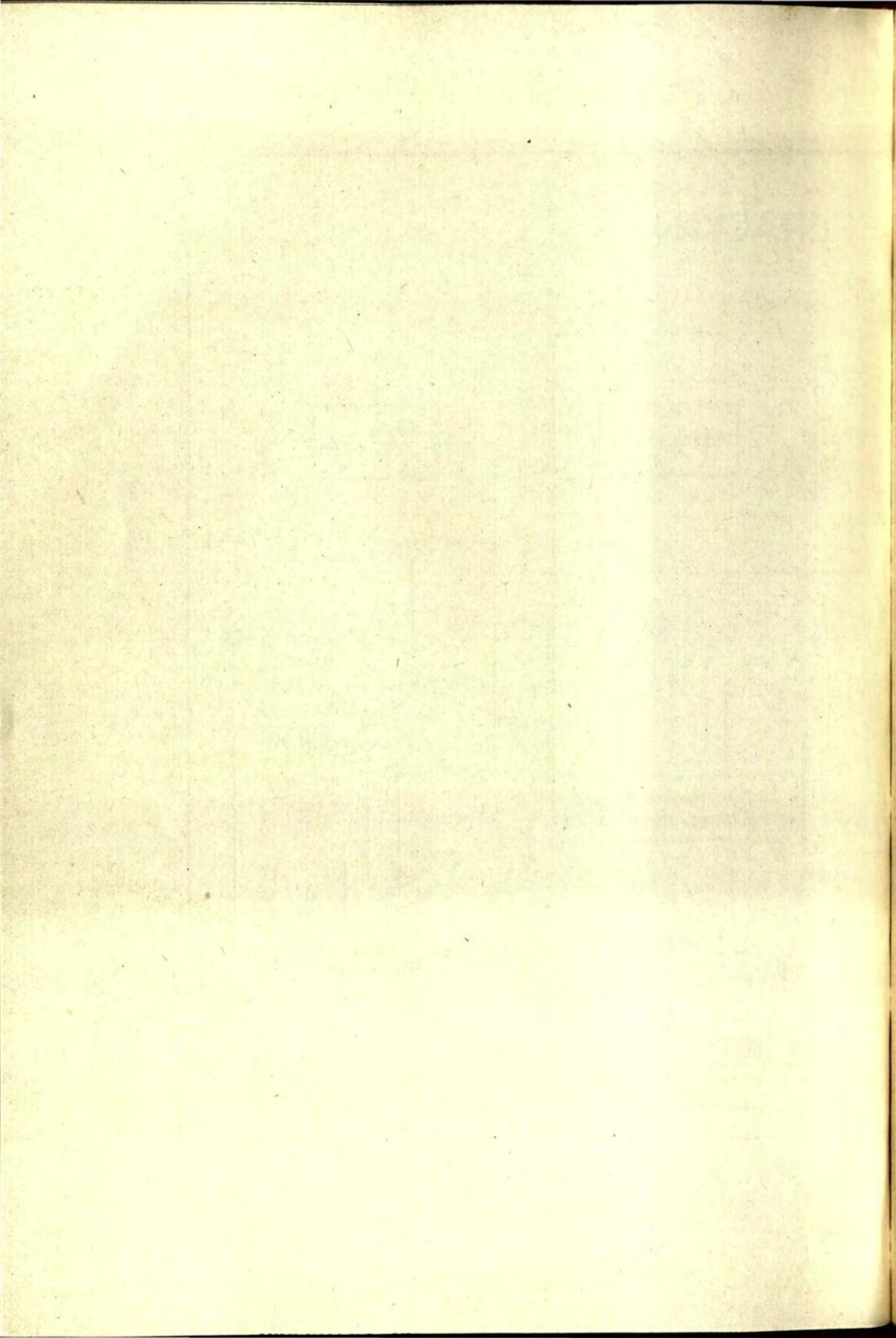
ESQUEMA



# OPERACION

MA N° 1





La suspensión de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y la solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que se preparan en los agitadores 4 y 5, se mezclan en el caustificador N° 6, en donde son agitados y calentados hasta que la reacción alcance el equilibrio.

El calentamiento se efectúa por medio de un serpentín que conduce vapor.

**f) Separación mecánica del precipitado de  $\text{CaCO}_3$  y la lejía cáustica.**

Habiéndose efectuado la reacción en el caustificador, la suspensión resultante de  $\text{CaCO}_3$  en la lejía cáustica se pasa al primer asentador (N° 7A) donde se decanta la lejía, que se almacena en el tanque N° 9 y el precipitado de  $\text{CaCO}_3$  se bombea al asentador N° 7 B.

**g) Lavado de los lodos de  $\text{CaCO}_3$ .**

Esta operación se verificará en dos pasos: primero son lavados usando el sistema de Decantación continua a contracorriente, en los asentadores 7B y 7C, usándose para ello agua caliente, y el filtrado que se obtiene del filtro rotativo marcado con el N° 8. El licor cáustico que sale del decantador 7B es bombeado al tanque de almacenamiento N° 1, quedando listo para ser usado en el apagado de la cal, suspendido del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y en la disolución del carbonato de sodio. Los lodos que se descargan del asentador 7C, se bombean al filtro rotativo N° 8, donde se verifica el lavado final de los lodos, usándose para ello agua caliente.

**h) Concentración de la lejía cáustica.**

La lejía almacenada en el tanque N° 9 es alimentada continuamente a los evaporadores N° 10 concentrándose desde el 11.33% hasta el 35%.

**i) Cristalización de la sosa cáustica.**

El cristalizador marcado con el número 11 consiste casi siempre de una caldera de fundición, calentada a fuego directo. En ésta, se calienta la lejía que sale de los evaporadores, con el objeto de completar su concentración y llevar a cabo la cristalización en la siguiente forma:

A alcanzada la temperatura de  $160^{\circ}\text{C}$ , se deja reposar la lejía, para que se cristalicen las impurezas del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que pueda contener, retirándose el precipitado con rastrillas especiales.

Cuando la temperatura llega a los  $280^{\circ}\text{C}$ , se eleva bruscamente hasta  $360^{\circ}\text{C}$ , continuándose el calentamiento hasta que la temperatura llegue a los  $420^{\circ}\text{C}$ , correspondiendo a este punto, generalmente, una pureza del producto del 99%. Se deja reposar la masa unos momentos, y se procede a vaciarla en tambores de embalaje, donde se efectúa la cristalización.

Definido ya a grandes rasgos el procedimiento de fabricación, es menester calcular, estequiométricamente, las cantidades de las diferentes materias que son alimentadas y descargadas en cada uno de los aparatos que figuran en el esquema anterior. Para ello fijaremos las siguientes bases:

I.—Capacidad: 500 Kgs. de NaOH sólida en 24 horas.

II.—Materia Prima: Oxido de calcio (cal) de una pureza de 75%; carbonato de sodio (Soda Ash) de 95% de pureza.

III.—El licor cáustico que resulte del lavado de los lodos de  $\text{CaCO}_3$  deberá contener el agua necesaria para apagar la cal, hacer la suspensión del hidrato así formado, y disolver el carbonato de sodio. Como el lavado de los lodos se llevará a cabo en asentadores continuos de la casa Dorr, por ser el sistema que ha probado tener el mejor porcentaje de recuperación, además su bajo costo de operación, se consultó al departamento técnico de dicha casa, el cual proporcionó los datos siguientes:

Según las condiciones establecidas en los puntos I y II, las aguas de lavado llevarán 2.58 Kg. de NaOH por cada 100 Kgs. de agua. Esto representa, según la propia casa, una recuperación de NaOH igual al 99% de la total obtenida.

IV.—El porcentaje de transformación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  empleado será igual al 95%.

V.—Se usará el 5% de cal en exceso, según aconseja T. P. Hou, debido a que la pureza de la cal es muy variable.

VI.—Estas condiciones nos fijan una concentración inicial del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , en el caustificador, igual al 12.5% en peso, suponiendo que solamente se encuentran presentes agua y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Esto coincide, como ya se ha dicho, con los datos experimentales y teóricos que se han asentado en el capítulo anterior.

VII.—De las experiencias citadas, se establece que, la cal será apagada en la siguiente forma: Primero se le agregará la cantidad de agua necesaria para formar el hidrato seco, y con éste hidrato se formará una suspensión que contenga 250 gr. de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por cada litro de agua, lo cual coincide con el dato que a este respecto aconseja T. P. Hou.

Fijadas estas condiciones, se calcularon las cantidades de material que deben tratarse en cada uno de los aparatos del esquema 1, en la siguiente forma:

a) Cálculo de las cantidades de  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y agua necesarias para obtener 5000 Kgs. de  $\text{NaOH}$ .

Es bien sabido que los primeros y últimos ciclos de elaboración en cualquier proceso, son completamente anormales, por lo tanto, consideraremos un ciclo normal o intermedio de elaboración. Para nuestro caso, existe siempre una cantidad constante de  $\text{NaOH}$  que recircula con las aguas de lavado; de lo que se desprende que, para obtener la producción antes dicha, es necesario producir en cada ciclo, los 5000 Kgs. de  $\text{NaOH}$  más la que no es posible recuperar en los lavados.

Como en el sistema se recupera el 99.7% de la sosa total producida, según los datos de la casa Dorr, tendremos que, para obtener en el cristalizador 5000 Kgs. de  $\text{NaOH}$ , se deberán producir en cada 24 horas en el caustificador:

$$\frac{5000}{0.997} = 5015 \text{ Kg. de Na OH}$$

es decir, se perderán 15 Kgs. de  $\text{NaOH}$  con los lodos de  $\text{CaCO}_3$  que salen del filtro, y los 5000 Kgs. restantes pasarán al tanque N° 9 en solución, la cual se someterá posteriormente a una concentración y cristalización en los aparatos 10 y 11.

Las cantidades de  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  necesarias para el objeto, considerando que se agrega el 5% de exceso de

CaO, y suponiendo que el porcentaje de transformación del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  es igual al 95% del empleado, son:

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ de } 100\% \frac{106 \times 5015}{0.95 \times 80} = 6993.3 \text{ Kg.}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ de } 95\% \frac{6993.3}{0.95} = 7361.4 \text{ Kg.}$$

$$\text{CaO de } 100\% \frac{56 \times 1.05 \times 6993.3}{106} = 3878.4$$

$$\text{CaO de } 75\% \frac{3878.4}{0.75} = 5071.2 \text{ Kg.}$$

b) Cálculo de las cantidades de agua necesarias para formar el hidrato seco, la suspensión de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , y la solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

El óxido de calcio presente en los 5171.2 Kgs. de cal de 75% que salen de la quebradora, es igual a 3878.4 Kgs. El agua necesaria para transformar este CaO en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es:

$$\frac{3878.4 \times 18}{56} = 1246.6 \text{ Kg.}$$

por lo tanto, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  será:

$$3878.4 + 1246.6 = 5125 \text{ Kgs. de } \text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ } 100\%$$

y el hidrato seco con las impurezas de la cal nos da:

$$5171.2 + 1246.6 = 6417.8 \text{ Kgs. } \text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ de } 75\%$$

El agua que se emplee en suspender el hidrato y en la solución del carbonato deberá ser tal, que la concentración inicial del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en el caustificador corresponde a una solución acuosa de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  de 12.5% en peso.

Como el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  de 100% que va a llegar al caustificador

es igual a 6993.3 Kgs. el agua necesaria para formar con éste una solución de 12.5% en peso será:

$$\frac{6993.1 \times (100 - 12.5)}{12.5} = 48881.1 \text{ Kg.}$$

De estos kilogramos de agua, parte debe emplearse en suspender el hidrato, y en el resto se disolverá el carbonato. El agua necesaria para suspender el hidrato seco, de modo que la suspensión tenga 250 gr. de  $\text{Ca(OH)}_2$  por litro de agua, será:

$$5125. \times 4 = 20500 \text{ Kg.}$$

y la cantidad de agua que queda para disolver el carbonato nos dá:

$$48881.1 - 20500 = 28381.1 \text{ Kg.}$$

c) Cálculo de las cantidades de NaOH que circulan en cada aparato.

Según los datos de la casa Dorr, el agua de lavado de los lodos de  $\text{CaCO}_3$  lleva 25.8 gr. de NaOH por litro de agua. Según esto, la sosa cáustica total que recircula es:

$$50127.7 \times 0.0258. = 1293.3 \text{ Kg.}$$

los cuales serán repartidos en los aparatos 3, 4 y 5, según las siguientes proporciones:

$$\text{N}^\circ 3 - 1246.6 \times 0.0258 = 32.2 \text{ Kg.}$$

$$\text{N}^\circ 4 - 20500.0 \times 0.0258 = 528.9 \text{ ,,}$$

$$\text{N}^\circ 5 - 28381.1 \times 0.0258 = 732.2 \text{ ,,}$$

$$\text{Total} = 1293.3 \text{ Kg.}$$

d) Cálculo de las cantidades de lejía y sólidos que circulan por el caustificador.

La lejía que se obtiene en el caustificador estará formada por los 48881.1 Kg. de agua que se usan para disolver el carbo-

nato y suspender el hidrato de calcio, los 1293.3 Kg. de NaOH que se recirculan constantemente, y los 5015 Kg. de NaOH formados en la reacción. Además, la lejía deberá contener el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que no reaccionó, y las impurezas del carbonato.

Como las impurezas del carbonato son solubles, el monto total de éstas que se encuentran en el caustificador será: la diferencia entre el carbonato de 95% empleado y el carbonato de 100% correspondiente:

$$7361.4 - 6993.3 = 368.1 \text{ Kgs.}$$

De los 6993.3 Kg. de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  puro que se alimentan al tanque 4, solamente se transforma el 95%. Ahora bien, el 5% restante no queda disuelto en su totalidad después de la reacción, pues según afirman F. Ephraim, y T. P. Hou, el 2% del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  empleado precipita en forma de carbonato doble de sodio y calcio, y por lo tanto, sólo el 3% del carbonato queda disuelto después de la reacción, cifra que en nuestro caso es:

$$6993.3 \times 0.03 = 209.8 \text{ Kgs.}$$

precipitado.

$$6993.3 \times 0.02 = 139.9 \text{ Kgs.}$$

en forma de  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . (carbonato doble de sodio y calcio) o sea:

$$\frac{139.9 \times 278}{106} = 366.9 \text{ Kg.}$$

de carbonato doble, los cuales contienen:

$$\frac{366.9 \times 100}{278} = 131.9 \text{ Kg. de Ca CO}_3$$

$$\text{y } 366.9 - (139.9 + 131.9) = 95.1 \text{ Kg. de H}_2\text{O}$$

El precipitado resultante estará formado principalmente por  $\text{CaCO}_3$ , por las impurezas insolubles de la cal, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  no transformado, y por carbonato doble de sodio y calcio.

El  $\text{CaCO}_3$  obtenido en la reacción puede calcularse en la forma siguiente:

$$\frac{5015 \times 100}{80} = 6268.7 \text{ Kg.}$$

que es el formado al producir los 5015 Kgs. de  $\text{NaOH}$ , pero como 131.9 Kgs. de  $\text{CaCO}_3$  forman parte del carbonato doble, el  $\text{CaCO}_3$  presente como tal será:

$$6268.7 - 131.9 = 6136.8$$

Se puede suponer que todas las impurezas de la cal son insolubles, y por lo tanto que, junto con el precipitado se encuentran:

$$5171.2 - 3878.4 = 1292.8 \text{ Kgs.}$$

de impurezas de la cal, y la siguiente cantidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  no transformado:

$$5125.0 - \frac{5015 \times 74}{80} = 486.2 \text{ Kg.}$$

de lo que, el peso total de los sólidos en el caustificador es:

$\text{CaCO}_3$	6136.8	Kg.
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	366.9	,,
$\text{Ca(OH)}_2$	486.2	,,
Impurezas de la Cal	1292.8	,,
<b>Total</b>	<b>8282.7</b>	<b>Kg.</b>

La lejía del caustificador estará formada por:

$\text{NaOH}$	6308.3	Kg.
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	209.8	,,
Impurezas del $\text{Na}_2\text{CO}_3$	368.1	,,
$\text{H}_2\text{O}$	48786.0	,,
<b>Total</b>	<b>55672.2</b>	<b>Kg.</b>

La cantidad de agua fué deducida de la manera siguiente:

Agua agregada al caustificador en la suspensión de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   
y en la solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 48881. Kg.

Agua de cristalización, Carbonato doble de Sodio  
y Calcio 95.1 Kg.  
Diferencia 48786.0 Kg.

Según estos datos, la composición centesimal de la lejía cáustica será:

$\text{H}_2\text{O}$ .	—	87.6308 %
$\text{NaOH}$ .	—	11.3312 %
Impurezas del $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .	—	0.6612 %
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	—	0.3768 %
		Total 100.0000 %

e) Cálculo de las cantidades de lejía que pasan al tanque de almacenamiento N° 9, y las que arrastran los lodos.

La lejía que pase al tanque N° 9 deberá contener 5000 Kgs. de  $\text{NaOH}$ , como hemos fijado con anterioridad. Según esto, el peso de la lejía mencionada será:

$$\frac{5000 \times 55672.2}{6308.3} = 44126.1 \text{ Kg.}$$

y estará formada por las siguientes cantidades de los diferentes componentes:

$\text{H}_2\text{O}$	38668.0	Kg.
$\text{NaOH}$	5000.0	„
Impurezas del $\text{Na}_2\text{CO}_3$	291.8	„
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	166.3	„
		Total 44126.1 Kg.

Esta lejía será concentrada en el evaporador, y cristalizada a fuego directo y por fusión en el cristizador.

Según los datos proporcionados por la casa Dorr, los lodos que se obtienen del asentamiento que se verifica en el caustificador, contienen aproximadamente 40% de sólidos y 60% de lejía. Se ha calculado ya el peso de los sólidos producidos por cada 5015 Kgs. de sosa. Asimismo, se conocen ya las cantidades de lejía que pasan al tanque de alimentación del evaporador (Nº 9). Es claro que el resto de lejía es el que forma parte de los lodos resultantes del primer asentamiento, y por consiguiente, los lodos citados tendrán la siguiente composición:

Sólidos		8282.7 Kg.			
Lejía	{	NaOH	—	1808.3	„
		H <sub>2</sub> O	—	10118.0	„
		Impurezas del Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	—	76.3	„
		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	—	43.5	„
		Total		19828.8	Kg.

Esto nos representa una proporción de sólidos en los lodos, igual al 41.77%, lo cual concuerda bastante bien con los datos que al respecto proporcionó la casa Dorr, y con los que ha encontrado D. F. Irvin.

f) Cálculo de la composición de la torta de CaCO<sub>3</sub> que sale del filtro, de las aguas de lavado que pasan de los asentadores Dorr al tanque de alimentación de agua del apagador de cal, y de los tanques de disolución y suspensión del Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y Ca(OH)<sub>2</sub>.

Según D. F. Irvin, cuando se usa un filtro rotativo para efectuar el lavado final del precipitado de CaCO<sub>3</sub>, la torta sale del filtro conteniendo 65% de sólidos y 35% de un licor muy diluido que contiene los 15 Kgs. de NaOH que no se recuperan.

El peso total de la torta puede calcularse del modo siguiente:

$$\frac{8282.7}{0.65} = 12742.6 \text{ Kg.}$$

y el peso de la solución que contiene la torta es:

Peso total de la torta	12742.6 Kg.
Peso de los sólidos	8282.7 „
	<hr/>
Diferencia	4459.9 Kg.

Puede suponerse que el NaOH, el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y las impurezas del Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> guardan todavía la misma proporción entre sí que en la lejía original, resultando de esto la siguiente composición de la solución diluida mencionada:

H <sub>2</sub> O	4443.5 Kg.
NaOH	15.0 „
Impurezas del Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.9 „
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.5 „
	<hr/>
Total	4459.9 Kg.

Se sabe, por cálculos anteriores, que las aguas de lavado llevan 50127.7 Kgs. de agua, y 1293.3 Kgs. de NaOH. También en este caso se puede suponer que las sustancias en solución guardan entre sí la proporción original de la lejía, lo cual nos da la siguiente composición proporcional, para las aguas de lavado:

H <sub>2</sub> O	50127.7 Kg.
NaOH	1293.3 „
Impurezas del Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	75.4 „
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43.0 „
	<hr/>
Total	51539.4 Kg.

g).—Cálculo de las cantidades de agua y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> de 95% que se necesitan alimentar en uno de los ciclos teóricos considerados.

Para efectuar el proceso en las condiciones fijadas, se ha calculado en páginas anteriores, que se requieren 50127.7 Kgs. de agua; ésta será empleada primero en apagar la cal, suspender el hidrato y disolver el carbonato, y una vez hecha la caustificación, parte de esa agua será tomada por el carbonato doble de Na y Ca en su cristalización.

Resulta en total, que el agua que se pierde con la torta de  $\text{CaCO}_3$  es igual a la suma de:

Agua utilizada en el apagado	1246.6	Kg.
Agua de cristalización del Carbonato Doble	95.1	„
Agua en la torta	4443.5	„
	<hr/>	
Total	5785.2	Kg.

Se tiene, por otro lado, que con la lejía de  $\text{NaOH}$  que va a ser concentrada se van 38688 Kgs. de agua. Ahora bien, si se supone que no se pierde nada por evaporación, el agua que será necesario alimentar en el filtro y los decantadores Dorr sería:

$$38688 + 5785.2 = 44473.2 \text{ Kgs.}$$

de lo que se deduce que recirculan en el proceso.

$$50127.7 - 44473.2 = 5654.5 \text{ Kgs.}$$

Sin embargo, como las pérdidas por evaporación pueden ser considerables, es conveniente, para los cálculos posteriores, suponer que se necesitarán alimentar los 50127.7 Kgs. de agua, o en números redondos, 50000 Kgs.

Como las aguas de lavado llevan 43.0 Kgs. de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  puro, es conveniente corregir las cifras de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  100% y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  95% calculadas en la parte (a).

La corrección puede hacerse del siguiente modo:

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ de } 100\% \quad 6993.3 - 43 = 6950.3 \text{ Kg.}$$

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ de } 95\% \quad \frac{6950.3}{0.95} = 7316.1 \text{ Kg.}$$

h).—Cálculo de los volúmenes que ocuparán en cada aparato, las cantidades de materiales que circulan en las 24 horas fijadas como base.

Para ésto, se calcularon las densidades aproximadas de las diferentes soluciones, y se empleó la fórmula siguiente:

$$V = \frac{M}{D} \quad (1)$$

en la que V es el volumen ocupado, M la masa, y D la densidad.

En los casos en que se encuentran presentes soluciones y material sólido, se apreciaron las densidades de ambas fases, y se empleó la fórmula:

$$V = \frac{M}{D} + \frac{M_1}{D_1} \quad (2)$$

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente forma, según la numeración que aparece en la figura 1.

(1).—Tanque de almacenamiento de la solución cáustica diluida: 50379.5 Lts.

(3).—Apagador rotativo de cal, volumen activo: 2855.4 Lts.

(4).—Tanque para suspender el hidrato de calcio: 27959.5 Lts.

(5).—Tanque para disolver el carbonato de sodio: 24526.9 Lts.

(6).—Caustificador: 52486.5 Lts.

(9).—Tanque de alimentación de la lejía al evaporador: 38741 Lts.

Los volúmenes y características de las demás unidades, se fijarán más adelante cuando se efectuó el cálculo de aparatos.

### B.—CALCULO DE APARATOS:

Hemos calculado ya los pesos y volúmenes de las sustancias que circulan en 24 horas en cada unidad del ciclo de caustificación. También se dedujeron los volúmenes de los tanques, suponiendo que en ellos se tratasen de una sola vez todos los materiales que circulan en el tiempo fijado.

Los volúmenes así calculados deberán ser corregidos de acuerdo con el tiempo que dure cada tratamiento en los aparatos discontinuos. Para ésto haremos las siguientes consideraciones.

De todos los aparatos discontinuos el que más tiempo necesita para verificar su trabajo es el caustificador, según los datos obtenidos en la práctica. El tiempo necesario para cargar el caustificador con la suspensión de hidrato y la solución de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , junto con el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio de la reacción, oscila entre las  $3\frac{1}{2}$  y 4 horas.

Ahora bien, debe suponerse que, una vez descargados los tanques de la solución de carbonato y la suspensión de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  éstos pueden emplearse nuevamente. El tiempo necesario para cargar los tanques mencionados, efectuar la homogeneización, y la descarga, puede estimarse en  $2\frac{1}{2}$  o 3 horas.

Las operaciones de quebrado y apagado de la cal duran siempre menos tiempo que el empleado en hacer la suspensión del hidrato, y, por lo tanto, debe suponerse que las operaciones de quebrado y apagado de la cal, disolución del carbonato y suspendido del hidróxido pueden hacerse simultáneamente, de manera que cada 4 horas se tenga listo el material necesario para efectuar cada una de las operaciones mencionadas.

Se tiene, por otro lado, que para llevar a cabo el lavado de los lodos usando el sistema de decantación continua a contracorriente es indispensable alimentar constantemente el primer asentador con la suspensión de  $\text{CaCO}_3$  en lejía cáustica.

Esto último representaría una pérdida de tiempo al descargar el caustificador, y una interrupción indispensable del trabajo en el sistema de lavado.

Estas dificultades pueden ser evitadas si se instalan 2 tanques caustificadores, pues pasadas las 4 horas que dura la carga y caustificación en uno de ellos, puede cargarse el otro con la suspensión y solución ya preparadas, y como en este último la operación de cargado y caustificación durará también 4 horas, se instalará un sistema lavador cuya capacidad sea suficiente para consumir la mezcla de uno de los caustificadores en 4 horas.

Según esto, el número de operaciones que pueden hacerse diariamente en cada caustificador es igual a 3, y el número total de caustificaciones será 6. Por consiguiente, los volúmenes calculados con anterioridad deberán ser divididos entre 6, y de

acuerdo con lo que resulte se determinarán las dimensiones de cada aparato.

A continuación se deducen las características de cada aparato, siguiendo el orden marcado en el diagrama de operación.

### **1º—Tanque de Almacenamiento del licor cáustico diluido.— Dimensiones.**

La capacidad debe ser, de 8396 litros, las dimensiones standard que corresponden aproximadamente a este volumen, según catálogo de la casa Pittsburgh Desmoines Steel Co., son:

Diámetro 7 fts., altura 6 fts., con fondo esférico, lo cual nos da una capacidad de 240 galones, o sean 9000 litros aproximadamente.

Material.—Según las tables del Chem. Eng. Hand Book, puede usarse, la lámina de fierro para soluciones cáusticas a cualquier temperatura y concentración.

### **2º—Quebradora para Cal.**

El tamaño más chico que construye la casa Jeffrey de las quebradoras tipo Swing-Hammer, tiene una capacidad de 1 tonelada por hora, lo cual es más que suficiente para nuestro propósito.

Dimensiones: 10 × 13 pulgadas.

### **3º—Apagador Rotativo para la Cal.**

Según el volumen de la cal apagada, en cada operación se tendrá un volumen de 476 litros o sean 108 galones. El tamaño más apropiado de la mezcladora tipo "GPM" de la casa Patterson, tiene las siguientes dimensiones exteriores. Ancho 30 pulgadas, altura, 57 pulgadas, largo 103 pulgadas, que corresponden a una capacidad total de 185 galones, y un volumen de reacción de 125 galones.

### **4º—Agitador para suspender el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .**

El volumen que resulta para este aparato es de 4660 litros,

o sean 1230 galonés. Según catálogo de la casa Patterson, las dimensiones exteriores del tanque son: Diámetro 72 pulgadas, altura, 72 pulgadas, con un volumen de 1270 galones, usando agitadores del tipo "E".

**5º—Agitador para disolver el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .**

El volumen de éste deberá ser de 4088 litros, o sean 1080 galones. El tipo y tamaño de este tanque será igual al anterior, debido a que los tamaños standard que se fabrican, cuyo volumen es más aproximado al necesario son de 975 y 1270 galones.

**6º—Caustificador.**

Puede usarse un agitador tipo "E" de la casa Patterson. El volumen de reacción es de 8748 litros o sean 2314 galones. Las dimensiones correspondientes son:  $90 \times 90$  pulgadas correspondiendo a una capacidad de 2500 galones.

**7º—Decantadores Continuos.**

En éstos se lavará un material que contiene:

Insolubles:	—	8282.7	Kg.
Sosa Cáustica	—	6308.3	„
Carbonato de Sodio	—	209.8	„
Impurezas del Carbonato	—	368.1	„
		<hr/>	
		15168.9	Kgs.

que nos representa un contenido de 45.4% de material soluble.

El lavado se hará con la siguiente cantidad de agua:

Agua alimentada al filtro y al decantador 7c.	44473.2	Kg.
Agua tirada con la torta de $\text{CaCO}_3$	4443.5	„
	<hr/>	
Diferencia	40029.7	Kg.

El residuo insoluble se supone que se asienta con un contenido de 58.23% de solución en todos los decantadores.

Como ya se ha calculado el reflujo del decantador 7A está formado por: 38668.0 Kg. de agua y 5458.1 Kg. de material soluble, y los lodos que pasan de este decantador al 7B llevan 8282.7 Kg. de material insoluble, 10118.0 Kg. de agua y 1428.1 Kg. de material soluble.

Según los resultados deducidos en la primera parte de este capítulo, el reflujo del decantador 7B lleva: 50127.7 Kg. de agua, y 1411.7 Kg. de material soluble. La solución que arrastra consigo los lodos de este decantador deberá contener la misma proporción de material soluble en el agua. Como los lodos arrastran el 58.23% de solución, el peso total de ésta será, como en el caso anterior, de 11546.1, con un contenido de agua, según las proporciones anteriores, de 11230.3 Kg. y 315.8 Kg. de material soluble.

Como el agua que se alimenta en el decantador 7C es igual a 40029.7 Kg. puede suponerse, como una primera aproximación, que los 315.8 Kg. de material soluble que llevan los lodos que se descarga del decantador 7B, se van a diluir en los  $11230.3 + 40029.7 = 51260.0$  Kg. de agua. Si los lodos arrastran 58.23% de solución, las cantidades de agua y solubles que salen con los lodos de este último asentador serán respectivamente de: 11475 y 71.1 Kg.

Si en la torta del filtro se tiran solamente 4443.5 Kg. de agua, y 16.4 Kg. de solubles, las cantidades de éstos que regresan al decantador 7C serán:

Agua 11475 — 4443.5 = 7031.5 Kg.

Solubles 71.1 — 16.4 = 54.7 Kg.

y la solución estará formada por:

Agua total alimentada al ciclo 44473.2 Kg.

Agua con los lodos del decantador 7C 11230.3 Kg.

Agua que se regresa del filtro 7031.5 Kg.

Total: 62735.0 Kg. de agua con un contenido de solubles

Solubles con los lodos del asentador 7B.	315.8	Kg.
Solubles que se regresan del filtro	54.7	„
	<hr/>	
Total	370.5	Kg.

Según estas proporciones, si los lodos del decantador 7C llevan también el 58.23% de solución, las cantidades reales de

agua y solubles que éstos arrastran consigo continuamente al filtro en 24 horas, serán respectivamente de: 11478 y 68.1 Kg. y el reflujo estará formado por 51257.0 Kg. de agua y 302.4 Kg. de solubles.

De estos resultados puede calcularse la recuperación del sistema de decantación continua a contra corriente, pues si tenemos en cuenta que inicialmente había 6886.2 Kg. de solubles, y con los lodos del decantador salen solamente 68.1 Kg. se tendrá:

$$\text{Recuperación} = 100 - \frac{68.1 \times 100}{6886.2} = 99.01\%$$

Para calcular las dimensiones de los decantadores haremos uso del dato siguiente, proporcionado por Anthony Anable: "En la decantación de los precipitados de  $\text{CaCO}_3$ , en medios líquidos constituidos por soluciones cáusticas con 11% de  $\text{NaOH}$ , puede suponerse que se requieren 12 pies cuadrados de superficie de decantación en 24 horas, usando decantadores continuos Dorr".

Para decantar 8.2827 toneladas métricas de  $\text{CaCO}_3$ , o sean 9.127 toneladas inglesas (Short Tons) se necesitan:

$$9.127 \times 12 = 109.5 \text{ fts}^2$$

lo cual corresponde a asentadores cuyo diámetro será de 11.8 fts. o sean 3.54 metros, y con una altura de 1.20 m.

### 8º—Filtro Rotativo.

La operación de este aparato es continua, y por lo tanto, el volumen de filtrado que se obtenga por unidad de tiempo deberá ser constante.

La ecuación que nos representa el fenómeno de una filtración a volumen constante es:

$$\frac{V^2}{A^2} = \frac{P}{r u} \theta \quad (3)$$

siendo V el volumen de filtrado, A el área de filtración, P la diferencia de presiones o fuerza directriz del fenómeno, r la resistencia unitaria de la torta, u el volumen de la torta recolectado por unidad de volumen de filtrado, y  $\theta$  el tiempo de filtración.

Para calcular el área de filtración que se requiere en nuestro caso, despejaré A de la ecuación anterior:

$$A = \sqrt{\frac{V^2 r u}{P \theta}} \quad (4)$$

Según resultados anteriores, la torta se descarga con 4459.9 Kg. de solución muy diluida, de NaOH. Los lodos que se alimentan al filtro están formados por 8282.7 Kg. de sólidos, y 11546.1 Kg. de una solución cáustica del 0.59%. Es decir, si en el filtro solamente se redujera la cantidad de solución que llevan los lodos, de 11546.1 a 4459.9 Kg. los solubles contenidos por la torta serían 26.7 Kg.

Pero como se trata de reducir los 26.7 Kg. a 16.4, para que la recuperación sea de 99.7 %, será necesario lavar la torta con el agua suficiente para diluir los 26.7 Kg. de solubles, de modo que en 4459.9 Kg. de solución queden solamente 16.4 Kg. de solubles, lo cual se puede calcular del modo siguiente:

$$\frac{26.7 \times 4459.9}{16.4} = 7269.6 \text{ Kg.}$$

que es el peso total de la solución, y el peso aproximado del agua que se necesita agregar al filtro será:

$$7269.6 - 4459.9 = 2809.7 \text{ Kg.}$$

Como la solución que circula a través de la torta es muy diluida, para calcular el volumen de filtrado lo supondremos de una densidad igual a 1, resultando entonces:

**Volumen filtrado** = 7086.2 + 2809.7 = 9895.9 litros siendo 7086.2 litros los que se filtran antes del lavado (11546.1 — 4459.9). Con el objeto de usar los datos que aparecen en los manuales, será necesario transformar todos nuestros resultados en unidades inglesas.

Entonces, si el volumen de filtrado en 24 horas es de 9895.9 litros, tendremos:

$$V = \frac{9895.9 \times 0.03531}{24} = 14.6 \text{ cu. ft./hr.}$$

El volumen que ocupa la torta que se descarga en 24 horas, es de 7528 litros, lo cual corresponde a 11.07 cu. ft./hr. por consiguiente:

$$u = \frac{11.07}{14.6} = 0.76 \quad (6)$$

Ya hemos fijado en estos dos últimos datos el tiempo de filtración igual a una hora. Esto nos transforma la ecuación (4) en:

$$A = \sqrt{\frac{V^2 r u}{P}} \quad (7)$$

La diferencia de presiones más usada en el trabajo de los filtros rotativos Oliver con tortas de  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{CaSO}_4$  es de 10" de mercurio, lo cual corresponde a una diferencia de presiones, o vacío, de 707.33 litros por pie cuadrado.

D. F. Irvin, basado en determinaciones experimentales, afirma que la resistencia unitaria ( $r$ ) de las tortas de  $\text{CaCO}_3$  puede apreciarse en 960 lb. hr./pie<sup>4</sup>.

Substituyendo los valores de  $P$ ,  $V$ ,  $u$  y  $r$ , en la ecuación (7), se tiene:

$$A = \sqrt{\frac{14.6^2 \times 960 \times 0.76}{707.33}} = 47 \text{ pies}^2$$

Para comprobar el valor del área de filtración obtenida se tomaron los datos que a este respecto tiene el **Filtration Handbook** que publica la casa Oliver. La capacidad media de filtración para el lavado de los precipitados de  $\text{CaCO}_3$  es: 750 lbs. de precipitado húmedo en 24 horas, por pie cuadrado de área filtrante.

De acuerdo con este dato, el área de filtración necesaria en nuestro caso, resulta ser de 46.6 ft<sup>2</sup>.

El tamaño standard de los filtros Rotativos Oliver especiales para el lavado de los lodos en plantas caustificadoras que corresponde al área filtrante deducida es:

Diámetro del tambor: 4 pies.

Lóngitud del tambor: 4 pies.

Con una área filtrante de 50 pies<sup>2</sup>.

### 9º—Tanque para alimentación de la lejía al Evaporador.

El volumen de las lejías que circulan por este recipiente en 24 horas es de 38741 litros.

Comunmente se considera que el volumen necesario para un tanque de alimentación de un evaporador o rectificador continuos corresponde al volumen que se alimenta en una hora, por lo que el volumen del tanque deberá ser de 1614 litros o sean 419.6 galones. Las dimensiones standard que más se aproximan a este volumen son:

Diámetro 50 pulgadas, altura 50 pulgadas, con una capacidad de 425 galones.

### 10º—Evaporador.

Según W. L. Badger, la ecuación que nos sirve para calcular el área de calentamiento para evaporadores de simple o múltiple efecto es:

$$q = U_m A \Delta t \quad (8)$$

en la que q es la cantidad de calor transmitida en todos los efectos,  $U_m$  el coeficiente medio de transmisión del calor, y  $\Delta t$  la diferencia total de temperaturas.

Para concentrar la lejía del 11.33% de NaOH al 35% de NaOH, se necesita evaporar, 29382.3 Kg. de agua o sean 64788 libras por hora.

Si  $q_s$  es el calor que se alimenta en el vapor de calentamiento  $q_c$  el calor que sale en el condensado,  $Q_1$  el calor sensible que entra con la solución diluida,  $Q_2$  el calor sensible que sale con la

solución concentrada, y  $Q_L$  el calor latente que se consume para evaporar el agua, podremos hacer el balance de calor en la siguiente forma:

$$Q_1 + q_s = Q_L + Q_2 + q_c \quad (9)$$

El calor específico medio de las soluciones de NaOH de 10 y 35% es: 1.619 BTU/lb.

Se van a alimentar 1838.5 Kg. de solución (4054 lb.) por hora, a 68° F, por lo tanto:

$$Q_1 = 1.619 \times 4054 \times 68 = 446302 \text{ B. T. U./hora}$$

la lejía concentrada que se descarga es igual a 614.3 Kg. por hora (1355 lb.), a una temperatura de 140° F. Esta temperatura se dedujo de acuerdo con el punto de ebullición del agua a una presión absoluta de 3" de Hg., que se la que se obtiene haciendo un vacío de 20" de Hg., y tomando en cuenta además el incremento del punto de ebullición. Resulta entonces:

$$Q_2 = 1.619 \times 1355 \times 140 = 307124 \text{ BTU/hora.}$$

Se van a evaporar 2700 lb. de agua por hora a 140° F. El calor latente de vaporización a 140° F es:

1013.1 BTU/lb., de donde:

$$Q_L = 2700 \times 1013.1 = 2735370 \text{ BTU/hora.}$$

Walker, Lewis and Mc Adams, suponen que al concentrar licores cáusticos del 10 al 35% 0.85 N libras de agua se avaporan por cada libra de vapor.

Ahora bien, una caldera de la capacidad suficiente para una planta de esta categoría (100-150 caballos caldera) según T. Croft y R. B. Purdy produce vapor a una presión de 150 # y de 97% de calidad. El contenido calorífico del vapor es en estas condiciones de 1167.5 BTU/lb.

Si se evaporan 0.8 libras de agua por libra de vapor, se necesitarán 3375 libras de vapor por hora, o sea un total de 3940312 BTU/hora. Según esto, el condensado llevará 358 BTU/libra. Las tablas de vapor nos marcan 330.2 BTU/lb. en el condensado a 150 #, lo cual nos demuestra que nos hemos colocado realmente del lado de la seguridad.

Con estos datos completamos nuestro balance de calor en la siguiente forma:

$$\begin{array}{rcl}
 Q_1 & = & 446.302 \\
 & & 3.940.312 \\
 q_s & = & \frac{\quad}{4.386.625} \\
 Q_L & = & 2.735.370 \\
 Q_2 & = & 307.124 \\
 & & 1.204.942 \\
 q_c & = & \frac{\quad}{4.247.426}
 \end{array}$$

En este balance de calor puede observarse que  $Q_L + q_c = q_s$  existiendo una diferencia entre  $Q_1$  y  $Q_2$  de 139178 BTU, lo cual es producido por haber considerado un calor específico medio, y porque la apreciación del incremento del punto de ebullición no es exacta. Tanto Badger como Walker suponen casos similares que,  $Q_1 = Q_2$ , lo cual simplifica el balance de calor.

La cantidad total de calor que hay que transmitir es, por lo tanto:

$$q = 2735370 \text{ BTU/hora.}$$

La diferencia total de temperatura es:  $358.5 - 140 = 218.5^\circ \text{ F}$ .

Para aplicar la ecuación (8) nos resta apreciar un valor para  $U_m$ . Walker publica una gráfica de  $\Delta t$  contra  $U_m$ , siendo  $\Delta t$  la diferencia total de temperatura,  $U$  el coeficiente total de transmisión del calor, y  $\mu$  la viscosidad del licor a la temperatura de ebullición en centipoises.

Con la viscosidad media de la solución a  $140^\circ \text{ F}$  se determinó el valor de  $U_m$  en la gráfica mencionada, resultando:  $U_m = 100 \text{ BTU por hora, por pie cuadrado y por grado F}$ .

Despejando a  $A$  de la ecuación (8) y substituyendo los valores deducidos hasta aquí, resulta:

$$A = \frac{2.735.370}{100 \times 218.5} = 125.2 \text{ ft}^2$$

Esta área de transmisión de calor es la que debe tenerse en cada efecto, ya sea que se trabaje con simple o con múltiple efecto.

Es conveniente determinar en esta parte cuál es el  $N^\circ$  de

efectos más económico en nuestro caso. Uno de los datos que se requieren para este cálculo es el costo del vapor de calentamiento. Como todavía no se conoce la capacidad total de la caldera, supondremos por lo pronto que las 1000 libras de vapor cuestan 0.3176 Dlls, adoptándose esta moneda debido a la actual inestabilidad de la nuestra. Es conveniente aclarar que el precio del vapor que se supone está completamente de acuerdo con las condiciones locales, según datos proporcionados por la casa Babcock & Wilcox.

Si se van a evaporar 64788 libras en un día de operación, y se supone que se evaporan 0.8 N libras por libra de vapor, siendo N el número de efectos, el costo de vapor por día será:

$$64788 \times \frac{1}{0.8N} \times \frac{0.3176}{1000} = \frac{25.712}{N} \text{ Dlls.}$$

Generalmente se supone que se amortiza anualmente el 45%, y que se trabajan 300 días al año.

Los precios totales de los evaporadores **Swenson** de calandria de tubos horizontales, incluyendo accesorios, transporte e instalación, son:

N - Nº de efectos	C - Costo
1	3266 Dlls.
2	6152 "
3	9131 "
4	12064 "

Para calcular los gastos fijos emplearemos la fórmula:

$$Gf = \frac{0.45C}{300} = 0.0015 C \quad (10)$$

y substituyendo valores resulta:

N	Gf.
1	4.899 Dlls./día.
2	9.298 "
3	13.697 "
4	18.096 "

El balance se puede verificar en la forma:

N	1	2	3	4
Gf.	4.899	9.298	13.697	18.096
Vapor	<u>25.712</u>	<u>12.856</u>	<u>8.570</u>	<u>6.428</u>
Suma	30.611	22.154	22.267	24.524

De este balance se deduce que el evaporador deberá ser del tipo de tubos horizontales y de doble efecto, con una superficie de calentamiento de 125 pies cuadrados en cada efecto.

### 11°—Cristalizador.

La casa Pfaudler aconseja el uso de 2 cristalizadores calentados a fuego directo, de las siguientes dimensiones: Diámetro 40" y 30" de profundidad, con una capacidad de 142 galones cada uno.

### Determinación de la Capacidad de la Caldera.

a) Se necesitan calentar aproximadamente 4600 libras de agua por hora, para alimentar el filtro y el decantador 7C, de 68 a 176° F, ésto nos consume una cantidad de calor de 496,125 BTU/hora.

b) Para disolver el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se necesitan calentar 2148 libras de agua por hora, de 68° a 100° F, lo cual consume 68736 BTU/hora.

c) En el caustificador se van a calentar 5863 libras por hora de la mezcla reaccionante, de 68 a 176° F, lo que corresponde a un consumo de 504 360 BTU/hora.

d) Si en un evaporador de simple efecto se requieren... 2735370 BTU/hora para evaporar las 64788 libras de agua de la solución, en un evaporador de doble efecto se necesitan solamente 1367685 BTU/hora.

El calor total que se requiere será entonces: 2436906 BTU/hora.

Si se supone que se aprovecha solamente el 80% del calor total del vapor, se necesitará producir en la caldera una cantidad tal de vapor que lleve:

3046132 BTU/hora.

Como un caballo caldera equivale a 33 472 BTU/hora, la capacidad de la caldera será de:

$$\frac{3\ 046\ 132}{33\ 472} = 91 \text{ C. caldera.}$$

### Determinación del Consumo de Energía Eléctrica.

Se van a usar motores eléctricos para mover las siguientes bombas:

a) Bomba para el transporte del licor diluido, del decantador 7 B al tanque de almacenamiento N<sup>o</sup> 1. El gasto de esta bomba deberá ser de 7.64 Gal./min., del licor mencionado, cuya densidad es de 0.77 lb./cu.ft. La altura a que se elevará el líquido es de 25' aproximadamente, por una tubería cuya longitud máxima será de 30'. La casa Worthington ofrece un tamaño standard de bomba centrífuga de succión simple, cuyo gasto es de 10 Gal./min., venciendo la altura requerida, y construída especialmente para este uso. El diámetro de la tubería recomendado por la misma casa es de 1", y la bomba es accionada por un motor de ½HP. a 1450 r. p. m.

b). Bomba para el transporte de la suspensión de Ca(OH)<sub>2</sub>. Esta bomba transportará 0.688 cu. ft/min. de suspensión, sin vencer ninguna altura, tanto el tanque en cuestión como el caustificador estarán a la misma altura. La casa Dorr ofrece para estos usos bombas de diafragma. El tamaño standard más apropiado es el que se describe: Tipo 1 Simplex, de succión, con un desplazamiento de 0.77 cu. ft. min. Estas bombas se proporcionan con la tubería necesaria. El motor que la acciona es de 1HP., y de una velocidad de 50 r. p. m.

c) Bomba para el transporte de la mezcla final del caustificador, al decantador N<sup>o</sup> 7A. En este caso es conveniente usar también una bomba de diafragma, sirviendo la misma para la descarga de los dos caustificadores, pues bastará proveerla de dos tubos de succión. El gasto de esta bomba es de 1.18 pies cúbicos por minuto aproximadamente y el tamaño standard más apropiado es: Bomba tipo 1 Duplex, de succión, con un desplazamiento de 1.54 pies cúbicos por minuto, accionada por un motor de 2 H. P. a una velocidad de 50 r. p. m.

d) Bombas para la descarga de los lodos de los asentadores.

Cada bomba debe transportar aproximadamente 0.136 cu. ft. min. de lodos. El tamaño más chico de bombas de diafragma, para este uso, que fabrica la casa Dorr es: Bomba tipo 1 siplex "Laboratory Size" de succión, con un desplazamiento de 0.20 cu. ft./min, accionada por un motor de  $\frac{1}{2}$  H. P. a 50 r. p. m.

e) Bombas para el condensado de los evaporadores.

La casa Swenson recomienda el uso de 2 bombas centrífugas para este fin, con un gasto de 5G/m., usando tubería de  $(\frac{3}{4})''$ , y accionadas por motores de 0.33 HP. El gasto real que se necesitará es de 3.75 Gal./Min. lo cual nos da un margen suficiente para el retorno del condensado a la caldera.

f) Bomba para producir el vacío en los evaporadores. La bomba que producirá el vacío, según los datos de la casa Swenson, y los resultados que obtiene W. L. Badger, debe tener un gasto correspondiente a 20 cu. ft./min. de aire libre, usando agua de enfriamiento en el condensador a 60° F, y saliendo el vapor a 140° F., si el trabajo de los evaporadores es a contracorriente. Las bombas que se usan para este propósito son las llamadas "Dry vacuum pumps" y, las características de la que se usará en nuestro caso son:

Tipo: Desplazamiento simple.

Características: Un gasto de 28 cu. ft./min. usando tubería de 1'' de diámetro, y accionada por un motor de 2 HP, a una velocidad de 385. r. p. m.

g) Bomba para alimentación de agua fría al condensador. La cantidad de agua de enfriamiento que se requiere, para la capacidad mencionada, según los datos que proporcionó la casa Swenson, es de 105 Gal./min. La bomba centrífuga requerida para esta capacidad, es accionada a 1450 r. p. m. por un motor de 2 H. P.

h) Bomba para alimentar el tanque de agua de distribución general.

La cantidad de agua que debe alimentarse deberá ser, cuando menos, la utilizada en el sistema, en una hora. Esto ocasiona un gasto de 9.1 Gal./min. debiendo vencer una altura de 20 metros, por lo que deberá ser accionada por un motor de 1.73 H. P. El tamaño standard más adecuado de la casa

Worthington, corresponde a una bomba centrífuga de 10 Gal./min. con motor de 2 H. P.

i) Quebradora. El consumo máximo de potencia de las quebradoras del tipo Swing Hammer, según Tyler, es de 6 H.P. por tonelada en una hora, es decir, la quebradora estará movida por un motor de 6 H. P.

j) Apagador de cal. Este aparato, según la casa Patterson, está accionado por un motor de 5 H. P.

k) El filtro rotativo es movido por un motor de  $\frac{1}{2}$  H. P. según informó la casa Oliver.

l) Los motores que accionan a los agitadores que se proponen para hacer la suspensión del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y la disolución del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , son de 3 H. P. cada uno, según datos de la casa constructora Patterson".

m) Para mover los agitadores de los tanques de caustificación, se necesitan, según la casa Patterson, motores de 5 H. P.

n) El consumo de energía eléctrica por hora, por concepto de alumbrado, puede apreciarse como igual a 2 H. P.

Resulta así, que la energía eléctrica que se consumirá por hora en la planta es de 39.66 H. P., o sean 29.6 K. W.

#### Determinación del Consumo de Combustible.

Como el calentamiento, tanto en la caldera como en el cristizador, se efectuará con petróleo crudo tendremos:

a) La eficiencia de una caldera se expresa:

$$E = \frac{\text{Calor producido x lb. de combustible}}{\text{Calor aprovechado en el vapor x lb. de comb.}}$$

Según A. D. Blake y R. B. Purdy, la eficiencia media de las calderas chicas, es de 0.80. Por lo que, si el vapor que se consume por hora necesita llevar 3046132 BTU, y el valor calorífico del petróleo es aproximadamente de 140.000 BTU/Gal., si su densidad es de 0.86, tendremos que el consumo de combustible por hora en la caldera será:

$$\frac{3\ 046\ 132}{140.000 \times 0.8} = 27.20 \text{ Gal. / hora.}$$

b) Para terminar la concentración de la lejía, y fundir la sosa, se consumen en los cristalizadores 985500 BTU por hora, aproximadamente. Si suponemos que el calor del combustible que se aprovecha es igual a 0.7, el consumo de petróleo por este concepto será:

$$\frac{985\ 500}{140.000 \times 0.7} = 10.05 \text{ Gal./hora.}$$

c) El consumo total de petróleo en la planta proyectada resulta ser de  $27.20 + 10.05 = 37.25$  Gal./hr.

### C.—BALANCE ECONOMICO.

El objeto del balance económico será, el deducir el costo de producción del proceso que se ha escogido. El costo de producción se divide, generalmente, en gastos fijos y gastos de operación.

En los gastos fijos deben incluirse el costo de las materias primas y la amortización del capital, intereses, impuestos, etc.

En los gastos de operación se incluyen el costo de la mano de obra, costo de la energía, y reparaciones.

El capital necesario para instalar la planta, se deduce a continuación, de acuerdo con los precios proporcionados por las diferentes casas ya mencionadas en el transcurso de este capítulo, y los porcentajes que usualmente se aplican para apreciar el costo de las instalaciones, etc.

#### COSTO DEL EQUIPO

1	Quebradora, tipo Swing Hammer, para moler una Ton/hr. . . . .	\$ 442.00
1	Mezclador, para el apagado de la Cal, de la Casa Patterson. . . . .	760.00
1	Evaporador de doble efecto, de la Casa Swenson, de 125 piés cuad. de sup. de calentamiento. . . . .	30,760.00

2	Cristalizadores, de la Casa Pfaudler, a \$2,100.00 c/u... ..	4,200.00
1	Filtro rotativo, de 50 piés cuad. de área filtrante, de la Casa Oliver... ..	10,400.00
1	Tanque para almacenamiento del licor diluído, de lámina de fierro, de $\frac{3}{8}$ "', de 2,400 Gal. . .	850.00
2	Tanques agitadores, para suspender el hidróxido de calcio y disolver el carbonato de sodio de 1,270 Gal., de la Casa Paterson, a \$2,150.00 c/u.	4,300.00
2	Tanques agitadores, para la caustificación, de 2,500 Gal., de la Casa Patterson, a \$3,800.00 c/u.	7,600.00
1	Sistema lavador, constituido por tres decantadores continuos, de 3.54 m. de diámetro y de 1.20 m. de altura, de la Casa Dorr... ..	20,685.00
1	Tanque para almacenamiento y calentamiento del agua que se requiere en el proceso, de 2,000 litros, con serpentín de calentamiento. . . . .	1,700.00
1	Tinaco para almacenamiento de agua, sobre torre de fierro de 10 m. de altura, de 5,000 litros.	610.00
1	Tinaco para almacenar agua de los servicios sanitarios de la planta, de 2,000 litros, de lámina galvanizada. . . . .	300.00
1	Caldera, de 100 caballos, de la Casa Baccok & Wilcox... ..	16,500.00
1	Bomba centrífuga, para el transporte del licor diluído de $\frac{1}{2}$ HP, de la Casa Worthington...	160.00
1	Bomba de diafragma, para el transporte de la suspensión del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , de 1 H.P. de la Casa Dorr... ..	230.00

1 Bomba de diafragma, para el vaciado de los caustificadores, de 2 HP., de la Casa Dorr...	390.00
1 Bomba centrífuga, para la alimentación de agua al condensador del equipo de evaporación, de 2 HP., y de 105 Gal./min., de la Casa Swenson.	240.00
1 Bomba centrífuga, para alimentar agua al tinaco de distribución general, de 10 Gal./min., de la Casa Worthington, de 2 HP...	190.00
1 Tanque para el almacenamiento de petróleo, de 30 m. <sup>3</sup> con excavación...	510.00
El costo de la tubería de vapor, de agua, de las leñas, conexiones, válvulas, llaves, etc., ha sido apreciado por la Casa Sommer, de México, en.	3,600.00
TOTAL... ..	\$ 104,427.00

Nota: en los costos anteriores se incluyen los accesorios y la instalación del equipo.

#### CAPITAL NECESARIO:

Edificio: Acondicionamiento de un local que tiene construídos oficinas y bodegas y un salón de 20 × 20 m., con una superficie total de 600 m. <sup>2</sup> ...	5,000.00
Gastos imprevistos...	10,000.00
Equipo...	104,427.00
CAPITAL TOTAL INVERTIDO... ..	\$ 119,427.00

GASTOS FIJOS POR AÑO:

Amortización del capital invertido:

En 20 años:

Acondicionamiento del local... ..	\$ 250.00
Tanques para el almacenamiento del licor diluido y agua... ..	173.00
Tanque para almacenamiento de petróleo...	25.50
Sistema lavador... ..	1,034.25
Caldera... ..	825.00
Gastos imprevistos... ..	500.00
	<hr/>
SUMA... ..	\$ 2,807.75

En 15 años:

Tanques agitadores... ..	\$ 793.33
--------------------------	-----------

En 10 años:

Cristalizadores... ..	420.00
-----------------------	--------

En 5 años:

Quebradora... ..	\$ 88.40
Mezcladora... ..	152.00
Evaporador... ..	6,152.00
Filtro... ..	2,080.00
Bombas... ..	242.00
Tubería... ..	720.00
	<hr/>
SUMA... ..	\$ 9,434.40

Amortización anual total.. ..	\$ 13,455.48
Intereses (6%)... ..	7,165.62
Seguros (0.75%)... ..	895.71
Reparación y mantenimiento (3%)... ..	3,582.81
Renta del Local (\$350.00 mensuales)... ..	4,200.00
	<hr/>

GASTOS FIJOS TOTALES, POR AÑO .. ..\$ 29,299.62

## GASTOS DE OPERACION:

### Materias Primas:

2,194,830 Kg. de carbonato de sodio de 95%, a razón de 7,316.1 Kg. diarios, a \$0.2204 el Kg. ....	\$ 483,740.53
1,551,360 Kg. de Cal de 75%, a razón de 5,171.2 Kg. diarios, a \$0.0197 Kg.....	30,561.79
213,696 KW. hr. a razón de 710.4 KW. hr. diarios, a \$0.035 KW. hr. ....	7,479.36
1,013,251.7 Lts. de petróleo crudo, a razón de 3,377.5 Lts. diarios a \$0.03145 el litro....	31,866.76
Embalaje, a razón de \$25.00 diarios....	7,500.00

### Salarios:

1 Director Técnico (\$500.00 mensuales)....	6,000.00
1 Químico (\$400.00 mensuales)... ..	4,800.00
3 Encargados (a \$220.00 mensuales c/u)....	7,920.00
2 Oficinistas (a \$180.00 mensuales c/u)....	4,320.00
3 Fogoneros (a \$120.00 mensuales c/u).....	4,320.00
6 Operarios (a \$100.00 mensuales c/u).....	7,200.00
6 Ayudantes (a \$80.00 mensuales c/u).....	5,760.00
3 Vigilantes (a \$150.00 mensuales c/u).....	5,400.00

GASTOS TOTALES DE OPERACION POR AÑO.\$ 606,868.44

### RESUMEN ECONOMICO DEL PROCESO:

Gastos Fijos... ..	\$ 29,299.62
Gastos de operación .....	606,868.44

COSTO ANUAL DE PRODUCCION...\$ 636,168.06

Como se van a producir 5,000 Kg. de Na(OH) 100%; la sosa cáustica de 95.5% producida en 300 días de trabajo será 1,573,830 Kg., la cual, vendida a razón de \$0.4158 el Kg. producirá ... ..\$ 654,398.51

UTILIDAD: \$ 18,230.45 anuales.

que corresponde a una utilidad de \$ 49.95 diarios.

## Conclusiones

Ya que la idea fundamental que animó desde un principio a este trabajo, era precisamente el determinar las posibilidades económicas de esta industria, es necesario ahora, someter los datos obtenidos en el balance anterior, a una cuidadosa crítica, analizando, primero, aquellos factores o condiciones que se opongan a su realización, y después, los que puedan reportar mejoría a la situación económica de la instalación

Las ganancias que arroja el balance para el capital total invertido y que equivalen al 15.26% anual, si es verdad que son pequeñas, quedan, sin embargo, en el límite de las utilidades que deben producir industrias similares, según Tyler, que considera como mínimo un interés anual del 15%; pero a pesar de ésto, no nos indican la posibilidad de instalar, en nuestro medio, una planta caustificadora, pues es preciso considerar que todo capital necesita un número determinado de seguridades, que garanticen su inversión, y de ésto que debe asegurársele un rédito que le permita estar a salvo de cualquier eventualidad, o cuando menos para que pueda resistir trastornos de consideración. El rédito de nuestra instalación, en las condiciones de balance, está muy lejos de poder satisfacer estas exigencias, que, por otra parte, considero bastante justificadas, dada la gravedad de los conflictos obreros, preocupación fundamental del inversionista actual de nuestro medio.

Si a lo expuesto agregamos el hecho de que en el balance no se han incluido gastos de propaganda y distribución del produc-

to, y que, como en la fabricación de él, obtenemos un subproducto, el  $\text{CaCO}_3$ , que constituye un problema, ya no técnico, sino económico, pues será necesario deshacerse de él, ya sea vendiéndolo, lo que implicaría tener que secarlo previamente, en cuyo caso sería necesario hacer un pequeño balance que nos determinara hasta qué punto resultaría costeable, o que se considere material de desecho, y entonces habrá que tirarlo en un sitio conveniente, lo que ocasionaría el gasto consiguiente de transporte; en nuestro caso supondremos la necesidad de tirarlo, lo que, ocasionando gastos, necesariamente menguaría las ganancias ya apuntadas.

De todo lo anterior tendremos que concluir, que de no haber otros factores que mejoren los resultados económicos asentados, una factoría de la capacidad calculada, no presenta posibilidades económicas de éxito en su instalación.

Afortunadamente, el presente trabajo ha sido desarrollado con datos poco conservadores y con un costo elevado por la importación de los materiales y materias primas, pues se supuso que todos los aparatos serían importados, así como el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , pues se fijó su precio de acuerdo con el precio de importación. Esto nos permite suponer, que si el equipo o cuando menos parte de él, se construyera en México, su costo se reduciría en una buena proporción, lo cual, no sólo haría disminuir el monto total del Capital necesario, sino que también disminuiría el costo de producción puesto que los gastos fijos disminuirían proporcionalmente al disminuirse la amortización, el interés del capital, los gastos de reparación y mantenimiento, etc., puesto que todos son un porcentaje del capital invertido.

Igualmente podemos asegurar, que si, como ya lo asentamos en el capítulo III, la fabricación se efectúa con el carbonato de sodio que actualmente se obtiene en Texcoco, que la utilidad se incrementaría si suponemos un precio menor para el carbonato, cosa que no me parece aventurada, sabiendo el costo mínimo de producción que tiene dicho carbonato. Para tener una idea clara del incremento de las ganancias por este concepto, baste decir que por cada centavo que disminuya, por kilo, el precio del carbonato, se obtendría en su adquisición una economía de \$4,837.40 anuales, que se traduciría en un aumento de \$13.25 diarios, en la utilidad de la planta.

Además, ya que la sosa cáustica importada es consumida, según datos de la Secretaría de la Economía Nacional, por las diferentes industrias que la consumen, en las proporciones que se detallan en la siguiente tabla:

DISTRIBUCION POR INDUSTRIAS:

Jabonería...	84.7%
Aceites minerales lubricantes...	13.4%
Productos químicos...	1.4%
Manteca artificial...	0.4%
Hidrógeno y Oxígeno...	0.2%
Espejos...	0.1%
Curtiduría...	0.1%

En esta tabla se ve que la industria jabonera es la que la consume en muy alta proporción, lo que abre un nuevo horizonte para el porvenir económico de nuestra industria, pues es sabido que aquella la utiliza en soluciones diluídas correspondientes al 35 ó 40%, lo que nos hace pensar en la posibilidad de vender soluciones cáusticas, en lugar de sosa cristalizada; pues ya hemos podido ver, en el balance económico, que el paso más costoso, en el ciclo de transformación, es sin duda, el concentrado de las soluciones diluídas obtenidas en el caustificador, concentración que comprende dos etapas: la efectuada en los evaporadores y la cristalización, esta última a fuego directo en los cristalizadores; en la primera etapa se obtienen soluciones al 35%, concentración que está precisamente dentro de los límites de las soluciones usadas en jabonería.

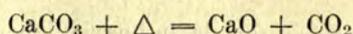
Por lo anterior se comprenderá fácilmente que, dando por terminado el proceso en esa primera concentración, se lograría una disminución en el precio de producción, disminución que se traduciría en un aumento en las utilidades; las condiciones económicas de la instalación, en este caso, se expresan en el siguiente resumen económico:

Capital invertido...	\$ 115,227.00
Gastos fijos...	28,470.11
Gastos de operación...	598,297.66
	<hr/>
COSTO DE PRODUCCION...	\$ 626,767.77
GANANCIA ANUAL...	\$ 27,630.74

que corresponde a una utilidad de \$76.75 diarios, y un interés al capital invertido de 23.97% anual.

De esto podemos deducir que, dada la corta producción de nuestro proyecto, quedaría en las mejores condiciones si se instalara en el seno de una industria jabonera que tuviera capacidad para consumir toda su producción, pues además de las economías apuntadas, no tendría que considerar los gastos de propaganda y distribución.

Por otra parte, cabe todavía la posibilidad de regenerar el CaO, por disociación térmica del CaCO<sub>3</sub> obtenido en el proceso, mediante la siguiente reacción:



Este caso debe ser objeto de un estudio muy cuidadoso, pues, fácilmente se comprenderá, que de ser costeable, beneficiaría notablemente la economía del proceso.

Por último, si se duplicara o triplicara la capacidad de la planta, el monto del capital total necesario para la instalación, sufriría un aumento que en ninguna forma correspondería al doble o al triple del capital calculado en nuestro proyecto, obteniéndose, en cambio, un ingreso bruto por concepto de venta del producto, que correspondería al doble o al triple de los ingresos obtenidos con la capacidad primitiva. Esto es posible, dada la pequeña capacidad de la planta proyectada, que permite no sólo duplicar o triplicar la producción, sino aumentarla las veces que fuere necesario, para lograr satisfacer totalmente la demanda de sosa en nuestro país; pero no debemos olvidar que esta pequeña capacidad fué fijada con la mira de utilizar materias primas nacionales, por lo que no se podrá pensar en aumentarla, mientras no se incremente la producción nacional de carbonato de sodio.

Finalmente, es incuestionable que el desarrollo de toda nueva industria favorece la economía del país, fomenta la aplicación de trabajadores y pone en alto el crédito y el adelanto de la nación, capaz de bastarse a sí misma, sin recurrir a elementos extraños, que muchas veces entorpecen su adelanto y la exponen a las exigencias del exterior.

Por todo lo expuesto, mi criterio personal es que la instalación de una fábrica de sosa cáustica, con la amplitud necesaria para cubrir las necesidades del país, con el aprovechamiento de las materias primas nacionales, con las debidas garantías del Gobierno Federal y una cuidadosa administración del negocio por personas bien preparadas y conocedoras del mismo, establecería una industria nueva y exclusivamente nacional, con un rendimiento muy razonable, para los que aportaran su capital y entusiasmo al progreso y desarrollo industrial de México.

—oOo—

1870  
The first of these is the  
fact that the population  
of the country has  
increased rapidly since  
the year 1850. This  
is due to the fact that  
the country has been  
settled by a large  
number of immigrants  
from Europe and  
America. The  
immigrants have  
brought with them  
the arts and  
sciences of their  
respective countries  
and have thus  
enriched the  
country in every  
way. The result  
has been a  
rapid increase  
in the number  
of the population  
and a corresponding  
increase in the  
wealth of the  
country.

The second of these is the  
fact that the country  
has been settled by  
a large number of  
immigrants from  
Europe and America.  
The immigrants  
have brought with  
them the arts and  
sciences of their  
respective countries  
and have thus  
enriched the  
country in every  
way. The result  
has been a  
rapid increase  
in the number  
of the population  
and a corresponding  
increase in the  
wealth of the  
country.

The third of these is the  
fact that the country  
has been settled by  
a large number of  
immigrants from  
Europe and America.  
The immigrants  
have brought with  
them the arts and  
sciences of their  
respective countries  
and have thus  
enriched the  
country in every  
way. The result  
has been a  
rapid increase  
in the number  
of the population  
and a corresponding  
increase in the  
wealth of the  
country.

## BIBLIOGRAFIA.

- THEORETICAL CHEMISTRY. Walter Nernst, Ph.D.
- OUTLINES OF THEORETICAL CHEMISTRY. Frederick H. Getman, Ph.D.
- CHEMICAL ENGINEERING ECONOMICS. Chaplin Tyler.
- PRINCIPLES OF CHEMICAL ENGINEERING. Walker, Lewis, McAdams and Gilliland.
- QUIMICA INORGANICA. Dr. Federico Ephraim.
- QUIMICA GENERAL. H. Molinari.
- CHEMICAL PROCESS OF SODA. T. P. Hou.
- CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK. Jhon H. Perry.
- ELEMENTS OF CHEMICAL ENGINEERING. Badger and McCabe.

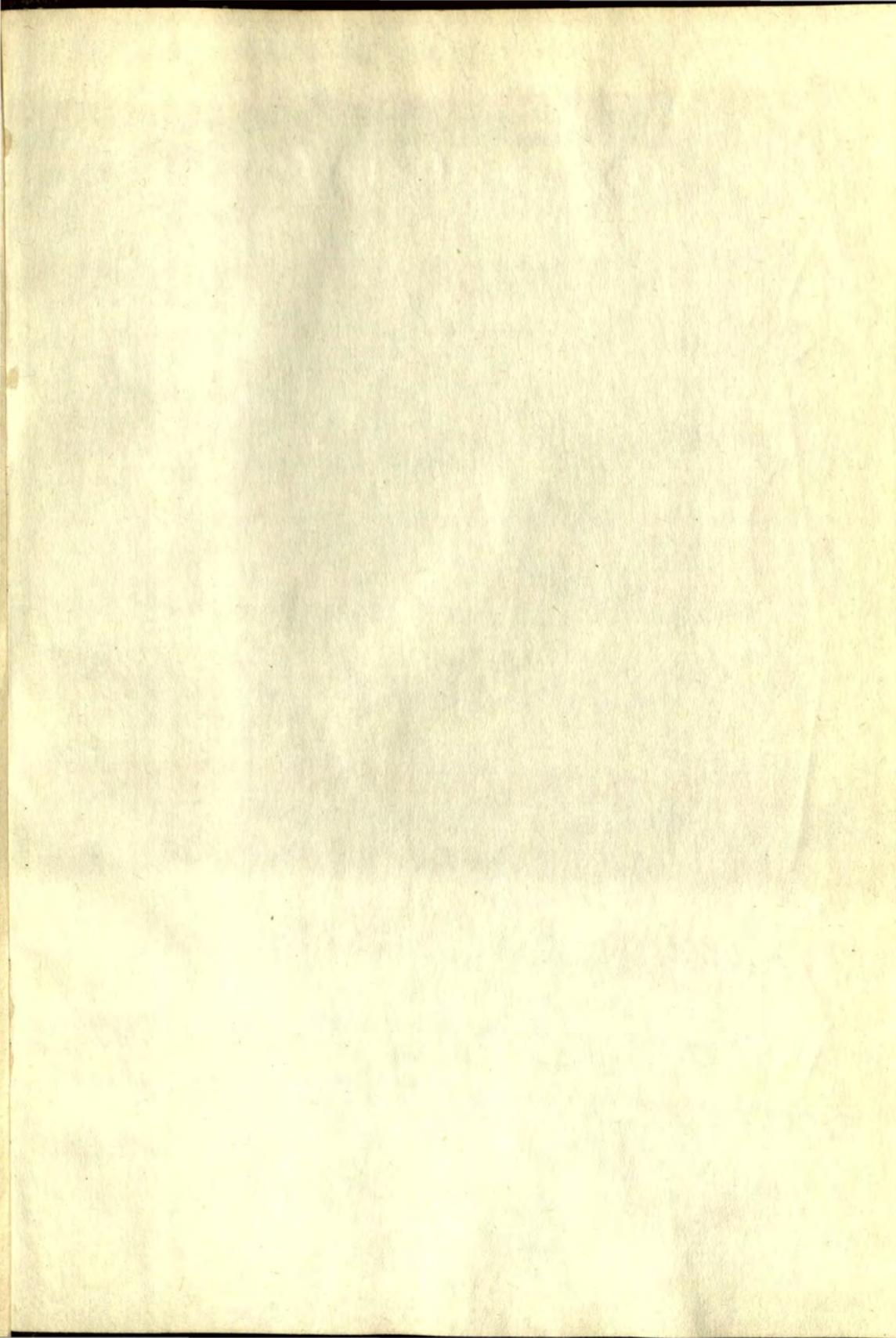
### Revistas :

- Chemical & Metallurgical Engineering. (Diversos números).  
Industrial & Engineering Chemistry.  
The Industrial Chemist.

BIBLIOGRAPHY

- THEORETICAL CHEMISTRY, WELLS, 1900, 1911  
ELEMENTS OF THEORETICAL CHEMISTRY, WELLS, 1900, 1911  
THEORETICAL ENGINEERING, WELLS, 1900, 1911  
PRINCIPLES OF THEORETICAL ENGINEERING, WELLS, 1900, 1911  
THEORETICAL CHEMISTRY, DE FORTUNA, 1900, 1911

THEORETICAL CHEMISTRY, DE FORTUNA, 1900, 1911  
THEORETICAL CHEMISTRY, DE FORTUNA, 1900, 1911  
THEORETICAL CHEMISTRY, DE FORTUNA, 1900, 1911  
THEORETICAL CHEMISTRY, DE FORTUNA, 1900, 1911



## FECHA DE DEVOLUCION

El lector se obliga a devolver este libro antes del vencimiento de préstamo señalado por el último sello.





