

Universidad Autónoma de Guadalajara

Incorporada a la Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias Químicas

*La Obtención del Acido
Sulfúrico a partir de Gases
desprendidos en Procesos
Metalúrgicos*

F e s i s



QUIMICA

Presentada por

Armando Hopkins Durazo

para obtener el título de Ingeniero Químico.

Guadalajara, Jal. Mayo de 1945.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mis queridos padres,
como un humilde homenaje
a la magnificencia de su ejemplo.*

*A todas aquéllas personas que en el curso
de mi carrera, me brindaron desinteresada-
mente, su cariño, enseñanzas, amistad
y compañerismo.*

Sumario.

- I.—Preámbulo.
- II.—Convertidores de Cobre.
- III.—Cálculo Estequiométrico.
- IV.—Elección de proceso.
- V.—Polvo Suspendido en el Gas.
- VI.—Determinación de la temperatura del gas al entrar al proceso de nitración.
- VII.—Teoría y Práctica del Proceso de Nitración.
- VIII.—Diseño de Equipo.
- IX.—Equipo Auxiliar.
- X.—Balance de Material.
- XI.—Balance de Calor.
Bibliografía.

Preámbulo

En la población de Cananea, situada al norte del Estado de Sonora, trabaja una gran planta de beneficio del mineral de cobre que existe en esa región. Habiendo tenido oportunidad de hacer en esa compañía la práctica reglamentaria para presentar examen profesional; nació en mí la idea de este trabajo, viendo la gran cantidad de anhídrido sulfuroso desperdiciado diariamente y los beneficios que acarrearía a la industria del país, especialmente a la del occidente, una planta de ácido sulfúrico que aprovechara dicho gas.

En este trabajo se discute el aspecto teórico del proceso, hubiera sido mi intención verlo también desde el punto de vista económico, pero debido a las condiciones anormales que actualmente privan en el comercio mundial, tropecé con sumas dificultades a fin de presentar un estudio económico que se apegara a la verdad en tiempos de paz, pues soy de opinión que el proyecto de un trabajo de la importancia del que me ocupa deberá estar cimentado sobre bases más sólidas que las que ofrecen, en ocasiones fantásticamente costeables, las condiciones anormales motivadas por la guerra que actualmente empobrece a la Humanidad.

Es este el estudio que con la anuencia del Sr. Director de la Facultad, Ing. Dn. Alberto Lancaster Jones, y después de haber sido revisado por él, presento como tesis.

Todos los resultados son meramente teóricos y producto

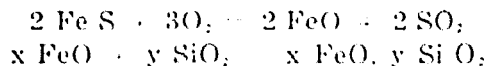
de los conocimientos adquiridos en mi carrera, de llevarse a la práctica estarían sujetos a rectificaciones inevitables ordenadas por la aplicación de conocimientos solo adquiridos en el terreno práctico.

En los diferentes cálculos que desarrollo, uso indistintamente unidades inglesas y del sistema métrico, considerando la práctica que en ambas debe tener el Ingeniero Químico.



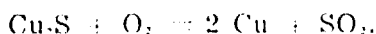
Convertidores de Cobre.

El objeto de los Convertidores en una fundición de cobre es el quitar al mate todo el fierro y el azufre y dejar únicamente el cobre. El mate es la masa fundida que viene de los hornos reverberos y que contiene principalmente SCu_2 y SFe . La operación de un convertidor de cobre consta de dos estaciones o períodos. El primero es la formación de la "grasa" o "escoria" y consiste en la oxidación del SFe a FeO , combinándose éste con sílica añadida como flujo:



Al fin de esta primera estación la escoria es sacada por decantación, permaneciendo en el fondo el Cu_2S , llamado metal blanco. La escoria se vuelve después al reverbero y se trata de nuevo para quitarle el cobre que aún lleva en un 3% aproximadamente.

La segunda estación es la obtención del cobre puro:



Después que la primera carga de mate ha sido convertida a metal blanco y la escoria vaciada, se vuelve a llenar el convertidor con otra carga de mate, repitiéndose esta operación por 3 o 4 veces o más, según la capacidad del convertidor

lo permita. Todo el proceso se guía por el color de la llama. El aire que da el oxígeno necesario es introducido a la masa fundida por unos orificios situados en la parte inferior del convertidor llamados "toberas", mientras no es introducido aire estos agujeros se mantienen cerrados por medio de válvulas especiales. El calor de las reacciones es suficiente para mantener los materiales fundidos sin necesidad de combustible.

Hay varias clases de convertidores siendo los principales el Pierce Smith que es cilíndrico y trabaja en posición horizontal, y el Great Falls que es el usado en la planta que me ocupa. Tiene forma cilíndrica terminando en cono en su parte superior y trabaja en posición vertical. Gira sobre su eje a fin de descargar la escoria o el cobre. Se le carga el mate y la sílica por medio de recipientes llamadas "ollas", manejadas por una grúa.

Los convertidores son de fierro pero se encuentran forrados interiormente con una capa bastante gruesa de material aislante y refractario. La temperatura de la masa fundida es aproximadamente de 1,300° C y la de los gases, al salir, de 1,100° C.



Cálculo Estequiométrico.

Durante el mes de Diciembre de 1944 entró a los convertidores procedente del reverbero: 2'068,416 kgms. de azufre y salió en la escoria de los convertidores 136,987 kgms. y en el polvo 8,164 kgms. Por lo tanto el azufre saliendo por el conducto de los gases en forma de SO₂ será 1'923,265 kgms. Esta cantidad será la que tomaré como base para todos los cálculos pues se aproxima a un promedio.

$$\text{Cantidad de SO}_2 \text{ producido: } \frac{1'923,265 \times 64}{32} = 3'846,530 \text{ kgs.}$$

Oxígeno necesario para formar este SO₂: 1'923,265 kgms.

Nitrógeno: $1'923,265 \times 76.8/23.2 = 6'366,007$ kgms.

Además de esta cantidad de gases que salen de los convertidores voy a suponer que van 1,000 toneladas de aire en exceso mensualmente. Y por tanto la cantidad total de gases saliendo mensualmente será:

| | | | | |
|-------------------|---------------------|---|-----------|-------|
| N ₂ : | 6'366,007 + 768,000 | = | 7'134,007 | 63.5% |
| O ₂ : | 232,000 | = | 232,000 | 2.1% |
| SO ₂ : | 3'846,530 | = | 3'846,530 | 34.4% |

$$11'212,537 \text{ kgms.}$$

El gas sulfuroso tendrá que llevar también el oxígeno ne-

cesario para oxidar el SO₂ a SO₃, más un 7% en exceso, pero el aire que suministre este oxígeno será introducido después de salir de los convertidores. El O₂ necesario para esta oxidación

$$\text{es: } \frac{3'846.530 \times 16}{64} = 961.632 \text{ kgms., más el 7\% dá un total}$$

de: 1'028,946 kgms. El N₂ que viene con este O₂ es: 3'405,811 kgms. Como en el gas de los convertidores ya viene un exceso, el O₂ suministrado en el conducto será: 1'028,946 — 232,000 = 796,946 y el N₂: 3'405,811 — 768,000 = 2'637,811 kgms.

Por lo tanto la composición final de la mezcla gaseosa antes de entrar en la torre de Glover sera:

| | | | | | | |
|-------------------|-----------|---|-----------|---|------------|--------------|
| N ₂ : | 7'134,007 | + | 2'637,811 | = | 9'771,818 | kgms. 66.71% |
| O ₂ : | 232,000 | + | 796,946 | = | 1'028,946 | .. 7.03% |
| SO ₂ : | | | | = | 3'846,530 | .. 26.26% |
| | | | | | 14'647,294 | .. 100.00 |

Porcentaje en volumen a condiciones normales:

| | | | | |
|-------|--|--------|------|------------------------|
| 66.71 | | = 2.38 | | 79.07% N ₂ |
| 28 | | | | |
| 7.03 | | = 0.22 | | 7.31% O ₂ |
| 32 | | | | |
| 26.26 | | = 0.41 | | 13.62% SO ₂ |
| 64 | | | | |
| | | | 3.01 | |

Peso molecular promedio:

| | | | | |
|-------------|---|--------|---|-------|
| 28 | × | 0.6671 | = | 18.67 |
| 32 | × | 0.0703 | = | 2.24 |
| 64 | × | 0.2626 | = | 16.80 |
| P.M. Prom.: | | | | 37.71 |

Volumen mensual de gas:

14'647,294 × 22.41

= 8'700,492 metros cúbicos.

37.71

Producción de Acido:

El contenido de azufre en el ácido hecho en un período de tiempo dado dividido por el azufre quemado en tal período da el porcentaje de producción de la planta. Las eficiencias más altas se obtienen en plantas que queman azufre, llegándose hasta un 98.5%. Las plantas que operan con gases de procesos metalúrgicos, sufren inevitablemente pérdidas de azufre debido a la necesidad de lavar frecuentemente los tanques, enfriadores, torres, tubería, etc., para quitar el sedimento que se deposita. En estas plantas se considera buena práctica utilizar el 96% del azufre que entra en el proceso y algunas hay que trabajan a un 95%. Teóricamente 1 kgmo. de azufre puede producir 3.94 kilogramos de ácido sulfúrico de 60°Be., y en el caso de una planta que utiliza únicamente el 95% del azufre quemado esta producción viene a ser de 3.74 kgmos. de ácido por kgmo. de azufre quemado. Por lo tanto la producción mensual de ácido en esta planta será:

Azufre quemado: 1'923,265 kgms.

Acido producido (× 3.74): 7'193,011 kgms.

con 5'586,812 kgms. de H₂SO₄ y 1'606,199 kgms. de H₂O.

Elección de Proceso.

El ácido sulfúrico es manufacturado comercialmente por dos clases de procesos, el de nitración y el de contacto. En el proceso de nitración el anhídrido sulfuroso en presencia de agua es oxidado por ácido nítrico u óxidos de nitrógeno y oxígeno. Siendo los productos finales óxidos de nitrógeno y ácido sulfúrico. En el proceso de contacto el SO_2 es oxidado a SO_3 , por medio de un catalizador. La oxidación se hace a altas temperaturas y el SO_3 , resultante, después de enfriado es absorbido en ácido sulfúrico hasta tener un ácido de 100% o ácido monohidratado, así llamado debido a que contiene una molécula simple de agua por cada molécula de SO_3 presente. Este proceso requiere para su buen funcionamiento un gas completamente libre de partículas en suspensión. El gas desprendido en procesos metalúrgicos tiene una cantidad bastante considerable de polvo que hace inabordable el método de contacto, ya que el equipo necesario para quitar completamente el polvo, ocuparía una gran parte de la planta y su costo sería la principal inversión.

Como en el caso que me ocupa el ácido sulfúrico se obtendría como subproducto, el principal factor que tendrá que tenerse en cuenta al construir la planta será el económico, ya que la producción estaría completamente supeditada a la producción de cobre y ninguna medida puede ser tomada exclusivamente para mejorar la calidad o la producción del ácido, y sí, por el contrario, medidas que se tomen para mejorar

el proceso del cobre pueden perjudicar notablemente la planta de ácido. Por lo tanto una inversión grande en esta planta se podría traducir en un momento dado en serias pérdidas.

En el proceso de nitración no se hace necesaria la purificación absoluta del gas puesto que el polvo no estorba notablemente el buen funcionamiento del proceso y si no se descuida completamente este capítulo es, teniendo en cuenta la pureza del producto resultante. De cualquier manera el equipo necesario para la limpieza del gas es relativamente de muy escasa importancia. Este hecho ha sido el que he tomado como definitivo al escoger el proceso a seguir en este estudio.

El método más viejo y más importante en el proceso de nitración es el método de las cámaras de plomo también llamado "proceso de las cámaras".

En algunas plantas de ácido sulfúrico donde usan el gas desprendido en procesos metalúrgicos, utilizan tanto el gas de los convertidores como el del horno. En mi caso usaré únicamente el desprendido en los convertidores debido a las razones que enseguida enumero.

1o.—El material que entra al horno consiste principalmente de SCu_2 y S_2Fe , en el mate sale el SCu_2 , y el fierro en forma de SFe , de tal modo que en el gas sale únicamente una mol de azufre por cada mol de S_2Fe . Esto viene siendo una pérdida del azufre total entrando en el mineral no mayor de un 25%. Este anhídrido sulfuroso va acompañado de todos los productos de combustión del horno, y de la totalidad de las impurezas de materias volátiles en el mineral, tales como arsénico y antimonio. En tal forma que el incremento a la producción de ácido por la utilización de ese 25% de azufre, se compensa con el mayor gasto invertido en el equipo para la limpieza del gas aparte de que el volumen de la planta tendría que ser crecida debido a que el volumen de los productos de combustión que acompañan al SO_2 es bastante grande.



2o.—Una de las razones por las que ciertas plantas utilizan los gases tanto del horno como del convertidor, estriba en que la producción de los convertidores es intermitente y si hay un solo convertidor tiene que combinarse con los gases producidos en el horno para tener una producción continua de SO_2 . En esta compañía son 5 los convertidores y por lo tanto el trabajo de ellos puede combinarse en tal forma de tener ya no una producción continua de gas sino también constante.

3o:—Debido al poco o ningún exceso de oxígeno en el horno, mucho del azufre desprendido no se oxida sino que sale en forma de vapor y se necesitaría una cámara de combustión para formar el SO_2 originándose con ello otro gasto superfluo.

Polvo Suspendido en el Gas.

El polvo suspendido en el gas no únicamente contamina el producto, bajando su calidad sino que se asienta como un lodo semifluido en las torres, tanques, tubos, etc., obstruyendo el equipo y ocasionando pérdidas ya que frecuentemente se tiene que estar haciendo la limpieza. Es por lo tanto de importancia el quitar tanto polvo como sea posible del gas, antes de que éste llegue a la primera torre. Y a fin de evitar su acumulación en los conductos y evitar también la gran longitud de ellos se recurre a la cámara de polvo o cualquier otro método (ciclones, cotrell, etc.).

Uno de los métodos para quitar el polvo de un gas es el de reducir la velocidad de la corriente. A fin de reducir suficientemente esta velocidad la cámara tendrá que ser bastante grande, ocasionando esto una mayor inversión y mucha mayor pérdida de calor por radiación a través de las paredes de gran estructura. De aquí que cualquier esfuerzo que se haga para reducir el tamaño de la cámara, introduciendo en ella otros métodos de asentamiento redundará en beneficios, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Uno de esos métodos consiste en interponer a la corriente del gas un medio filtrante, que bien pueden ser mallas de alambre, costales de yute, (si la temperatura lo permite), y alambres o barras suspendidos verticalmente.

En este caso me evitaré la construcción de una cámara de polvo utilizando como tal uno de los conductos que ya existen.

Existen dos conductos, el primero de los cuales se encuentra arriba de los convertidores y a él son introducidos por cinco diferentes bocas los gases desprendidos en cada uno de ellos. Es de forma oval con las medidas que indica la figura, tiene quince tolvas repartidas simétricamente para sacar el polvo acumulado en el fondo. Este lleva el gas a otro conducto más grande que el anterior (figura 2). Los dos son de lámina de fierro. Para poder utilizarlos tendrán que forrarse con ladrillo refractario, para prevenir la caída de temperatura y el ataque del fierro por los gases calientes. El segundo de los conductores es el que, dado su gran tamaño, podrá ser utilizado como cámara. El tiene 16 tolvas repartidas en dos hileras de 8. Interpondré al paso de la corriente 7 cortinas de alambre. Este será de una aleación de cromo y fierro para evitar su ataque, será de 1 8 de pulgada de diámetro y estarán separados $\frac{1}{4}$ de pulgada. No tengo ninguna base para suponer que este método dará un resultado satisfactorio, pues la cantidad de polvo que se asentará sólo puede ser determinada prácticamente.

Determinación de la temperatura del Gas al entrar al Proceso de Nitración.

Cálculo de la caída de temperatura debida a la entrada del aire frío:

El contenido de calor del gas al salir de los convertidores es:

| | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----|--------|------------|
| Cantidad de gases por hora: | N ₂ | ... | 11,432 | kgms. |
| | O ₂ | ... | 372 | " |
| | SO ₂ | ... | 6,164 | " |
| | | | 17,968 | " |
| Calor específico del | N ₂ a 1,100° C | ... | .281 | Cal. kgmo. |
| " | O ₂ " " | ... | .244 | " |
| " | SO ₂ " " | ... | .173 | " |
| " | promedio a " " | ... | .243 | " |

$$q = 17,968 \times .243 (1,100 - 15.6) = 4,824,400 \text{ Cal.}$$

La cantidad de aire suministrada por hora a la temperatura de 15.6° C. es 5,504 kgms. Voy a suponer que la temperatura final de la mezcla será de 700° C. En esta forma la cantidad de calor necesaria para elevar a esa temperatura los 5,504 kgms. será, aplicando la fórmula anterior $q = w c t$ siendo el calor específico del aire entre 0 y 700° C. de .245:

$$q = 5,504 \times .245 (700 - 15.6) = 929,168 \text{ Cal.}$$

Entonces el calor de la mezcla sera: $4'824,400 - 929,168 = 3'895,232$ Cal. Y la temperatura final será: $3'895,232 = (17,968 + 5,504) .24 (x - 15.6)$, despejando y verificando tenemos, $x = 707^\circ \text{ C.}$, de donde se ve que la temperatura supuesta estuvo bien tomada.

Cálculo de la caída de temperatura a través del conducto:

Para hacer este cálculo supondré la temperatura media exterior de las paredes de 180° C. (356° F.) y la del interior la tomaré para todo el conducto a 700° C. ($1,292^\circ \text{ F.}$) que es aproximadamente la temperatura de los gases. Esta puede suponerse que no varía puesto que a lo largo de todo el conducto están repartidas las cinco entradas de gases de los convertidores. Respecto a la temperatura supuesta para la parte del exterior, podré saber si está errada haciendo con esos datos el cálculo del calor perdido por conducción que tendrá que ser igual al perdido por radiación más el perdido por convección. Si la suma de estos dos es mayor que el primero, querrá decir que la temperatura supuesta es alta, por lo tanto, siguiendo el método de prueba y error haré un nuevo cálculo con una temperatura menor, hasta obtener una en la cual el calor perdido por conducción sea igual a la suma del perdido por radiación y convección. Los datos con que cuento son:

Area total, $A = 4,960$ piés cuadrados

Ancho de la pared, $L = 0,75$ piés

Coefficiente de conductividad del ladrillo refractario a $1,292^\circ \text{ F.}$

$= .60 \text{ B. T. U. hr. pié}^2 \text{ }^\circ\text{F/ pié.}$

Coefficiente de convección: $h = .3 (2, -t,)^{.75} \text{ B. T. U. hr. pié}^2 \text{ }^\circ\text{F dif.}$

Coefficiente de emicividad para la lámina de hierro encogrida:

$$E = .94 \text{ B.T.U. hr. pié}^2$$

$$q = 5,504 \times .245 (700 - 15.6) = 929,168 \text{ Cal.}$$

Entonces el calor de la mezcla sera: $4\,824,400 - 929,168 = 3,895,232 \text{ Cal.}$ Y la temperatura final será: $3,895,232 = (17,968 + 5,504) .24 (\times - 15.6)$, despejando y verificando tenemos, $x = 707^\circ \text{ C.}$, de donde se ve que la temperatura supuesta estuvo bien tomada.

Cálculo de la caída de temperatura a través del conducto:

Para hacer este cálculo supondré la temperatura media exterior de las paredes de 180° C. (356° F.) y la del interior la tomaré para todo el conducto a 700° C. ($1,292^\circ \text{ F.}$) que es aproximadamente la temperatura de los gases. Esta puede suponerse que no varía puesto que a lo largo de todo el conducto están repartidas las cinco entradas de gases de los convertidores. Respecto a la temperatura supuesta para la parte del exterior, podré saber si está errada haciendo con esos datos el cálculo del calor perdido por conducción que tendrá que ser igual al perdido por radiación más el perdido por convección. Si la suma de estos dos es mayor que el primero, querrá decir que la temperatura supuesta es alta, por lo tanto, siguiendo el método de prueba y error haré un nuevo cálculo con una temperatura menor, hasta obtener una en la cual el calor perdido por conducción sea igual a la suma del perdido por radiación y convección. Los datos con que cuento son:

Area total, $A = 4,960$ piés cuadrados

Ancho de la pared, $L = 0.75$ piés

Coefficiente de conductividad del ladrillo refractario a $1,292^\circ \text{ F.}$

$= .60 \text{ B. T. U. hr. pié}^2 \text{ }^\circ\text{F/ pié.}$

Coefficiente de convección: $h = .3 (2, - t_1)^{.75} \text{ B. T. U. hr. pié}^2 \text{ }^\circ\text{F dif.}$

Coefficiente de emicividad para la lámina de fierro ennegrecida:

$E = .94 \text{ B.T.U. hr. pié}^2$

temperatura interior, t_i : 1,292° F
 „ del aire, t_1 : 60° F
 „ exterior, t_2 : 356° F
 „ de referencia : 60° F

El coeficiente de convección que tomo es para paredes verticales, las del conducto son de forma cilíndrica, pero tomaré ese en vista de no haber encontrado para este caso en ninguna publicación.

Calor perdido por conducción:

Usaré las fórmulas elementales para la conducción de calor:

$$R = \frac{L}{K A} \quad \text{y} \quad t = q R$$

Para el ladrillo:

$$R = \frac{.75}{.6 \times 4,960} = .000252$$

La resistencia de la lámina de fierro comparada con la anterior es despreciable. $1,292 - 356 = q \times .000252$, $q = 3,714,286$ B.T.U. hora.

Calor perdido por convección:

fórmula: $q = A \times h (t_1 - t_2)$, h a las temperaturas supuestas es 1.24 substituyendo, $q = 4,960 \times 1.24 (356 - 60) = 1,820,000$ B.T.U. hora.

Calor perdido por radiación:

fórmula de Stefan-Boltzman:

$$q = .173 \times A \times E \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \quad \text{B.T.U./hr.}$$

substituyendo y verificando:

$$q = 2,936,480 \text{ B.T.U. por hora.}$$

Radiación mas convección:

$$4,756,480 \text{ B.T.U. hr.}$$

Como se vé es mayor que el calor pasando por conducción a través de las paredes, por lo tanto la temperatura exterior tendrá que ser disminuida. Después de probar con varias temperaturas encontré que la correcta fué 320° F., y a esa temperatura tanto el calor perdido por conducción como por convección y radiación es: 3 890,905 B.T.U. ó 982.776 Cal. hr.

Este calor tiene que ser restado al contenido de calor del gas al entrar al conducto. Por lo tanto el contenido de calor del gas al salir del conducto será: 3 895,232 — 982.776 = 2'912,456 Cal.

Y la temperatura al salir del conducto es:

$$2'912,456 = 23,472 \times .236 (X - 15.6)$$

de donde X = 578° C. (1,072° F.)

Caída de temperatura en la Cámara de polvo:

Para hacer el cálculo de la caída de temperatura a través de la cámara de polvo, la dividiré a ésta en cuatro secciones iguales, determinando en cada una de ellas la temperatura de salida del gas y su contenido de calor como lo hice en el conducto. En esta forma se hace el cálculo más exacto puesto que tanto la temperatura interior como la exterior de la pared se van haciendo cada vez menor a medida que avanza el gas y tomando una temperatura igual se puede caer en un error bastante grande. El ladrillo que usaré aquí no tendrá que ser resistente a altas temperaturas y tendrá una conductividad de .15, siendo de las mismas medidas que el usado en el conducto. Procederé exactamente igual que en el caso anterior. Suponiendo primero una temperatura exterior de la pared de 165° F. Entre 100 y 200° C. el coeficiente de emisividad de la lámina ennegrecida es .85.

Calor perdido por conducción:

$$R = \frac{.75}{.15 \times 2,095.5} = .002385, \quad 1,072 - 165 = q \times .002385$$

de donde $q = 380,293$ B.T.U.

Calor perdido por convección:

h a la temperatura supuesta es .96

$$q = 2095.5 \times .96 (165 - 60) = 211,226 \text{ B.T.U.}$$

Calor perdido por radiación:

$$q = .173 \times 2,095.5 \times .85 (6.25)^4 - (5.2)^4 = 244,860 \text{ B.T.U.}$$

Radiación más convección: 456.086 B.T.U.

Después de algunas pruebas obtuve la temperatura de 149° F. como la correcta.

Siendo el calor perdido 377,150 B.T.U. ó 95,042 Cal.

Cálculo de la caída de temperatura:

Contenido de calor del gas al entrar: 2'912,456 —

Calor perdido: 95,042

Contenido de calor del gas al salir: 2'817,414 Cal.

Tomando una temperatura de 550° C., tengo un calor específico promedio de .218 Cal. kgmo. Procediendo como en el caso anterior obtengo una temperatura del gas al salir de 565° C. (1,049° F.).

Para la segunda sección procediendo en la misma forma encontré una temperatura exterior de la pared de 144° F., siendo el calor perdido: 379,455 B.T.U.

Contenido de calor al salir de la 2a. Sección: 2'721,791 Cal.

Temperatura del gas al salir de la 2a. Sección: 560° C.

3a.—SECCION:

Temperatura exterior de la pared: 143° F.

Calor perdido: 376,100 B.T.U. ó 94,777 Cal.

Contenido de calor: 2'627,014 Cal.

Temperatura al salir: 548 °C. (1,018°F)

4a.—SECCION:

Temperatura exterior de la pared: 141 °F.

Calor perdido: 367,714 B.T.U.

Contenido de calor: 2'534,350 Cal. Y la temperatura final o sea a la que entran los gases a la torre de Glover: 531° C. ó 988° F.

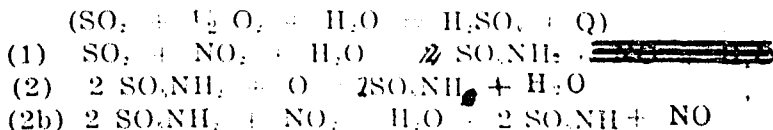
Teoría de la Nitración.

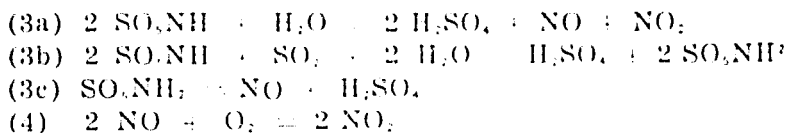
En el proceso de nitración, el SO_2 en presencia de agua es oxidado por ácido nítrico ú óxidos de nitrógeno y oxígeno siendo los productos finales de las reacciones óxidos de nitrógeno y ácido sulfúrico.

El estudio químico del proceso es bastante complicado. Varias teorías han sido propuestas y de todas ellas las más generalmente aceptadas son las de George Lunge publicada en 1885 y la de Lunge y Berl publicada veinte año más tarde.

La primera establece que el SO_2 , HNO_3 ú óxido de nitrógeno, oxígeno y agua, reaccionan primero para formar un producto intermedio llamado ácido nitrosilsulfúrico ó sulfato ácido de nitrosilo cuya fórmula es: SO_2NH ó $\text{SO}_2\text{-OH-ONO}$ ó $\text{SO}_2\text{H-NO}$, y este compuesto reacciona con agua para formar ácido sulfúrico y óxidos de nitrógeno.

La segunda teoría que es una modificación de la primera, acepta la formación de un producto intermedio entre el anhídrido sulfuroso y el ácido nitro sil-sulfúrico, siendo este un compuesto azul llamado ácido sulfonitrónico, de fórmula SO_2NH_2 . Las reacciones que tienen lugar en el proceso según ésta teoría, son representadas como sigue:

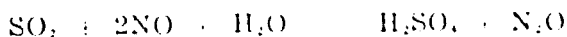




Las reacciones (2a) y (2b) se llevarán a cabo una u otra según la prevalencia de oxígeno o de peróxido de nitrógeno (NO_2). Así como las reacciones (3a) y (3b) pueden ocurrir una u otra según la cantidad de agua que haya disponible. La (3a) tiene como uno de sus productos NO , el cual puede combinarse con SO_2 y H_2O como en la reacción (1) para continuar la serie de reacciones, (1), (2a.) y (3a.) en un número infinito de ciclos. En las reacciones (2b), (3a) y (3c) se forma óxido nítrico (NO) que en contacto con un exceso de oxígeno que bajo condiciones normales siempre existe en la mezcla de gases, se oxida a peróxido que de nuevo entra en la reacción (1) para empezar un nuevo ciclo.

La substancia primeramente llamada ácido sulfonitrónico es ahora conocida como "ácido violeta" y su fórmula es preferiblemente escrita $(\text{H}_2\text{SO}_4) \text{NO}$. Este compuesto y el ácido nitrosilsulfúrico, constituyen el eje sobre el cual el proceso de las cámaras de plomo se desenvuelve.

En las anteriores reacciones los óxidos de nitrógeno han sido limitados a los óxidos superiores, (NO , NO_2 y la combinación de ambos, N_2O_3), anhídrido nitroso o trióxido de nitrógeno. Varios investigadores afirman, que bajo ciertas condiciones el óxido nitroso (N_2O) puede formarse en las cámaras y aun reducirse hasta nitrógeno o amoniaco. El óxido nitroso y el nitrógeno son prácticamente insolubles en ácido sulfúrico y de aquí se no puedan ser reoxidados a un estado capaz de absorción por el ácido alimentado a la torre de Gay-Lussac. Por lo tanto los óxidos de nitrógeno que se reducen mas allá del óxido nítrico se traducen en pérdidas de compuestos de nitrógeno que salen en los gases. El óxido nitroso se forma cuando el óxido nítrico reacciona con un exceso de SO_2 en presencia de H_2O o H_2SO_4 muy diluido, según la ecuación:



Habiendo presente oxígeno en el sistema de arriba, la cantidad de N_2O es muy pequeña, según se ha observado, y la reducción a nitrógeno nula.

Según experimentos de Inglis, en las peores condiciones las pérdidas debidas a la reducción de los compuestos de nitrógeno hasta óxido nitroso son menores del 10% de las pérdidas totales.

Práctica del proceso de Nitración.

La mezcla de gases atravieza la cámara de polvo y los conductos, permaneciendo su composición prácticamente inalterable hasta que los óxidos de nitrógeno son encontrados. Después la composición no es constante, pues el porcentaje de SO_2 disminuye gradualmente a través de la planta, debido a su oxidación continua por los óxidos de nitrógeno.

El gas entra a la torre de Glover a una temperatura que varía entre $425^{\circ}C$ y $600^{\circ}C$ y asciende a través de su empaque. En las plantas que usan el nitrato de soda como medio de nitración, los óxidos de nitrógeno encuentran el gas en el conducto antes de llegar a la torre de Glover. Si se usa ácido nítrico se introduce en la parte superior de la torre de Glover. Y cuando se usa amoníaco oxidado, los óxidos de nitrógeno pueden ser introducidos en la parte más baja de la torre o en la primera cámara. En tales casos la mezcla de gas no encuentra óxidos de nitrógeno sino hasta después de entrar a la torre, donde se pone en contacto directo con el vitriolo nitroso y con el ácido de las cámaras con el cual la torre de Glover es alimentada, ya que esos ácidos gotean hacia abajo a través del empaque. El llamado ácido de cámara es el ácido hecho en las cámaras y es un ácido relativamente diluido entre 50 y $54^{\circ}Be$. El vitriolo nitroso es ácido aproximadamente $60^{\circ}Be$ y el cual ya ha pasado por la torre de Gay-Lussac.

Las principales funciones de la torre de Glover son: (1) desnitrar el vitrioloso y volver los óxidos de nitrógeno al proceso, (2) enfriar los gases, (3) concentrar el ácido de las cámaras y (4) suministrar parte del agua (como vapor) para el proceso.

En la torre de Glover el ácido se mezcla con el vitriolo nítrico diluyéndolo y produciendo una mezcla de ácidos de unos 56 a 57° Be. El vitriolo nítrico así diluido se separa muy rápidamente con sus óxidos de nitrógeno absorbidos cuando se pone en contacto directo con los gases sulfurosos calientes. Esta desnitración toma lugar principalmente en la parte superior de la torre y los óxidos de nitrógeno libertados se mezclan con los gases ascendentes y pasan juntos a las cámaras, donde sigue el proceso de la formación de ácido sulfúrico.

El ácido desnitrado continúa bajando en la torre enfriando los gases que siguen entrando y al mismo tiempo perdiendo una parte considerable de su agua en forma de vapor y concentrándose por lo tanto hasta cerca de 60° Be. El vapor mezclado con los gases ascendentes va a las cámaras. La oxidación del SO₂ empieza en la torre de Glover, en la parte superior de la cual es hecho y condensado algo de ácido sulfúrico.

Los gases continúan reaccionando uno con otro en los conductos y en las cámaras. El agua introducida en la parte superior de éstas, a través de atomizadores, también toma parte en las reacciones para producir ácido. El movimiento de los gases a través de las cámaras es producido por abanicos, hechos usualmente de plomo antimoniado o de acero forrado de plomo.

El porcentaje de SO₂ en la mezcla gaseosa disminuye gradualmente, conforme ellos avanzan, debido a la oxidación con la formación de ácido sulfúrico. El gas residual pasa de la última cámara a la torre de Gay-Lussac, donde se pone en contacto con ácido frío de 60° Be para recoger los vapores nítricos y formar el vitriolo nítrico. Este es bombeado a la torre de Glover donde es desnitrado como lo describí antes, completándose en esa forma el ciclo.

Como medio de absorción de los óxidos de nitrógeno, la torre de Gay-Lussac no trabaja con una eficiencia de 100%. Por el contrario su eficiencia es relativamente baja (entre 85 u 86% a lo más). Como promedio, entre 12 y 18% de los óxi-

dos de nitrógeno entrando a la torre en los gases, no son absorbidos escapando a la atmósfera. Por lo tanto, la necesidad de una adición continua de compuestos de nitrógeno al proceso.

La materia prima usada para la nitración en una planta de ácido sulfúrico, puede ser nitrato de soda o amoniaco. Usándose con éxito cualquiera de los siguientes métodos de nitración:

1o. Introduciendo el nitrato de soda (a) en ollas de acero puestas en el interior del conducto de los gases calientes, (b) en retortas de acero puestas en un horno de ladrillo construido en el exterior del conducto y calentado con carbón u otro combustible.

2o. Alimentando una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico en la parte superior de la torre de Glover.

3o. Introduciendo ácido nítrico líquido en la parte superior de la torre de Glover.

4o. Usando una solución de nitrato de soda, sola o con ácido sulfúrico.

5o. Convirtiendo amoniaco en óxidos de nitrógeno y suministrando los últimos a la torre de Glover o a una cámara.

Este último método es el más usado y él será el que emplearé en este estudio, consiste en hacer pasar gas amoniaco mezclado con nueve veces su volumen de aire por limaduras de platino al rojo, el cual, actuando como catalizador sirve para convertir el amoniaco en óxidos gaseosos de nitrógeno, que son llevados a la torre de Glover. Este método de nitrar, siendo relativamente barato, guarda las siguientes ventajas sobre los otros, que han determinado su elección en este trabajo:

1o. Bajo costo de materia prima y ningún consumo de ácido sulfúrico.

2o. Pureza de los óxidos de nitrógeno producidos y especialmente ninguna contaminación con ácido clorhídrico.

3o. Suministro continuo y constante de óxidos de nitrógeno.

- 4c. Simplicidad en la operación.
- 5o. Mas tiempo de duración del equipo.
- 6o. Ningún subproducto formado.

El amoniaco puede ser suministrado a la unidad de oxidación en forma anhídrida o como amoniaco líquido, siendo el factor económico el que determinaría uno u otro caso.

Ventiladores:

Todas las plantas modernas están equipadas con ventiladores para mover los gases a través de la planta. Algunas usan uno solo, localizado ya sea en la parte frontal o en la retaguardia, pero el mejor método es usar dos, uno entre la torre de Glover y la primera cámara, aunque algunos lo prefieren entre la primera cámara y la segunda, y el otro entre las dos torres de Gay-Lussac. Usando esa colocación se evitan las presiones o succiones excesivas y es posible aplicar a las cámaras la presión o succión que se desee. Los primeros ventiladores se hacían de plomo antimonial, pero hoy visto el gran desarrollo de métodos para unir firmemente el plomo al acero, se hacen ventiladores mucho más durables de acero forrados de plomo.

Aparatos de control.

En plantas que producen más de 100 tons. diarias de ácido siempre hay un cuarto con todos los aparatos necesarios para controlar la eficiencia del proceso. Este cuarto generalmente está situado a un lado de la primera cámara y tiene los siguientes aparatos:

- 1o.—Un manómetro bastante sensible para medir el tiro tanto en la primera cámara como en el conducto de entrada de los gases a la torre de Glover.
- 2o.—Pirómetros que llevan record de la temperatura en distintos puntos.
- 3o.—Aparatos para ensayar el porcentaje de SO_2 en el gas.

- 40.—Manómetros conectados a los tubos que suministran aire a los convertidores.
- 50.—Equipo para controlar el alimento a la torre de Glover.
- 60.—Teléfonos a partes importantes de la planta.
- 70.—Aparato para ensayar los óxidos de nitrógeno en el vitriolo nitroso.
- 80.—Aparato para ensayar el O₂ en la última cámara.

Tanques de almacenamiento.

Sus capacidades varían entre 100 y 5,000 tons., son cilíndricos y verticales con su parte superior en forma de cúpula. Se hacen de planchas de fierro de $\frac{1}{2}$ pulgada de grueso.

- 40.—Manómetros conectados a los tubos que suministran aire a los convertidores.
- 50.—Equipo para controlar el alimento a la torre de Glover.
- 60.—Teléfonos a partes importantes de la planta.
- 70.—Aparato para ensayar los óxidos de nitrógeno en el vitriolo nitroso.
- 80.—Aparato para ensayar el O_2 en la última cámara.

Tanques de almacenamiento.

Sus capacidades varían entre 100 y 5,000 tons., son cilíndricos y verticales con su parte superior en forma de cúpula. Se hacen de planchas de fierro de $\frac{1}{2}$ pulgada de grueso.

Diseño de Equipo.

Corre de Glover.

Existen en uso diferentes estilos de torres, la que yo usaré en este trabajo y que a mi modo de ver ofrece mayores ventajas, es la onstruida totalmente de mampostería; se construye con ladrillo especial y cemento a prueba de ácido con paredes de 17 a 21 pulgadas en la parte inferior (grueso).

El conducto de los gases calientes se construyen de ladrillo y entra por un lado de la torre cerca del fondo. El gas frío escapa a través de un conducto de plomo a un lado de la torre cerca de la parte superior.

La torres de Glover pueden ser cuadradas, octagonales o circulares en vista seccional, siendo las más comunes las de forma cuadrada. El empaque usado es de muy diferentes clases y ofrmas, existiendo en el mercado una gran variedad. Antiguamente se usaba cristales de cuarzo, y aun en la actualidad no ha sido desechada totalmente esa form de empaque. El espacio libre entre el empaque será más pequeño en la parte baja de la torre, aumentando conforme va ascendiendo a través de ella, esto se debe a que la temperatura en la parte inferior es más alta y el volúmen por lo consiguiente más grande que en la parte superior, aparte de que aquí la anchura interior de la torre es mayor vista la reducción gradual de las paredes. El empaque llegará hasta unos 4 o 5 pies abajo de la parte superior de la torre por lo menos, para permitir una distribución adecuada de ácido sobre la superficie total del empaque.

Hay dos diferentes formas de sostener el empaque, por medio de arcos contruídos también de mampostería, o por el método llamado de puentes. El método mas común es el que usa arcos, éstos se construyen separados uno de otro 4 pulgadas, y se prefieren por su mayor resistencia al peso del empaque. El piso de la torre es hecho también de mampostería pero en su parte interna tiene una plancha bastante gruesa de plomo pesando a lo menos 30 libras por pié cuadrado y en muchos casos hasta 45 y aún 60 libras.

El piso del conducto de entrada de los gases calientes estará entre 18 y 20 pulgadas arriba del piso de la torre, y se hace así para evitar la entrada del ácido de la torre al conducto, por esta misma causa se hace el conducto inclinado, con pendiente hacia el lado de la torre.

La salida del ácido se hace al nivel del piso de la torre; en el diseño se debe tener bastante cuidado pues es de extrema importancia su buen funcionamiento. Ella consiste generalmente de una caja de plomo de 3 pies de largo por 1.5 de ancho, forradas las paredes y el fondo en su interior con ladrillo. En su parte media se atraviesa un tabique que detiene el lodo que lleva el ácido. El tubo de salida es de "duriron" forrado con una gruesa capa de plomo, y por este tubo va el ácido a los enfriadores.

En la parte superior de la torre se encuentran dos tanques que guardan el ácido de las cámaras, el cual se introduce a la torre de Glover por medio de regaderas, existiendo un número variable de ellas, comunmente 6.

Tamaño de la torre de Glover.

En muchas plantas el tamaño de la torre ha sido determinado por métodos mas o menos empíricos hasta cierta forma caprichosos. Por ejemplo, un método adoptado por algunos diseñadores, consistía en hacer el espacio ocupado por la torre, de pared a pared, 1.5% del espacio total de las cámaras.

En Europa hacen el espacio efectivo de la torre, de 352 pies cúbicos por tonelada de azufre quemada por día.

En el término "espacio efectivo" desprecian el espacio ocupado por el empaque. Que tal base es ilógica, se demuestra por el hecho de que con diferentes clases de material de azufre usado, volúmenes diferentes de gas pueden ser producidos con el mismo peso de azufre quemado.

Por los continuos fracasos de plantas construidas bajo esas bases, se ha llegado a la conclusión, que el tamaño de una torre de Glover diseñada correctamente no puede ser independiente del volumen de gas pasando por ella en la unidad de tiempo. Y en su diseño se toma ahora ese dato como el principal o único. La medida que ha sido encontrada más satisfactoria es la de hacer, el área seccional interna de la torre de 20 a 25 pies cuadrados por 1000 pies cúbicos de gas a 0°C. y 760 m.m., pasando por minuto. El empaque deberá ser en tal forma que área se reduzca un 28% a 31% del total.

La altura de la torre dependerá del volumen del espacio empacado adoptado, y este es mejor basarlo también en el volumen de gas manejado, que por el azufre quemado o cantidad de ácido hecho por día.

El volumen del espacio empacado por 1000 pies cúbicos de gas a condiciones normales será de 700 a 800 pies cúbicos. Aún si las paredes de la torre son más delgadas en su parte superior que en la inferior, dividiendo el volumen en pies cúbicos del espacio empacado deseado, por el área seccional encontrada en pies cuadrados, dará la altura del espacio empacado con suficiente seguridad. Y la altura de la torre se encuentra entonces añadiendo el espacio no empacado, tanto arriba y abajo, y el grueso del piso.

Este tipo de torre construida toda de mampostería es más durable que la forrada de plomo, y si es bien construida, con buenos materiales, su costo inicial es bastante alto pero su mantenimiento es menos costoso.

Cálculo del tamaño de la torre de Glover:

Gas manejado por minuto a condiciones normales:
8,205 pies cúbicos

Area seccional:

23 x 8,205

————— = 188.7 piés cuadrados.

1000

Volumen del espacio empacado:

750 x 8,205

————— = 6,153.7 piés cúbicos

1,000

Altura del espacio empacado:

6,153.7

————— = 32.6 piés.

188.7

Altura de la torre:

32.6

Altura del espacio no empacado, arriba

4.0

Altura del espacio no empacado, abajo

6.0

piso de la torre

1.4

Total

44.0 piés

Será cuadrada, midiendo por lado interiormente 13.74 piés. Tendrá paredes de 18" de grueso en la parte inferior y de 10' en la parte superior.

Cámaras de Plomo.

Las cámaras de plomo constituyen los aparatos de oxidación hidratación y condensación de la planta de ácido. Aunque la oxidación del SO_2 empieza en la torre de Glover, lo mismo que ocurre alguna hidratación y condensación antes que el gas entre en la primera cámara, se puede decir que la mayor parte de la oxidación, hidratación formación y condensación del ácido sulfúrico se llevan a cabo en las cámaras de plomo. La acción de los compuestos gaseosos unos con otros y la descomposición de los productos intermedios con agua, generan mucho calor, y a fin de llevar las reacciones rápida y completamente, es necesario quitar continuamente ese calor. Eso se consigue enfriando las cámaras en su parte exterior ya sea con aire o agua, o con el contacto directo de un líquido enfriado previamente, por ejemplo, ácido sulfúrico, o con la combinación de cualquiera de estos métodos. Las cámaras son construídas desde unos 15 piés arriba del suelo, para permitir la rápida localización y compostura de algún agujero en el fondo, lo mismo que para facilitar la circulación de aire fresco cuando las cámaras están dentro de un edificio. Los fondos se hacen con planchas de plomo de 10 libras por pié cuadrado, aunque los filos que son los que fallan mas pronto se hacen de 12 o 15 libras, y solo el centro de 10. Las cortinas de plomo que forman las paredes y la parte superior, se hacen de 6 a 7 libras por pié cuadrado.

Las estructuras de fierro se prefieren a las de madera,

tomando en cuenta su mayor durabilidad y su cualidad de ser a prueba de fuego.

No hay límite fijo para el número de cámaras; se da el caso de plantas que solo producen 60 toneladas diarias de ácido y tienen 13 cámaras, y otras de 300 toneladas diarias tienen solo 4.

El número y tamaño de las cámaras es comunmente determinado por la regla de hacer un pié cuadrado de superficie de plomo radiando calor, por cada 7 piés cúbicos de volumen de cámara, (en la superficie de radiación no se cuentan los fondos) y el espacio total de las cámaras, se hace de 3 piés cúbicos por libra de azufre quemado diariamente, en las enfriadas por agua, mientras que en las enfriadas por aire se toma 14 uiés cúbicos por cada libra.

Los tipos de cámaras más comunmente usados son:

- 1o.—Cámaras llamadas de forma de caja y enfriadas por aire.
- 2o.—Cámaras enfriadas por agua.
- 3o.—Cámaras enfriadas por ácido.
- 4o.—Sistema de torres.

De cada uno de esos tipos existen numerosos ejemplos, todos amparados por diferentes patentes. Las primeramente usadas fueron las de forma de caja y enfriadas por aire, son de forma rectangular, generalmente con el armazón construido de madera, y con su eje horizontal mayor que el vertical. En el sistema de torres reemplazan totalmente las cámaras, por torres empacadas y en las cámaras enfriadas por ácido siguen casi el mismo sistema que en las enfriadas por agua.

En esta clase, el tipo de cámara que tiene más aceptación, es la llamada "cámara enfriada por agua MILLS-PACKARD", inventada en Inglaterra en 1913. Estas cámaras se construyen en la forma de un cono truncado, con una pendiente generalmente de 1 : 10, es decir, un pié menos de diámetro por cada 10 piés de altura. La estructura exterior es de acero y las paredes totalmente de plomo, habiendo dis-

Úntos dispositivos a fin de formar continuamente una película de agua en todo el exterior de la pared. Este tipo de cámara es el más indicado para usarse en este trabajo ya que reúne las cualidades del tercero y cuarto tipo teniendo la ventaja de ser mucho más económico. El empleo de las cámaras enfriadas con aire, se hace aquí imposible dado el gran espacio que ocuparían. Esta clase de cámaras son las indicadas de usarse en plantas pequeñas, ya que son las que ofrecen las mayores ventajas en el aspecto económico, pero en plantas grandes su gran tamaño las hace incosteables. Las plantas construidas con cámaras Mills-Packard son muy compactas y en esa forma se reduce grandemente el personal al cuidado de ellas, pues se hace más fácil su observación. En plantas grandes se requiere mucho menos capital que usando cámaras de caja, el edificio es eliminado, y debido a su más baja temperatura su deterioro es menos rápido, así como el costo de mantenimiento menor. Se ha probado que el tiempo normal que duran en servicio no es menor de 20 a 30 años.

Accesorios de las cámaras:

Agua pura y filtrada se introduce en forma de rocío, a través de atomizadores de diseño especial localizados en la parte superior de las cámaras. Los atomizadores más usados son el "Monarch" y el "Shutte y Koerting". El tubo de salida del ácido de las cámaras conecta con un tanque de plomo colocado a un lado, de el cual otro tubo lleva el ácido a una línea principal común a todas las cámaras. Esta línea principal descarga el ácido a otro tanque grande de donde una bomba lo lleva a la parte superior de la torre de Glover.

Se lleva record de la temperatura por medio de termómetros automáticos, generalmente en una sola carta se lleva el record de tres o cuatro cámaras, para facilitar la determinación de las diferencias de temperaturas.

Densímetros con escala entre 40 y 60 Be, son usados para determinar la densidad del ácido. El obrero encargado de la cámara hará la lectura cada hora por lo menos y basado en esas lecturas ajustará el suministro de agua.

Para observar el color de los gases, hay ventanas de vidrio localizadas en diferentes partes, usualmente en las últimas cámaras.

Los conductos que conectan una cámara con otra se hacen generalmente con planchas de plomo de 10 lbs. por pié cuadrado, prefiriéndose la forma circular sobre cualquiera otra forma, en vista seccional.

El área seccional será tal que el volumen máximo de gas, pueda pasar a través de él a una velocidad de 10 piés por segundo. El volumen del gas se reduce gradualmente de cámara a cámara debido a la condensación y a la caída de temperatura de los gases. Sin embargo el tamaño de los demás conductos se hace igual al primero. En cámaras de 25 piés de ancho se usan por lo menos dos conductos operando en paralelo.

Número y Tamaño de las cámaras:

Libras de azufre quemadas por día: 141,000

Espacio de cámara necesario: $141,000 \times 3 = 423,000$ piés³

Según tabla dada por los constructores de esta clase de cámaras se necesitarán 12 cámaras con las siguientes dimensiones, capacidad y otros datos:

Capacidad 36.750 piés³

Diámetro superior 28 piés

Diámetro inferior 35 piés

Altura 48 piés

Superficie enfriada (aproxim.) 5,140 piés²

Agua necesaria por cámara 1,700 gals. ingleses/hora.

Relación en piés cuadrados de superficie, a piés cúbicos de espacio de cámara 1: 7.15

Torre de Gay-Lussac.

Esta torre fué inventada por Gay Lussac en 1827 y es ahora universalmente empleada en las plantas con el proceso de nitración, para recoger los óxidos de nitrógeno que llevan los gases de salida.

Como las torres de Glover, hay dos clases, las construidas de plomo y las construidas de mampostería. Este tipo de torre es construido de ladrillo recocido no atacable por materias químicas pegado con cemento resistente al ácido. El cemento a prueba de ácido consiste de tierra altamente silicosa mezclada con una solución de silicato de soda de 36°Be. En esta clase de trabajo se usarán materiales de la mejor calidad; los ladrillos serán uniformes en forma y tamaño y el mortero será preparado no más de una hora antes de usarse.

Las torres pueden ser cilíndricas, octagonales o cuadradas en vista seccional prefiriéndose las últimas. Las paredes son de 14 a 21 pligs. de grueso, dependiendo de la altura de la torre, y son del mismo grosor en toda su longitud. El empaque es el mismo usado en la torre de Glover, y se siguen los mismos métodos para sostenerlo.

El conducto de los gases de entrada se encuentra en un lado y tan cerca del fondo como se pueda, cuidando que no entre ácido a él. Este será también de mampostería. En el conducto de los gases de salida se usa generalmente plomo y se encuentra arriba.

En los demás detalles se siguen las mismas normas que en la torre de Glover.

Tamaño de las torres de Gay-Lussac:

Se ha determinado prácticamente que con un material de empaque que deja un 50% de espacio libre, el espacio empacado requerido será aproximadamente de 1640 piés cúbicos por mil piés cúbicos del gas saliendo de las cámaras por minuto y a condiciones normales. El volumen total de espacio empacado dividido por el número de torres, da el volumen de espacio empacado por torre.

Dimensiones y número de torres:

En este capítulo se debe tener en cuenta que una torre baja y ancha es menos eficiente que una alta y angosta. Algunos constructores establecen que la altura deberá ser 5 ó 6 veces el diámetro y limitan este a un máximo de 10 piés. Pero en operaciones de gran escala, una torre de 10 piés de diámetro no puede manejar grandes volúmenes sin un costo exagerado de potencia, y aunque esta objeción se puede vencer por la construcción de muchas torres angostas en paralelo, debe ser considerado el costo de instalación y mantenimiento de una multiplicidad de pequeñas torres.

Las paredes de torres angostas encierran volúmenes pequeños de empaque y se estima que el costo de la parte productiva de una torre (zona empacada) es de 60 a 70% del costo total. Por lo tanto en el caso de operación a gran escala es económico sacrificar la eficiencia y construir torres de anchura amplia. En torres más anchas la relación entre anchura y diámetro es crecida y se hacen generalmente entre 1 : 3 a 1 : 4.

El volumen de espacio empacado por unidad de gas saliendo de las cámaras por minuto, ya he dicho como se determina. El siguiente paso es determinar la velocidad deseada para el gas por pié lineal de espacio empacado. El conveniente período de contacto y la velocidad lineal fluctúan dado el porcentaje de SO₂ en el gas y el material de empaque adoptado. En mi caso tomaré como 45 segundos el periodo

de contacto entre ácido y gas, y la velocidad lineal de 1.5 piés lineales por segundo en la zona empacada de la torre. La longitud total de zona empacada será por tanto:

$$45 \times 1.5 = 67.5 \text{ piés}$$

El volumen del espacio empacado por mil piés cúbicos de gas por minuto multiplicado por el número de miles de piés cúbicos de gas por minuto y el producto dividido por la longitud total del espacio empacado en piés, dá el área seccional de la torre.

Cálculo de la torre de Gay-Lussac:

Se puede suponer para este cálculo que el volumen total del gas entrando al proceso ha sido reducido un 9%, tomando en cuenta el SO₂ convertido a ácido sulfúrico y el Oxígeno tomado por él. Por tanto el gas entrando a la Gay-Lussac será: $8.205 \times .91 = 7.467$ piés cúbicos/min.

Espacio empacado: $1.64 \times 7.467 = 12.245$ piés cúbicos

Área seccional interna de la torre:

En vista de ser muy grande la altura de 67.5 piés para una torre, tomaré dos de 33.8 piés cada una:

$$6,123$$

$$\frac{\quad}{33.8} = 181 \text{ piés cuadrados}$$

$$33.8$$

Serán dos torres cuadradas de 13.45 piés por lado, con una altura de espacio empacado de 33.8 piés; añadiendo 6 piés abajo del empaque, 5 en la parte superior y 1.2 piés para el grosor del piso dará una altura total de 46 piés.

Equipo Auxiliar de la Planta

El equipo auxiliar de una planta de ácido sulfúrico por el proceso de nitración comprende, enfriadores para el ácido, bombas, tanques, abanicos para el gas y otros aparatos de menor importancia.

Enfriadores de ácido:

El ácido descargado del fondo de la torre de Glover está a una temperatura entre 130 y 155°C. y si es admitido a esa temperatura a los tanques los destruye rápidamente, además de que unas $\frac{1}{4}$ partes de éste ácido es usado de nuevo como alimento de las torres de Gay-Lussac y aquí su temperatura no debe exceder de 35 a 40°C. Es necesario por lo tanto proveer de enfriadores a la planta y ellos estarán localizados tan cerca de la torre de Glover como sea posible. El ácido va a los enfriadores a través de un tubo de fierro-silicon. El enfriador es generalmente un tanque cilíndrico de plomo, soportado por una estructura de acero que contiene un número variable de coils cilíndricos a través de los cuales se forza agua fría. El tamaño y número de enfriadores instalados es proporcional al tamaño de la planta. Se arreglan en escalón de modo que el ácido pueda fluir por gravedad de un enfriador al siguiente. A menos que sean usadas chaquetas de agua para los tanques, el primero y a veces también el segundo enfriador estarán forrados interiormente con mampostería a prueba de ácido.

Circulación del ácido:

La cantidad de ácido circulando sobre las torres de Gay-Lussac y Glover varía mucho de una planta a otra. Antes se consideraba bueno en la práctica circular uno, a uno y medio veces la producción diaria de la planta en toneladas de ácido de 60 Be. Sin embargo, puede recobrase mayor cantidad de óxidos de nitrógeno permitiendo un flujo mayor de ácido sobre las torres de Gay-Lussac, y por tal motivo modernamente se acostumbra a circular de dos y medio a cuatro veces la producción diaria de ácido. Cuando la materia prima es azufre se requiere menor cantidad de ácido circulando que cuando es pirita o gases de procesos metalúrgicos, teniendo en cuenta el volumen más pequeño de gases manejándose y del menor porcentaje de óxidos de nitrógeno en circulación. Las pérdidas de óxidos de nitrógeno expresadas como un porcentaje del azufre quemado, serán mas bajas donde se utilizan gases provenientes de azufre que de gases de piritas o procesos metalúrgicos. Esto se debe a que el nitrógeno en circulación, con gas de azufre, es normalmente entre 19 y 21% del azufre quemado, mientras que con gas de piritas o metalúrgico es de 25 a 35%. Puesto que la pérdida de nitrógeno en una planta bien manejada es de 10 a 15% del nitrógeno circulando, se sigue que: basado sobre el azufre quemado, las pérdidas de nitrógeno en una planta operando con gases de procesos metalúrgicos como materia prima, son de 2.5 a 5.25% del azufre quemado. En este caso en que hay dos torres de Gay-Lussac conectadas en serie y una torre de Glover, la cantidad entera de circulación del ácido debe ser elevada tres veces. En adición el ácido de cámaras es también elevado a la parte superior de la torre de Glover. Por lo tanto usando una circulación de tres veces la producción diaria, la cantidad total de ácido que deberá ser elevada por día, será:

Producción diaria de ácido sulfúrico: 277 tons de ácido de de 60°Be

$277 \times 3 \times 3 = 2,493$ toneladas, más 300 toneladas de ácido de cámaras aproximadamente. Total de ácido que será manejado por las bombas: 2,793 tons.

Antiguamente estaban en uso diferentes clases de bombas pero se usaban principalmente los "huevos de ácido", éstos ahora han sido reemplazados por bombas movidas por motor, hay una gran variedad de ellas siendo las más populares las Ceco, Duriron, La-Bour y Lewis. Son bombas centrífugas construidas unas de plomo, otras de fierro y de aleaciones especiales capaces de resistir la acción del ácido. La substitución de los huevos de ácido por centrífugas, además de reducir el costo de la potencia reduce también la mano de obra, haciendo menos indispensables los servicios del bombero.

Los tanques donde descargan las bombas son hechos de fierro forrados interiormente con planchas de plomo. Algunos también se forran con ladrillo. Generalmente son equipados con algún método de flotación o eléctrico para indicar la altura del ácido en el tanque.

Antiguamente estaban en uso diferentes clases de bombas pero se usaban principalmente los "huevos de ácido", éstos ahora han sido reemplazados por bombas movidas por motor, hay una gran variedad de ellas siendo las más populares las Ceco, Duriron, La-Bour y Lewis. Son bombas centrifugas construídas unas de plomo, otras de fierro y de aleaciones especiales capaces de resistir la acción del ácido. La substitución de los huevos de ácido por centrifugas, además de reducir el costo de la potencia reduce también la mano de obra, haciendo menos indispensables los servicios del bombero.

Los tanques donde descargan las bombas son hechos de fierro forrados interiormente con planchas de plomo. Algunos también se forran con ladrillo. Generalmente son equipados con algún método de flotación o eléctrico para indicar la altura del ácido en el tanque.

Balance de Material

(Base 24 horas)

Balance de la planta entera:

Entradas: gases del conducto, óxidos de nitrógeno y agua.

Salidas: ácido producido y gases.

Gases calientes: N₂ . . . 375,839 kgms.

O₂ . . . 39,574 kgms.

SO₂ . . . 147,943 kgms.

Total 563,356 kgms.

Oxidos de nitrógeno: Según lo dicho al tratar sobre la circulación del ácido, el nitrógeno circulando diariamente es 22,192 kgms. tomando como base el 30% del azufre quemado. Y las pérdidas de nitrógeno serán 2,885 kgms. diariamente, suponiendo que se pierde un 13% del nitrógeno circulando. Esta cantidad será la que tiene que ser introducida diariamente en la torre de Glover. El gas que se produce en la oxidación del amoniaco es una mezcla de NO₂ y NO, pero puesto que el equilibrio de la mezcla cambia gradualmente al pasar por la torre debido a la variación de temperatura y al diferente contenido de oxígeno, supondré la tal mezcla como si en su totalidad fuera NO. Y en tal caso el NO entrando al sistema será: 6182 kgms.

Acido producido: (según el cálculo estequiométrico ya hecho)

Acido de 60° Be. 276,654 kgms.

H₂SO₄ 214,877 kgms.

H₂O 61,777 kgms.

Agua suministrada:

Agua en el ácido producido 61,777 kgms.

Necesaria para la reacción

$214,877 \times \frac{1}{3} = 39,467$ kgms.

Introducida en las cámaras . . . 101,244 kgms.

Gases dejando la torre de Gay-Lussac:

El SO₂ ocupado en la reacción fué:

$214,877 \times 64.98 = 140,328$ kgms.

SO₂ saliendo $147,943 - 140,328 = 7,615$ kgms.

Nitrógeno: 375,839 kgms.

Oxígeno para oxidar el SO₂: $140,328 \times \frac{1}{2} = 35,082$ kgms.

„ dejando la torre: $39,574 - 35,082 = 4,492$ kgms.

Oxido nítrico 6,182 kgms.

Total de gases saliendo 394,128 kgms.

Resumen del balance de planta entera:

Entra:

Gases 563,356 kgms.

Oxido nítrico 6,182 kgms.

Agua 101,244 kgms.

Total: 670,782 kgms.

Sale:

Gases 394,128 kgms.

Acido de 60° Re. 276,654 kgms.

670,782 kgms.

Balance de la Torre de Glover:

Entradas: gases del conducto, ácido de las cámaras, óxido nítrico y ácido de las Gay-Lussac.

Salidas: ácido sulfúrico y gases.

Para este cálculo supondré que en la torre de Glover se convierte un 16% del SO₂ a ácido sulfúrico, formándose el resto en las cámaras. El ácido de la torre es de 77.67% de H₂SO₄ y 22.33% de H₂O, (60° Re.). El de las cámaras es de 50° Re., que corresponden a 62.18% de H₂SO₄. El de las torres de Gay-Lussac es de 77% de H₂SO₄, 22% de H₂O y 1% de N₂O.

Gases calientes del conducto:

| | | |
|-------------------------|----------------|-------|
| Nitrógeno: | 375,839 | kgms. |
| Oxígeno: | 39,574 | .. |
| SO ₂ : | 147,943 | .. |
| Total: | <u>563,356</u> | .. |

Acido de las cámaras:

El SO₂ convertido en la torre de Glover es: 147,943 x .16 = 23,671 Kgms., por tanto el convertido en las cámaras será:

147,943 -- (23,671 + 7,615) = 116,657 kgms., que producen de ácido sulfúrico: 178,631 kgms. y como es de 50° Be. serán 287,280 kgms.

Agua en ese ácido: 287,280 -- 178,631 = 108,649 kgms.

Oxido nítrico: 6,182 kgms.

Acido Gay-Lussac:

El ácido total circulando diariamente lo tomaré como 3 veces la producción diaria y será por lo tanto: 214,873 x 3 = 644,619 kgms. de H₂SO₄. Esta será la cantidad de ácido que viene de las torres de Gay-Lussac, como es de 77%, la cantidad total será: 837,168 kgms., con 184, 177 kgms. de H₂O y 8,372 kgms. de N₂O₃.

Acido sulfúrico saliendo:

de las cámaras 178,631 kgms.

de las Gay-Lussac 644,619 kgms.

formado en la torre:

(23,671 x 1.5) 36,246 kgms.

Acido total saliendo 859,496 kgms.

Acido de 60 Be. dejando la torre: 859,496 x ¹⁰⁰/_{77.67}

= 1,106,600 kgms.

Gases secos dejando la torre:

SO₂ : 147,943 -- 23,671 124,272 kgms.

Nitrógeno: 375,839 kgms.

Oxígeno:

Entrando en los gases: 39,574 kgms.

Dado por el N₂O₃ al pasar a NO: 8,372 x ¹⁰⁰/₇₆ = 1,763 kgms.

usado para oxidar el SO₂ 23,671 x ¹⁰⁰/₇₄ = 5,918 kgms.

Oxígeno saliendo: 35,419 kgms.
 Oxido Nítrico:
 suministrado a la torre: 6,182 kgms.
 del N_2O_3 : $8,372 \times 60/76$ 6,609 kgms.
 Total de NO saliendo 12,791 kgms.

Total de gases:

| | |
|--------------|---------------------|
| N_2 | 375,839 kgms. |
| SO_2 | 124,272 kgms. |
| O_2 | 35,419 kgms. |
| NO | <u>12,791 kgms.</u> |
| Total: | 548,321 kgms. |

Vapor de agua en los gases:

El peso de este vapor lo calcularé haciendo un balance del agua.

Entra:

| | |
|----------------------------|----------------------|
| En el ácido de las cámaras | 108,649 kgms. |
| en el ácido Gay-Lussac | <u>184,177 kgms.</u> |
| Total: | 292,826 kgms. |

Sale:

| | |
|-----------------------------------|---------------|
| Agua para formar el ácido | 6,657 kgms. |
| en el ácido (1'106,600 - 859,946) | 247,104 kgms. |
| vapor de agua por diferencia: | 39,065 kgms. |

Resumen del balance de material en la torre de Glover:

Entra:

| | |
|-------------------------|--------------------|
| Gases | 563,356 kgms. |
| ácido de las cámaras | 287,280 kgms. |
| ácido de las Gay-Lussac | 837,168 kgms. |
| óxido nítrico | <u>6,182 kgms.</u> |
| Total: | 1'693,986 kgms. |

Sale:

| | |
|-----------------|---------------------|
| Acido de 60°Be. | 1'106,600 kgms. |
| Gases secos | 548,321 kgms. |
| Vapor de agua | <u>39,065 kgms.</u> |
| Total: | 1'693,986 kgms. |

Balance de Material de las Cámaras:

Lo más propio en este cálculo sería hacer el balance para cada una de las cámaras, pero para evitar repeticiones y simplificar los cálculos, todas las cámaras serán consideradas como una sola unidad.

Entradas: gases, vapor de agua y agua suministrada.

Salidas: gases y ácido.

Gases de la torre de Glover 548,321 kgms.

vapor de agua 39,065 kgms.

Agua suministrada:

Esta agua será la diferencia entre la suma del agua necesaria para formar el ácido y la necesaria para diluirlo a 50 Be. menos el agua que viene en forma de vapor en los gases. El H_2SO_4 formado en las cámaras es 178,631 kgms. y el H_2O necesaria para formarlo es: $178,631 \times \frac{11}{100} = 32,810$ kgms. y para diluir el ácido formado hasta 50°Be se ocupan 108,649 kgms. Por lo tanto el agua necesaria en las cámaras es 141,459 kgms., como solo hay disponibles 39,065 kgms. tendrá que suministrarse el resto: 102,394 Kgms.

Gases saliendo:

Nitrógeno 375,839 kgms.

SO_2 :

para formar el ácido se ocuparon 116,657 kgms., por lo tanto el SO_2 saliendo será: $124,272 - 116,657 = 7,615$ kgms.

Oxígeno:

el necesario para formar el ácido fué: 29,164 kgms., por lo tanto el O_2 saliendo será (restando) 6,255 kgms.

Oxido nítrico 12,791 kgms.

Total de gases saliendo: 402,500 kgms.

Acido saliendo: 287,280 kgms.

Resumen del Balance de Material de las Cámaras:

Entra:

Gases secos 548,321 kgms.

Vapor de agua 39,065 kgms.

Agua suministrada 102,394 kgms.

Total: 689,780 kgms.

Sale:

| | |
|--------|----------------------|
| Gases | 402,500 kgms. |
| Acido | 287,280 kgms. |
| Total: | <u>689,780 kgms.</u> |

Se vé que hay una diferencia en el agua suministrada con el resultado obtenido en el balance de la planta entera, esa diferencia consiste en el vapor de agua que sale en la torre de Gay-Lussac, como después se verá.

Balance de Material de las torres de Gay-Lussac:

Aunque son dos torres serán consideradas como una sola, por la misma razón expuesta al hacer el balance de las cámaras.

Las entradas consisten en los gases provenientes de las cámaras y en el ácido de la torre de Glover. Los gases salen tal como entran, con excepción del NO y del O₂.

| | |
|---|-----------------------------|
| El NO saliendo es | 6,182 kgms. |
| El NO oxidado a N ₂ O ₃ es (12,791 — 6,182) = | 6,609 kgms. |
| O ₂ consumido en esa oxidación: 6,609 x %/100 = | 1,763 kgms. |
| Oxígeno saliendo: 6,255 - 1,763 = | 4,492 kgms. |
| N ₂ O ₃ formado: | 6,609 x %/100 = 8,372 kgms. |
| Acido Glover: 1-106,600 — 276,654 = | 829,946 kgms. |
| en este ácido viene de agua | 185,327 kgms. |
| y sale en el ácido | 184,177 kgms. |
| exceso de agua | 1,150 kgms. |

Resumen del balance de material en las torres de Gay-Lussac:

Entra:

| | |
|--------------|------------------------|
| Gases | 402,500 kgms. |
| Acido Glover | 829,946 kgms. |
| Total | <u>1,232,446 kgms.</u> |

Sale:

| | |
|--------|------------------------|
| Gases | 394,128 kgms. |
| Acido | 837,168 kgms. |
| Agua | 1,150 kgms. |
| Total: | <u>1,232,446 kgms.</u> |

(1) El exceso de agua se debe a la diferencia de la concentración tomada con la correcta, para el ácido Gay-Lussac.

Balance de Calor.

Para hacer este balance contaré con los siguientes datos, algunos de ellos son supuestos pero apegados a lo que la práctica indica:

El gas entra a la torre de Glover a 531°C. y sale a 100°C., ahí se convierte un 16% del SO_2 a H_2SO_4 . El ácido deja la torre a 115 C. y es enfriado hasta 25°C., parte de él va a las Gay-Lussac y parte sale como producto. A la torre de Glover entra ácido de las cámaras de 50°Be y ácido Gay-Lussac o vitriolo nitroso de la siguiente composición: H_2SO_4 — 77%, H_2O — 22% y N_2O_5 — 1%. El ácido Glover es de 60 Be., (77.67%). Tanto el ácido de las cámaras como el Gay-Lussac es enfriado a 25°C y así entra a la torre de Glover. El ácido sale de las cámaras a 70 C. y el Gay-Lussac a 25°C. El gas deja las cámaras a 40 C. y así entra a las Gay-Lussac. Sale del proceso el gas a 30°C. El óxido nítrico entra a 100°C.

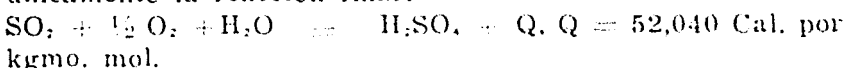
Temperatura de referencia: 15.6 C.

Base: 24 horas.

Balance de calor en la Torre de Glover.

Calor desprendido en la formación del H₂SO₄:

La reacción procede en varios pasos, como ya se vió, pero el resultado será exactamente el mismo si se considera únicamente la reacción final:



36.246

————— 52,040 = 19'254,800 Calorías

98

Calor absorbido al concentrar el ácido.

El ácido sulfúrico formado en la torre es diluido hasta 60°Be (77.67%). El ácido de las cámaras de 64 es concentrado a 60°Be. Y el vitriolo nitroso de las Gay-Lussac que produce un ácido de 77.78% es diluido también a 60°. El resultado total de estos cambios es un efecto de concentración. El calor dejado libre es la diferencia entre el calor total desprendido para formar cada una de las soluciones de ácido que entran y el calor desprendido para formar la solución de ácido que sale de la torre. Según tabla los calores molales integrales de solución del ácido sulfúrico son:

a 64% 11,800 Cal/kgmo. mol

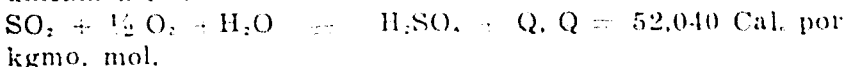
a 77.67 8,710 Cal/kgmo. mol

a 77.78% 8,670 Cal/kgmo. mol

Balance de calor en la Torre de Glover.

Calor desprendido en la formación del H_2SO_4 :

La reacción procede en varios pasos, como ya se vió, pero el resultado será exactamente el mismo si se considera únicamente la reacción final:



36,246

————— 52,040 = 19'254,800 Calorías

98

Calor absorbido al concentrar el ácido.

El ácido sulfúrico formado en la torre es diluído hasta 60°Be (77.67%). El ácido de las cámaras de 64 es concentrado a 60°Be. Y el vitriolo nitroso de las Gay-Lussac que produce un ácido de 77.78% es diluído también a 60°. El resultado total de estos cambios es un efecto de concentración. El calor dejado libre es la diferencia entre el calor total desprendido para formar cada una de las soluciones de ácido que entran y el calor desprendido para formar la solución de ácido que sale de la torre. Según tabla los calores molales integrales de solución del ácido sulfúrico son:

a 64%..... 11,800 Cal/kgmo. mol

a 77.67%..... 8,710 Cal/kgmo. mol

a 77.78%..... 8,670 Cal/kgmo. mol

El calor total de solución del ácido de cámaras es:

$$\frac{287,280 \times .64}{98} 11,800 = 22\,136,800 \text{ Cal.}$$

El del ácido Gay-Lussac:

$$\frac{(837,168 - 8,372) .7778 \times 8,670}{98} = 57\,031,260 \text{ Cal.}$$

Calor total de solución de los ácidos al entrar: 79'168,060

Calor total de solución del ácido Glover:

$$\frac{1\,106,600 \times .7767 \times 8,710}{98} = 76\,386,700 \text{ Cal.}$$

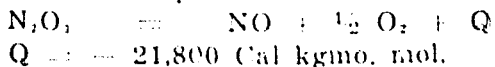
Calor consumido en la concentración del ácido: 2'781,360 Cal.
 Calor absorbido para desprender el N₂O, de la solución y descomponerlo:

Aunque en realidad el N₂O, viene disuelto en la solución ácida, se puede considerar disuelto únicamente en el agua de la solución y entonces serán 184.177 kgms. de agua y 8,372 kgms. de N₂O, que corresponden a 93 mols. de agua por mol de N₂O,. El calor de solución de una mol de N₂O, en 100 mols de agua es de 28,900 Cal. y este mismo puede considerarse para una mol en 93 de agua.

Entonces el calor absorbido en el desprendimiento del N₂O, de la solución es:

$$\frac{8,372}{76} 28,900 = 3\,179,000 \text{ Cal.}$$

El N₂O, se supone que se desdobra totalmente en NO y O₂, lo cual sucede solo aproximadamente. Las cantidades de calor resultantes con estas suposiciones, son relativamente pequeñas y no afectan notablemente la exactitud del cálculo. Haciendo esta suposición:



El calor absorbido en la descomposición del N_2O , es:

$$\frac{8,372}{76} \cdot 21,800 = 2,398,000 \text{ Cal.}$$

El calor total absorbido para sacar el N_2O , de la solución y descomponerlo es pues: 5 577,000 Cal.

Calor de los gases al entrar (según el cálculo ya hecho): 70 824,400 Cal.

Contenido de calor del ácido de las cámaras:

Capacidad de calor del ácido de 50 Be. = 0.5 Cal. kgmo.

$$287,280 \times .5 (25 - 15.6) = 1,350,216 \text{ Cal.}$$

Contenido de calor del ácido Gay-Lussac:

capacidad de calor del ácido de 77% = .438 Cal. kgmo.

$$837,168 \times .438 (25 - 15.6) = 3,447,224 \text{ Cal.}$$

Supongo en este cálculo que el 1% de N_2O , no influye nada en la capacidad de calor del ácido.

Contenido de calor del óxido nítrico.

$$\frac{6,182}{30} \cdot 7 (100 - 15.6) = 121,700 \text{ Cal.}$$

Contenido de calor de los gases al salir:

la capacidad de calor media del SO_2 , entre 15.6 y 100° C es 9.3 Cal./kgmo. mol.

la del N_2 , NO O_2 , entre los mismos límites es 6.95 Cal. kgmo., mol.

$$\text{Capacidad de calor del } SO_2: \frac{124,272}{64} \cdot 9.3 = 18,061$$

Capacidad de calor del N_2 , O_2 y NO :

$$\left(\frac{375,839}{28} + \frac{35,419}{32} + \frac{12,791}{30} \right) 6.95 = 103,930$$

capacidad de calor total: 121,991

Contenido de calor: 121,991 (100 - 15.6) = 10,298,000 Cal.

Contenido de calor del vapor de agua:

humedad molal del gas: .133, punto de rocío: 49.5° C.

El calor de vaporización a 49.5° C. es: 10,240

Cal./kgmo. mol. Y la capacidad de calor molal media del vapor entre 49.5 y 100 C. es: 8.43 Cal./kgmo. mol/° C.

Contenido de calor:

39,065

$$\frac{18}{18} \left(10,240 + 15.6 (49.5 - 15.6) + 8.43 (100 - 49.5) \right) = 24,293,150 \text{ Cal.}$$

Calor dado por el ácido al enfriarse:

la capacidad de calor del ácido de 60° Be. es: .442 Cal./kgmo. °C.

$$1,106,600 \times .442 (115 - 25) = 44,042,680 \text{ Cal.}$$

Contenido de calor del ácido a 25° C.:

$$1,106,600 \times .442 (25 - 15.6) = 4,647,720 \text{ Cal.}$$

Resumen del balance de calor de la torre de Glover:

Entra:

| | |
|----------------------------|-----------------|
| En los gases | 70'824,400 Cal. |
| en el ácido de las cámaras | 1'350,216 Cal. |
| en el ácido Gay-Lussac | 3'447,224 Cal. |
| en el óxido nítrico | 121,700 Cal. |
| en la reacción | 19'254,800 Cal. |
| | <hr/> |
| Total | 94'998,340 Cal. |

Sale:

| | |
|---|-----------------|
| en los gases | 10'298,000 Cal. |
| en el vapor de agua | 24'293,150 Cal. |
| en el ácido | 4'647,720 Cal. |
| en los enfriadores | 44'042,680 Cal. |
| al concentrarse | 2'781,360 Cal. |
| al descomponer el N ₂ O ₄ | 5'577,000 Cal. |
| pérdidas por radiación (por dif.) | 3'358,430 Cal. |
| | <hr/> |
| Total | 94'998,340 Cal. |

Balance de calor de las cámaras:

Calor desprendido en la formación del H₂SO₄:

178,631

$$\frac{178,631}{52,040} = 94,853,300 \text{ Cal.}$$

98

Calor desprendido al disolver el ácido:

el calor integral de solución del ácido de 64% es 11,800 Cal./kgmo. mol.

178,631

$$\frac{\quad}{98} 11,800 = 21\,507,860 \text{ Cal.}$$

98

Contenido de calor de los gases secos al entrar: 10 298,000 Cal.

Contenido de calor del vapor de agua: 24 293,150 Cal.

El contenido de calor del agua suministrada es cero, puesto que entra a la temperatura de referencia.

Contenido de calor de los gases al salir:

la capacidad de calor mola! media es, entre 15.6 y 40 C.:

para el SO₂: 9.2 Cal. kgmo. mol/°C.

para el N₂, O₂, NO: 6.94 Cal. kgmo. mol. °C.

procediendo en la misma forma que en la torre de Glover, obtengo 975,500 Cal.

Calor dado por el ácido al enfriarse:

la cap. de calor del ácido de 50° Be. es .5 Cal. kgmo. mol

$$287,280 \times .5 (70 - 25) = 6\,463,800 \text{ Cal.}$$

Contenido de calor del ácido al salir de los enfriadores:

(Igual que al entrar a la torre) : 1 350,216 Cal.

Resumen del balance de calor en las cámaras:

Entra:

| | |
|----------------------|------------------------|
| en los gases | 10 298,000 Cal. |
| en el vapor de agua | 24 293,150 Cal. |
| al disolver el ácido | 21 507,860 Cal. |
| en la reacción | <u>94 853,300 Cal.</u> |

Total: 150 952,310 Cal.

Sale:

| | |
|---------------------|-------------------------|
| en los gases | 975,500 Cal. |
| en el ácido | 1 350,216 Cal. |
| en los enfriadores | 6 463,800 Cal. |
| pérdidas (por dif.) | <u>142 162,794 Cal.</u> |

Total: 150 952,310 Cal.

Balance de calor en las torres Gay-Lussac:

Contenido de calor del ácido Glover:

829,946

 .442 (25 -- 15.6) = 3'444,276 Cal.

98

Contenido de calor de los gases al entrar: 975,500 Cal.

Calor desprendido al formar y disolver el N_2O_3 : 5'577,000 Cal.

El calor resultante del cambio de concentración es despreciable, ya que la diferencia en la concentración no llega a 1%.

Contenido de calor de los gases al salir (procediendo igual):
972,100 Cal.

Contenido de calor del ácido al salir: 3'447,224 Cal.

Contenido de calor del vapor de agua:

humedad molal .006, punto de rocío 1°C., calor de vap. a 1°C.: 10,725 Cal./kgmo. mol. capacidad de calor molal entre 1 C. y 30°C.: 8.36

haciendo el cálculo como lo hice en la torre de Glover, obtengo: 842,985 Cal.

Resumen del balance de calor en las torres de Gay-Lussac:

Entra:

| | |
|----------------------------------|---------------------|
| en los gases | 975,500 Cal. |
| en el ácido Glover | 3'444,276 .. |
| al formar y disolver el N_2O_3 | 5'577,000 .. |
| Total: | <u>9'996,776 ..</u> |

Sale:

| | |
|---------------------|---------------------|
| en los gases | 972,100 Cal. |
| en el vapor de agua | 842,985 .. |
| en el ácido | 3'447,224 .. |
| pérdidas (por dif.) | 4'734,467 .. |
| Total: | <u>9'996,776 ..</u> |

Resumen del Balance de Calor en toda la Planta.

| | | |
|-----------------------------|-------------|------|
| Entra: | | |
| en los gases | 70'824,400 | Cal. |
| en el óxido nítrico | 121,700 | .. |
| en la reacción de formación | 114'108,100 | .. |
| en la disolución del ácido | 21'507,860 | .. |
| Total: | 206'562,060 | .. |
| Sale: | | |
| al concentrar el ácido | 2'781,360 | .. |
| en los gases | 972,100 | .. |
| en el vapor de agua | 842,985 | .. |
| en el ácido producido | 1'203,444 | .. |
| en los enfriadores | 50'506,480 | .. |
| pérdidas | 150'255,691 | .. |
| Total: | 206'562,060 | .. |

Guadalajara, Jal., a los 30 días del mes de Mayo de 1945.

Armando Hopkins Durazo.

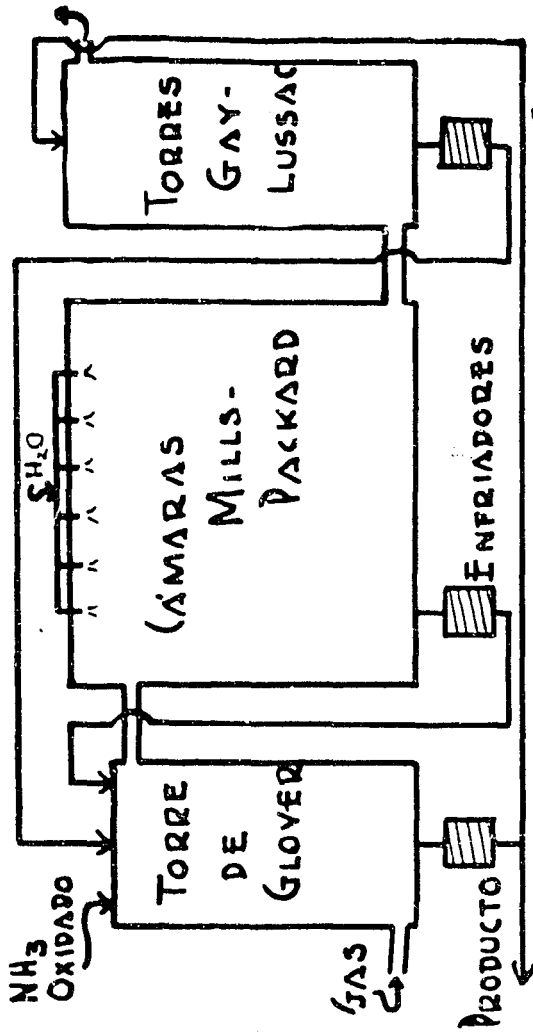


**CONDUCTO PARA
LOS GASES**

CORTE TRANSVERSAL

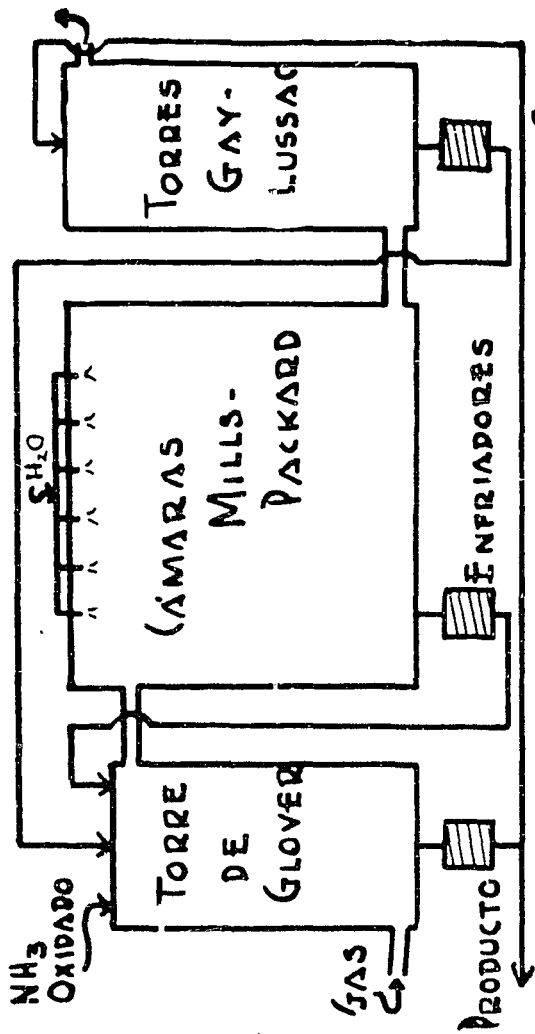
1 : 33

44



OH.

CARTA DE FLUJO



CH.

CARTA DE FLUJO



Bibliografía.

FAIRLIE.—“Sulfuric Acid Manufacture”

LUNGE-CUMMING.—“Manufacture of Acids and Alkalis”.

BUTTS.—“Metallurgical Problems”.

HOUGEN and WATSON.—“Industrial Chemical Calculations”

WALKER.—“Principles of Chemical Engineering”.

PERRY.—“Chemical Engineer's Handbook”.

MOLINARI.—“Química Industrial Inorgánica”.

Revistas: Industrial Eng. Chem. Eng. Mining Journal.